

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

\_\_\_\_\_ / О.В. Юсупова

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

### Б1.В.ДВ.01.02 «Схемотехника»

<b>Код и направление подготовки (специальность)</b>	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
<b>Направленность (профиль)</b>	Электроэнергетические системы и сети
<b>Квалификация</b>	Бакалавр
<b>Форма обучения</b>	Очная
<b>Год начала подготовки</b>	2022
<b>Институт / факультет</b>	Электротехнический факультет (ЭТФ)
<b>Выпускающая кафедра</b>	кафедра "Автоматизированные электроэнергетические системы"
<b>Кафедра-разработчик</b>	кафедра "Автоматизированные электроэнергетические системы"
<b>Объем дисциплины, ч. / з.е.</b>	108 / 3
<b>Форма контроля (промежуточная аттестация)</b>	Зачет

**Б1.В.ДВ.01.02 «Схемотехника»**

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки (специальности) **13.03.02 Электроэнергетика и электротехника**, утвержденного приказом Министерства образования и науки РФ от № 144 от 28.02.2018 и соответствующего учебного плана.

Разработчик РПД:

Старший преподаватель

(должность, степень, ученое звание)

В.Е. Верещагин

(ФНО)

Заведующий кафедрой

(ФИО, степень, ученое звание)

СОГЛАСОВАНО:

Председатель методического совета  
факультета / института (или учебно-  
методической комиссии)

В.Н Овсянников, кандидат  
технических наук, доцент

(ФИО, степень, ученое звание)

Руководитель образовательной программы

Е.А. Кротков, кандидат  
технических наук, доцент

(ФИО, степень, ученое звание)

## Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы .....	4
2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы .....	4
3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся .....	5
4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам), с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий .....	5
4.1 Содержание лекционных занятий .....	5
4.2 Содержание лабораторных занятий .....	7
4.3 Содержание практических занятий .....	7
4.4. Содержание самостоятельной работы .....	8
5. Перечень учебной литературы и учебно-методического обеспечения по дисциплине (модулю) .....	9
6. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения .....	9
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», профессиональных баз данных, информационно-справочных систем .....	10
8. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю) .....	10
9. Методические материалы .....	11
10. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю) .....	12

## 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Наименование категории (группы) компетенций	Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Результаты обучения (знать, уметь, владеть, соотнесенные с индикаторами достижения компетенции)
Профессиональные компетенции			
Не предусмотрено	ПК-2 способность к инженерно-техническому сопровождению деятельности по техническому обслуживанию и ремонту оборудования подстанций	ПК-2.3 Обосновывает выбор параметров электрооборудования подстанций и электрической сети, учитывая технические ограничения	Владеть навыками чтения схем электроэнергетических систем, схем электрических соединений подстанций.
			Владеть навыками электромонтажа и схемотехники электрооборудования подстанций.

## 2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы: **вариативная часть**

Код компетенции	Предшествующие дисциплины	Параллельно осваиваемые дисциплины	Последующие дисциплины
ПК-2		Технологии электромонтажа	Алгоритмы и методы решения задач профессиональной деятельности; Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения; Надежность электрических систем; Основы автоматизированных систем управления электрооборудованием подстанции ; Основы проектирования объектов электрических систем; Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы; Практико-ориентированный проект; Производственная практика: преддипломная практика; Эксплуатационные режимы в электрических системах ; Электромагнитные переходные процессы в электрических системах; Электромеханические переходные процессы в электрических системах; Энергосбережение в электрических системах



**3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся**

Вид учебной работы	Всего часов / часов в электронной форме	3 семестр часов / часов в электронной форме
<b>Аудиторная контактная работа (всего),</b> в том числе:	32	32
Лекции	16	16
Практические занятия	16	16
<b>Внеаудиторная контактная работа, КСР</b>	3	3
<b>Самостоятельная работа (всего),</b> в том числе:	73	73
подготовка к практическим занятиям	30	30
составление конспектов	43	43
<b>Итого: час</b>	108	108
<b>Итого: з.е.</b>	3	3

**4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам), с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**

№ раздела	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы				
		ЛЗ	ЛР	ПЗ	СРС	Всего часов
1	Электрические цепи	4	0	4	10	18
2	Цифровая обработка сигналов	2	0	2	10	14
3	Чтение схем и чертежей	4	0	4	20	28
4	Программирование логических реле и контроллеров	6	0	6	33	45
	<b>КСР</b>	0	0	0	0	3
	<b>Итого</b>	16	0	16	73	108

**4.1 Содержание лекционных занятий**

№ занятия	Наименование раздела	Тема лекции	Содержание лекции (перечень дидактических единиц: рассматриваемых подтем, вопросов)	Количество часов / часов в электронной форме
<b>3 семестр</b>				

1	Электрические цепи	Электрические цепи. Методы анализа сложных электрических цепей.	Ток, напряжение, мощность и энергия. Элементы электрических цепей и их уравнения. Электрическая цепь и уравнения соединений. Особенности анализа сложных цепей. Электрические фильтры. Длинные линии и телеграфные уравнения. Коэффициент отражения, стоячие и смешанные волны.	2
2	Электрические цепи	Полупроводниковые приборы.	Электронные усилители и преобразователи сигналов. Три основные схемы усилителей на транзисторах. Резистивный и резонансный усилители. Обратная связь в усилителях. Операционный усилитель и аналоговый перемножитель.	2
3	Цифровая обработка сигналов	Импульсные и цифровые устройства.	Импульсные сигналы и электронный ключ.	2
4	Чтение схем и чертежей	Электрические схемы.	Условные обозначения, применяемые в схемах. Содержание и назначение структурных схем и функциональных схем. Содержание и назначение принципиальных (полных) схем. Принципиальные схемы энергетических устройств. Принципиальные схемы электропривода. Содержание и назначение схем соединений (монтажных). Содержание и назначение схем электрических цепей с элементами электроники.	2
5	Чтение схем и чертежей	Чертежи электро-энергетических систем и сетей, электрических соединений подстанций и электроустановок.	Общая характеристика чертежей электрических устройств. Чертежи трансформаторных подстанций и распределительных устройств напряжением выше 1000 В. Монтажные чертежи и чертежи крепления различной аппаратуры. Чертежи распределительных устройств до 1000 В. Чертежи опор электрических линий до 1000 В и выше. Методические указания по чтению чертежей электроустановок. Общая характеристика и условные обозначения чертежей электрических сетей. Чертежи силовых электросетей. Чертежи электроосветительных сетей. Методические указания по чтению чертежей электрических сетей.	2
6	Программирование логических реле и контроллеров	Основы программирования логических реле OWEN Logic.	Библиотека функциональных блоков. Размещение компонентов и создание связей. Настройка параметров компонентов. Размещение блоков переменных. Размещение блока константы. Чтение/запись в функциональный блок. Создание обратной связи. Добавление комментариев. Задание порядка исполнения. Отладка коммутационной программы. Загрузка в прибор коммутационной программы.	2

7	Программирование логических реле и контроллеров	Основы программирования логических реле ONI PLR Studio.	Рабочая область. Окно библиотеки функциональных блоков. Входы. Выходы. Флаги. Логические функции. Специальные функции.	2
8	Программирование логических реле и контроллеров	Основы программирования контроллеров ПЛК Mitsubishi.	Подготовка проекта. Библиотека функциональных элементов. Правила построения проекта.	2
<b>Итого за семестр:</b>				<b>16</b>
<b>Итого:</b>				<b>16</b>

## 4.2 Содержание лабораторных занятий

Учебные занятия не реализуются.

## 4.3 Содержание практических занятий

№ занятия	Наименование раздела	Тема практического занятия	Содержание практического занятия (перечень дидактических единиц: рассматриваемых подтем, вопросов)	Количество часов / часов в электронной форме
<b>3 семестр</b>				
1	Электрические цепи	Изучение физических принципов работы аналоговых и цифровых устройств моделированием в программе ElectronicsWorkbench.	Анализ сложных цепей. Параметры и функции четырехполюсника. Электрические фильтры. Частотные характеристики фильтров. Усилитель на биполярном транзисторе. Усилитель на операционном усилителе.	2
2	Электрические цепи	Изучение физических принципов работы аналоговых и цифровых устройств моделированием в программе ElectronicsWorkbench.	Умножение частоты. Амплитудная модуляция. Автогенератор на операционном усилителе.	2
3	Цифровая обработка сигналов	Изучение цифровых устройств моделированием в программе ElectronicsWorkbench.	Триггеры. Дешифратор. Счётчик. Цифро-аналоговый преобразователь. Аналого-цифровой преобразователь.	2
4	Чтение схем и чертежей	Электрические схемы.	Выполнение методических указаний по чтению и раз-работке схем вспомогательных цепей.	2
5	Чтение схем и чертежей	Чертежи электро-энергетических систем и сетей, электрических соединений подстанций и электроустановок.	Выполнение методических указаний по чтению и раз-работке схем цепей с элементами электроники.	2
6	Программирование логических реле и контроллеров	Программирование логического реле OWEN.	Разработка программы для логического реле (OWEN) по заданному алгоритму работы электрооборудования. Отладка программы на стенде.	2

7	Программирование логических реле и контроллеров	Программирование логического реле ONI.	Разработка программы для логического реле (ONI) по заданному алгоритму работы электрооборудования. Отладка программы на стенде.	2
8	Программирование логических реле и контроллеров	Программирование контроллера ПЛК Mitsubishi.	Разработка программы для контроллера ПЛК Mitsubishi. Отладка программы на стенде.	2
<b>Итого за семестр:</b>				<b>16</b>
<b>Итого:</b>				<b>16</b>

#### 4.4. Содержание самостоятельной работы

Наименование раздела	Вид самостоятельной работы	Содержание самостоятельной работы (перечень дидактических единиц: рассматриваемых подтем, вопросов)	Количество часов
<b>3 семестр</b>			
Электрические цепи	Подготовка к практическим занятиям №1 и №2	Расчёт полупроводниковых преобразователей напряжения. Основные схемы транзисторных преобразователей напряжения и их выбор. Усилители мощности. Особенности проектирования и основные расчётные соотношения. Двухтактные преобразователи напряжения с самовозбуждением. Преобразователи напряжения с независимым возбуждением. Способы стабилизации частоты и выходного напряжения преобразователя. Расчёт транзисторного стабилизатора напряжения. Графический расчёт режима работы стабилитрона.	10
Цифровая обработка сигналов	Подготовка к практическому занятию №3	Разработка логической схемы (синтез схемы управления) по заданному алгоритму таблице истинности. Для данного логического выражения разработать логическую схему на элементах "И-НЕ". Синтезировать счётчик по модулю.	10
Чтение схем и чертежей	Подготовка к практическим занятиям №4 и №5	Разработка схем электроустановки по ТЗ. Подготовка комплекта технической документации в соответствии с ЕСКД.	20
Программирование логических реле и контроллеров	Подготовка к практическим занятиям №6, №7 и №8	Описание интерфейса среды разработки OWEN Logic проекта коммутационной программ. Описание интерфейса среды разработки ONI PLR Studio проекта коммутационной программ. Описание интерфейса среды разработки проекта коммутационной программ для контроллера ПЛК Mitsubishi.	33
<b>Итого за семестр:</b>			<b>73</b>

<b>Итого:</b>	<b>73</b>
---------------	-----------

## 5. Перечень учебной литературы и учебно-методического обеспечения по дисциплине (модулю)

№ п/п	Библиографическое описание	Ресурс НТБ СамГТУ (ЭБС СамГТУ, IPRbooks и т.д.)
Основная литература		
1	Ляпидов, В.С. Схемотехника : учеб. пособие / В. С. Ляпидов, Т. В. Арбузова; Самар.гос.техн.ун-т.- Самара, 2011.- 72 с.	Электронный ресурс
2	Митрошин, В.Н. Схемотехника цифровых устройств : лаб.практикум / В. Н. Митрошин, А. А. Абросимов; Самар.гос.техн.ун-т, Автоматизация производств и управление транспортными системами.- Самара, 2014.- 84 с.- Режим доступа: <a href="https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu elib 1048">https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu elib 1048</a>	Электронный ресурс
3	Митрошин, В.Н. Схемотехника цифровых устройств : учебное пособие / В. Н. Митрошин, А. Г. Мандра, Г. Н. Рогачев; Самар.гос.техн.ун-т, Автоматика и управление в технических системах .- 3-е изд., испр. и доп..- Самара, 2019.- 118 с.- Режим доступа: <a href="https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu elib 3525">https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu elib 3525</a>	Электронный ресурс
4	Топильский, В.Б. Схемотехника аналого-цифровых преобразователей / В. Б. Топильский.- М., Техносфера, 2014.- 286 с.	Электронный ресурс
Дополнительная литература		
5	Миленина, С.А. Электротехника, электроника и схемотехника : учеб. и практикум для академ. бакалавриата / С. А. Миленина ;под ред. Н. К. Миленина; Моск.гос.ун-т информ.технологий, радиотехники и электроники.- М., Юрайт, 2015.- 399 с.	Электронный ресурс
Учебно-методическое обеспечение		
6	Схемотехника высокопроизводительных систем на Multisim : метод. указания к лаборатор. раб. / Самар.гос.техн.ун-т, Вычислительная техника; сост.: И. В. Воронцов, С. А. Федосов.- Самара, 2016.- 86 с.- Режим доступа: <a href="https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu elib 2415">https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu elib 2415</a>	Электронный ресурс

Доступ обучающихся к ЭР НТБ СамГТУ ([elib.samgtu.ru](http://elib.samgtu.ru)) осуществляется посредством электронной информационной образовательной среды университета и сайта НТБ СамГТУ по логину и паролю.

## 6. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения

При проведении лекционных занятий используется мультимедийное оборудование.

Организовано взаимодействие обучающегося и преподавателя с использованием электронной ин-формационной образовательной среды университета.

№ п/п	Наименование	Производитель	Способ распространения
1	Microsoft Windows XP Professional	Microsoft (Зарубежный)	Лицензионное

2	Microsoft Office 2007 Open License Academic	Microsoft (Зарубежный)	Лицензионное
3	Electronics Workbench	NI Multisim (Зарубежный)	Лицензионное
4	OWEN Logic	ОВЕН (Отечественный)	Свободно распространяемое
5	ONI PLR Studio	Oni-system (Отечественный)	Свободно распространяемое
6	Alpha Programming	Mitsubishi (Зарубежный)	Свободно распространяемое

## 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», профессиональных баз данных, информационно-справочных систем

№ п/п	Наименование	Краткое описание	Режим доступа
1	ScienceDirect (Elsevier) - естественные науки, техника, медицина и общественные науки.	<a href="http://www.sciencedirect.com/">http://www.sciencedirect.com/</a>	Зарубежные базы данных ограниченного доступа
2	Scopus - база данных рефератов и цитирования	<a href="http://www.scopus.com/">http://www.scopus.com/</a>	Зарубежные базы данных ограниченного доступа
3	Электронная библиотека «Наука и техника»	<a href="http://n-t.ru">http://n-t.ru</a>	Ресурсы открытого доступа

## 8. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

### Лекционные занятия

Аудитории для лекционных занятий укомплектованы мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории (наборы демонстрационного оборудования (проектор, экран, компьютер/ноутбук), учебно-наглядные пособия, тематические иллюстрации).

### Практические занятия

Аудитории для практических занятий укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения (проектор, экран, компьютер/ноутбук).

### Самостоятельная работа

Помещения для самостоятельной работы оснащены компьютерной техникой с возможностью под-ключения к сети «Интернет» и доступом к электронной информационно-образовательной среде СамГТУ:

- читальный зал НТБ СамГТУ (ауд. 200 корпус № 8; ауд. 125 корпус № 1; ауд. 41, 31, 34, 35 Главный корпус библиотеки, ауд. 83а, 414, 416, 0209 АСА СамГТУ; ауд. 401 корпус №10);
- компьютерные классы (ауд. 208, 210 корпус № 8).

КСР проводятся, в том числе, с применением средств электронной почты и электронной среды уни-верситета СамГТУ.

## 9. Методические материалы

### Методические рекомендации при работе на лекции

До лекции студент должен просмотреть учебно-методическую и научную литературу по теме лекции с тем, чтобы иметь представление о проблемах, которые будут разбираться в лекции.

Перед началом лекции обучающимся сообщается тема лекции, план, вопросы, подлежащие рассмотрению, доводятся основные литературные источники. Весь учебный материал, сообщаемый преподавателем, должен не просто прослушиваться. Он должен быть активно воспринят, т.е. услышан, осмыслен, понят, зафиксирован на бумаге и закреплён в памяти. Приступая к слушанию нового учебного материала, полезно мысленно установить его связь с ранее изученным. Следя за техникой чтения лекции (акцент на существенном, повышение тона, изменение ритма, пауза и т.п.), необходимо вслед за преподавателем уметь выделять основные категории, законы и определять их содержание, проблемы, предполагать их возможные решения, доказательства и выводы. Осуществляя такую работу, можно значительно облегчить себе понимание учебного материала, его конспектирование и дальнейшее изучение.

Конспектирование лекции позволяет обработать, систематизировать и лучше сохранить полученную информацию с тем, чтобы в будущем можно было восстановить в памяти основные, содержательные моменты. Типичная ошибка, совершаемая обучающимся, дословное конспектирование речи преподавателя. Как правило, при записи «слово в слово» не остается времени на обдумывание, анализ и синтез информации. Отбирая нужную информацию, главные мысли, проблемы, решения и выводы, необходимо сокращать текст, строить его таким образом, чтобы потом можно было легко в нем разобраться. Желательно оставить в рабочих конспектах поля, на которых можно будет делать пометки из рекомендованной литературы, дополняющие материал прослушанной лекции, а также подчеркивающие особую важность тех или иных теоретических положений. С окончанием лекции работа над конспектом не может считаться завершённой. Нужно еще восстановить отдельные места, проверить, все ли понятно, уточнить что-то на консультации и т.п. с тем, чтобы конспект мог быть использован в процессе подготовки к практическим занятиям, зачету, экзамену. Конспект лекции – незаменимый учебный документ, необходимый для самостоятельной работы.

### Методические рекомендации при подготовке и работе на практическом занятии

Практические занятия по дисциплине проводятся в целях выработки практических умений и приобретения навыков в решении профессиональных задач.

Рекомендуется следующая схема подготовки к практическому занятию:

1. ознакомление с планом практического занятия, который отражает содержание предложенной темы;
2. проработка конспекта лекции;
3. чтение рекомендованной литературы;
4. подготовка ответов на вопросы плана практического занятия;
5. выполнение тестовых заданий, задач и др.

Подготовка обучающегося к практическому занятию производится по вопросам, разработанным для каждой темы практических занятий и (или) лекций. В процессе подготовки к практическим занятиям, необходимо обратить особое внимание на самостоятельное изучение рекомендованной литературы.

Работа студентов во время практического занятия осуществляется на основе заданий, которые выдаются обучающимся в начале или во время занятия. На практических занятиях приветствуется активное участие в обсуждении конкретных ситуаций, способность на основе полученных знаний находить наиболее эффективные решения поставленных проблем, уметь находить полезный дополнительный материал по тематике занятий. Обучающимся необходимо обращать внимание на основные понятия, алгоритмы, определять практическую значимость рассматриваемых вопросов. На практических занятиях обучающиеся должны уметь выполнить расчет по заданным параметрам или выработать определенные решения по обозначенной проблеме. Задания могут быть групповые и

индивидуальные. В зависимости от сложности предлагаемых заданий, целей занятия, общей подготовки обучающихся преподаватель может подсказать обучающимся алгоритм решения или первое действие, или указать общее направление рассуждений. Полученные результаты обсуждаются с позиций их адекватности или эффективности в рассмотренной ситуации.

## **Методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы**

Организация самостоятельной работы обучающихся ориентируется на активные методы овладения знаниями, развитие творческих способностей, переход от поточного к индивидуализированному обучению с учетом потребностей и возможностей обучающегося.

Самостоятельная работа с учебниками, учебными пособиями, научной, справочной литературой, материалами периодических изданий и Интернета является наиболее эффективным методом получения дополнительных знаний, позволяет значительно активизировать процесс овладения информацией, способствует более глубокому усвоению изучаемого материала. Все новые понятия по изучаемой теме необходимо выучить наизусть и внести в глоссарий, который целесообразно вести с самого начала изучения курса.

Самостоятельная работа реализуется:

- непосредственно в процессе аудиторных занятий;
- на лекциях, практических занятиях;
- в контакте с преподавателем вне рамок расписания;
- на консультациях по учебным вопросам, в ходе творческих контактов, при ликвидации задолженностей, при выполнении индивидуальных заданий и т.д.;
- в библиотеке, дома, на кафедре при выполнении обучающимся учебных и практических задач.

Эффективным средством осуществления обучающимся самостоятельной работы является электронная информационно-образовательная среда университета, которая обеспечивает доступ к учебным планам, рабочим программам дисциплин (модулей), практик, к изданиям электронных библиотечных систем.

## **10. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю)**

Фонд оценочных средств представлен в приложении № 1.



**Фонд оценочных средств  
по дисциплине  
Б1.В.ДВ.01.02 «Схемотехника»**

<b>Код и направление подготовки (специальность)</b>	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
<b>Направленность (профиль)</b>	Электроэнергетические системы и сети
<b>Квалификация</b>	Бакалавр
<b>Форма обучения</b>	Очная
<b>Год начала подготовки</b>	2022
<b>Институт / факультет</b>	Электротехнический факультет (ЭТФ)
<b>Выпускающая кафедра</b>	кафедра "Автоматизированные электроэнергетические системы"
<b>Кафедра-разработчик</b>	кафедра "Автоматизированные электроэнергетические системы"
<b>Объем дисциплины, ч. / з.е.</b>	108 / 3
<b>Форма контроля (промежуточная аттестация)</b>	Зачет

**Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю),  
соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной  
программы**

Наименование категории (группы) компетенций	Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Результаты обучения (знать, уметь, владеть, соотнесенные с индикаторами достижения компетенции)
Профессиональные компетенции			
Не предусмотрено	ПК-2 способность к инженерно-техническому сопровождению деятельности по техническому обслуживанию и ремонту оборудования подстанций	ПК-2.3 Обосновывает выбор параметров электрооборудования подстанций и электрической сети, учитывая технические ограничения	Владеть навыками чтения схем электроэнергетических систем, схем электрических соединений подстанций.
			Владеть навыками электромонтажа и схемотехники электрооборудования подстанций.

**Матрица соответствия оценочных средств запланированным результатам обучения**

Код индикатора достижения компетенции	Результаты обучения	Оценочные средства	Текущий контроль успеваемости	Промежуточная аттестация
Электрические цепи				
ПК-2.3 Обосновывает выбор параметров электрооборудования подстанций и электрической сети, учитывая технические ограничения	<b>Владеть</b> навыками электромонтажа и схемотехники электрооборудования подстанций.	Задания к практическим занятиям, вопросы к зачёту	Да	Нет
	<b>Владеть</b> навыками чтения схем электроэнергетических систем, схем электрических соединений подстанций.	Задания к практическим занятиям, вопросы к зачёту	Да	Нет
Цифровая обработка сигналов				
ПК-2.3 Обосновывает выбор параметров электрооборудования подстанций и электрической сети, учитывая технические ограничения	<b>Владеть</b> навыками электромонтажа и схемотехники электрооборудования подстанций.	Задания к практическим занятиям, вопросы к зачёту	Да	Нет
	<b>Владеть</b> навыками чтения схем электроэнергетических систем, схем электрических соединений подстанций.	Задания к практическим занятиям, вопросы к зачёту	Да	Нет

Чтение схем и чертежей				
ПК-2.3 Обосновывает выбор параметров электрооборудования подстанций и электрической сети, учитывая технические ограничения	<b>Владеть</b> навыками чтения схем электроэнергетических систем, схем электрических соединений подстанций.	Задания к практическим занятиям, вопросы к зачёту	Да	Нет
	<b>Владеть</b> навыками электромонтажа и схемотехники электрооборудования подстанций.	Задания к практическим занятиям, вопросы к зачёту	Да	Нет
Программирование логических реле и контроллеров				
ПК-2.3 Обосновывает выбор параметров электрооборудования подстанций и электрической сети, учитывая технические ограничения	<b>Владеть</b> навыками электромонтажа и схемотехники электрооборудования подстанций.	Задания к практическим занятиям, вопросы к зачёту	Да	Нет
	<b>Владеть</b> навыками чтения схем электроэнергетических систем, схем электрических соединений подстанций.	Задания к практическим занятиям, вопросы к зачёту	Да	Нет

**В.Е. ВЕРЕЩАГИН**

# **ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА**

## **ЧАСТЬ 1**

**Учебно-методическое пособие**

**Самара**  
**Самарский государственный технический университет**  
**2020**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

Кафедра «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

В.Е. ВЕРЕЩАГИН

# ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА

## ЧАСТЬ 1

*Учебно-методическое пособие*

Самара  
Самарский государственный технический университет  
2020

Печатается по решению ученого совета СамГТУ (протокол № 8 от 28.03.2019 г.).

УДК 621.313:621.38 (075.8)

ББК 31.261:32.85я73

В 317

**Верещагин В.Е.**

**Электромеханотроника. Часть 1:** учеб.-метод. пособие / В.Е. Верещагин.  
– Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. – 105 с.

Рассматриваются принцип действия и методики расчета параметров полупроводниковых приборов аналоговой и цифровой техники.

Материал предназначен для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения профилей «Электромеханика» и «Электрооборудование автомобилей и тракторов».

Рецензент: д-р техн. наук, проф. *Ю.А. Макаричев*

УДК 621.313:621.38 (075.8)

ББК 31.261:32.85я73

В 317

© В.Е. Верещагин, 2020

© Самарский государственный  
технический университет, 2020

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Пособие, содержащее задания и контрольные вопросы, рассчитано на практические занятия и самостоятельную работу студентов по дисциплине «Электромеханотроника». Задания могут выдаваться для выполнения контрольных работ.

В учебном пособии рассматриваются преобразователи напряжения, используемые для питания электромеханических устройств, проектирование электронных устройств питания, а также приводятся основы программирования логических реле и контроллеров для автоматизации электромеханических систем.

Даны рекомендации по выбору элементной базы для полупроводниковых преобразователей электронных устройств питания электромеханических систем.

Программирование представлено в системах разработки проектов OWEN Logic и ONI PLR Studio. Это современные отечественные средства автоматизации электромеханотронных систем.

Пособие рассчитано на студентов, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение находят полупроводниковые системы управления электромеханическими системами и комплексами. От их точной и надежной работы зависят оптимальные алгоритмы функционирования оборудования в технологических процессах преобразования механической и электрической энергии.

В пособии рассматриваются методики проектирования преобразователей напряжения (ПН) и стабилизаторов напряжения (СН) для питания электромеханических систем малой мощности. Даны основы логического программирования реле и контроллеров для автоматизации технологических процессов. Рассмотрены примеры реализации программ в системах разработки проектов OWEN Logic и ONI PLR Studio.

Рекомендации по расчету и выбору элементов схем опираются на справочные материалы, а в расчетах приводятся примеры современных компонентов.

Вопросы преобразовательной техники базируются на применении полупроводниковых приборов – диодов, тиристоров, силовых транзисторов. Значительное внимание уделено импульсным преобразователям постоянного напряжения, стабилизаторам напряжения и другим преобразователям, получающим в последнее время большое развитие.

Пособие рассчитано на дисциплину «Электромеханотроника», относящуюся к числу наиболее важных для подготовки современных бакалавров – электриков, электромехаников, электроэнергетиков и представителей других электротехнических специальностей. Студенты в рамках указанной дисциплины должны овладеть навыками проектирования электротехнических систем и их компонентов, а также инженерно-технического сопровождения деятельности по техническому обслуживанию и ремонту оборудования. Будущие специалисты знакомятся с классификацией и областями применения приборов и схем, используемых в электромеханотронике, с принципами действия и особенностями устройств для обработки сигналов в электронных



системах управления и отображения информации, с принципами действия и особенностями работы преобразователей электрической энергии, применяемых в электроприводе, электрической тяге, электроэнергетике и т.д. Поэтому электромеханотроника в совокупности с другими дисциплинами формирует и расширяет возможности будущего специалиста и является средством для дальнейшего прогресса в области преобразовательной полупроводниковой техники и основой автоматизации многих областей промышленности, транспорта и энергетики.

Главная цель дисциплины заключается в обучении студента принципам действия функционально законченных электронных устройств, умению грамотно эксплуатировать их и формулировать задание на разработку нового устройства. Практические занятия позволят им получить первоначальные (базовые) навыки расчета и проектирования электротехнических систем.

Пособие написано в соответствии с направлением подготовки «Электроэнергетика и электротехника» дисциплины «Электромеханотроника».

# **1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ**

Преобразователями напряжения (ПН) называются устройства, которые преобразуют напряжение постоянного тока одной величины в различные по величинам напряжения переменного или постоянного тока, выводы которых не имеют гальванической связи с первичным источником питания. Основными ключевыми элементами ПН являются полупроводниковые элементы – тиристоры и транзисторы. Они широко используются в источниках электропитания различного применения: магнитных усилителях, инверторах, выпрямителях, радиоэлектронной аппаратуры, возбуждателях и схемах управления электрических машин и т.п.

Полупроводниковые преобразователи (ПП), в отличие от вибрационных или электромашинных преобразователей, считаются статическими устройствами, так как в них отсутствуют движущиеся механические части, поэтому они долговечны, надежны в работе, имеют более высокий коэффициент полезного действия (КПД) в связи с отсутствием механических и добавочных потерь. Кроме того, ПП отличаются лучшими массогабаритными показателями и помехоустойчивостью.

Преобразователи напряжения на небольшую мощность (до 500 Вт) при питании от источников с низким напряжением (14–27 В) преимущественно выполняются на транзисторах, работающих в режиме переключений. Преобразователи, питающиеся от источников с повышенным напряжением (50–100 В и выше), на большие мощности рационально выполнять на тиристорах.

## **1.1. Основные схемы транзисторных преобразователей напряжения и их выбор**

Условно все преобразователи напряжения (ПН) можно подразделить на два типа: преобразователи с самовозбуждением (автогенераторы) и усилители мощности.

В результате неэффективного применения транзисторов и сравнительно большой величины потерь мощности в них преобразователи с самовозбуждением используются в источниках электропитания малой и средней мощности. В настоящее время продолжаются разработки полупроводниковых материалов с хорошими свойствами для эффективной и надежной работы в таких устройствах, как частотные преобразователи.

На мощности от 50 до 1000 Вт нашли широкое распространение усилители мощности, содержащие маломощный задающий генератор и выходной (силовой) каскад. Регулировка и стабилизация частоты напряжения переменного тока в этих преобразователях осуществляются без значительных расходов электроэнергии в задающем генераторе.

### *Автогенераторы*

Трансформатор с положительной магнитной обратной связью релаксационного однотоктного генератора полупроводникового преобразователя с самовозбуждением работает с постоянным подмагничиванием. Магнитопровод трансформатора, как правило, выполняется с диамагнитным зазором или из магнитного материала с линейной характеристикой намагничивания.

Однотоктные преобразователи могут наиболее эффективно использоваться в маломощных (до 2 Вт) преобразователях, так как в них величина КПД, возможно, будет выше, чем в двухтактных преобразователях.

Основой двухтактных преобразователей являются двухтактные блокинг-генераторы. Они широко распространены и имеют различные схемные решения.

Часто применяемые схемы автогенераторов показаны на рис. 1.1.

На схемах видно, что подключение полюса (положительного или отрицательного) источника питания к середине первичной обмотки. На схемах рис. 1.1 (а, б) показано подключение с общим эмиттером, а на схемах рис. 1.1 (в) – с общим коллектором. В случае общего коллектора есть возможность размещения транзисторов без электриче-

ской изоляции на общем теплоотводе (радиаторе), что дает возможность повысить коэффициент усиления транзистора по мощности. Для ограничения тока базы транзистора и стабилизации переходного процесса в схемах рис. 1.1 имеется общее (базовое) дополнительное сопротивление в цепи баз.

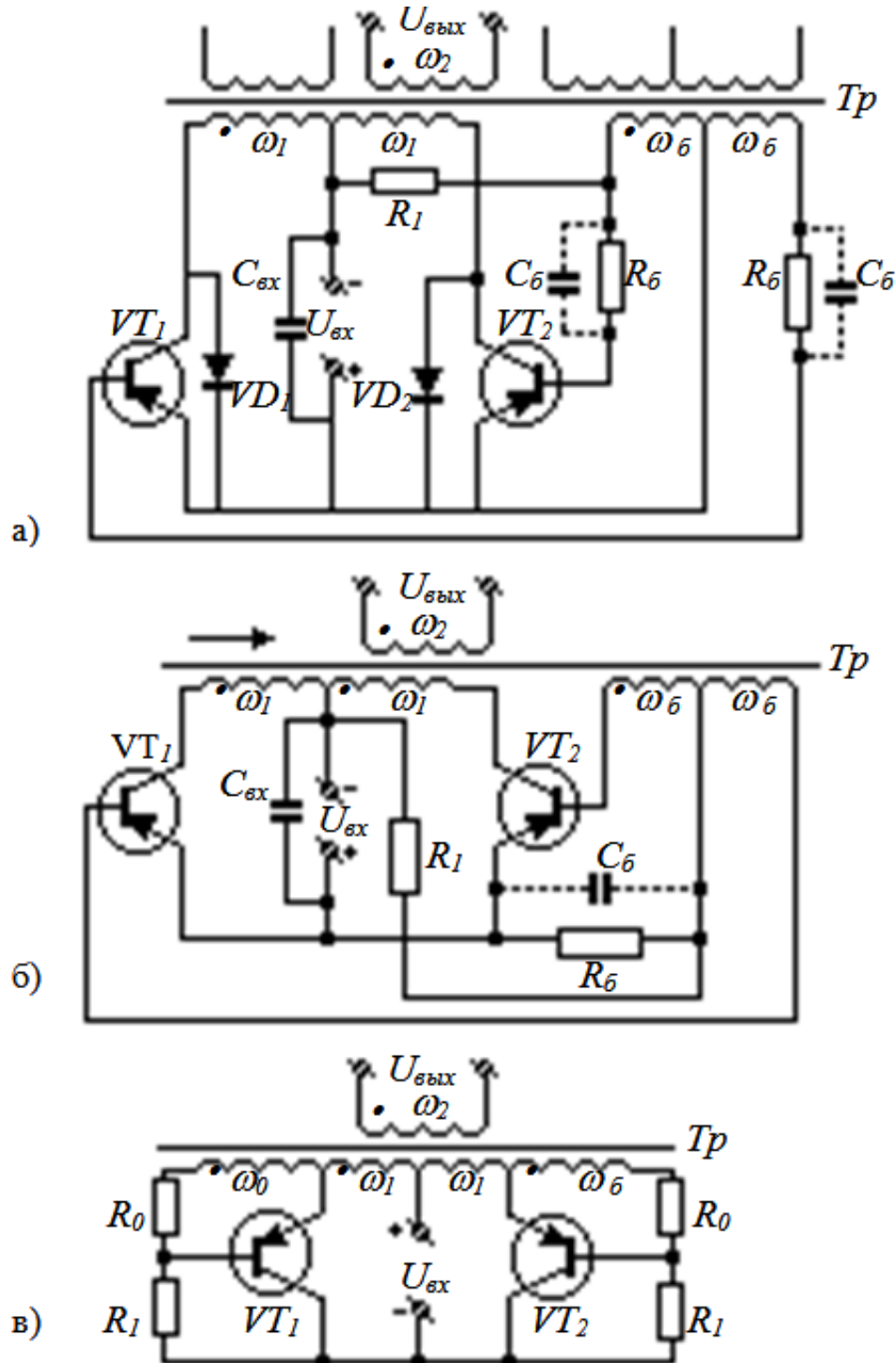


Рис. 1.1. Схемы двухтактных преобразователей напряжения с самовозбуждением с выводом средней точки коллекторной обмотки

Частота выходного напряжения преобразователей, схемы которых приведены на рис. 1.1, определяется параметрами насыщающегося силового трансформатора и напряжением питания [1]:

$$f = \frac{U_{\text{вх}} \cdot 10^4}{4 \cdot \omega_1 \cdot B_s \cdot Q_{\text{см}} \cdot k_c}.$$

На выходе преобразователя формируются прямоугольные импульсы разной полярности со скважностью, равной 2.

Если в преобразователе используется RC-цепь (рис. 1.2), то силовые трансформаторы в схеме работают без захода в режим насыщения материала магнитопровода. При этом времязадающая цепь  $R_y C_y$  формирует частоту переменного напряжения и определяется постоянной времени. В схеме рис. 1.2 трансформатор имеет дополнительную обмотку управления  $\omega_y$ . Наводимая в ней ЭДС  $U_y$  суммируется с напряжением базовых обмоток и через сопротивление  $R_y$  заряжает конденсатор  $C_y$ . Со временем напряжение на конденсаторе превысит сумму напряжений обеих базовых обмоток, в результате чего к базе закрытого транзистора будет приложено отпирающее напряжение. Это вызовет переключение транзисторов преобразователя и смену полярности выходного напряжения.

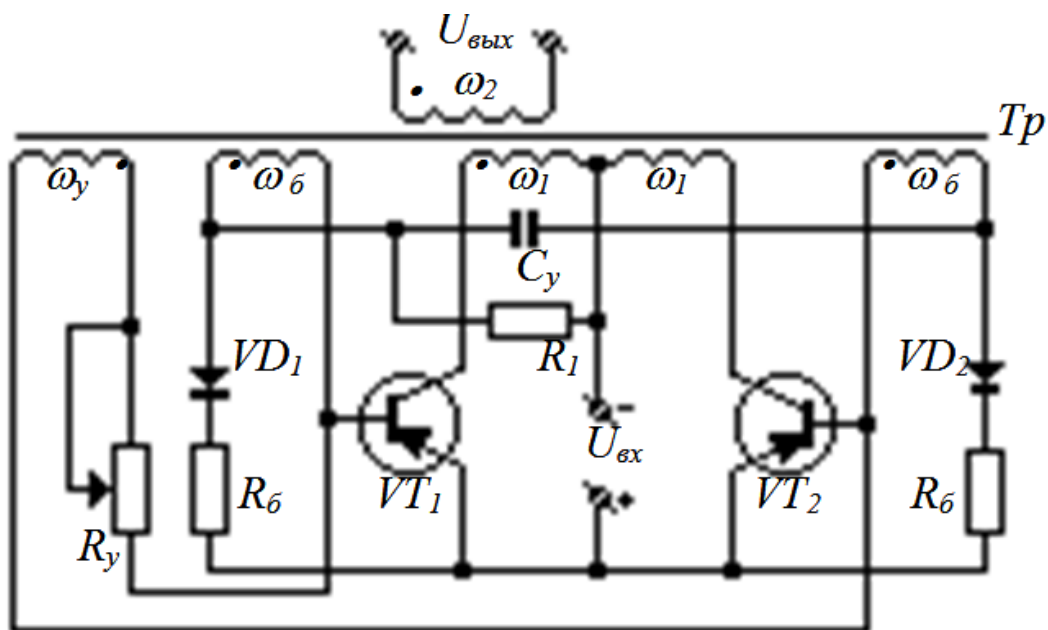


Рис. 1.2. Схема автогенератора с времязадающей RC-цепью

Постоянную времени цепи заряда конденсатора  $C_y$  определяет период колебаний выходного напряжения [1]:

$$T = 2R_y C_y \ln \left( \frac{U_y + 4U_{\delta y}}{U_y} \right),$$

где  $R_y$  – сопротивление в цепи обмотки управления;

$C_y$  – емкость конденсатора времязадающей цепи.

Можно принять  $U_y = 2,3U_{\delta y}$ , тогда частота выходного напряжения переменного тока

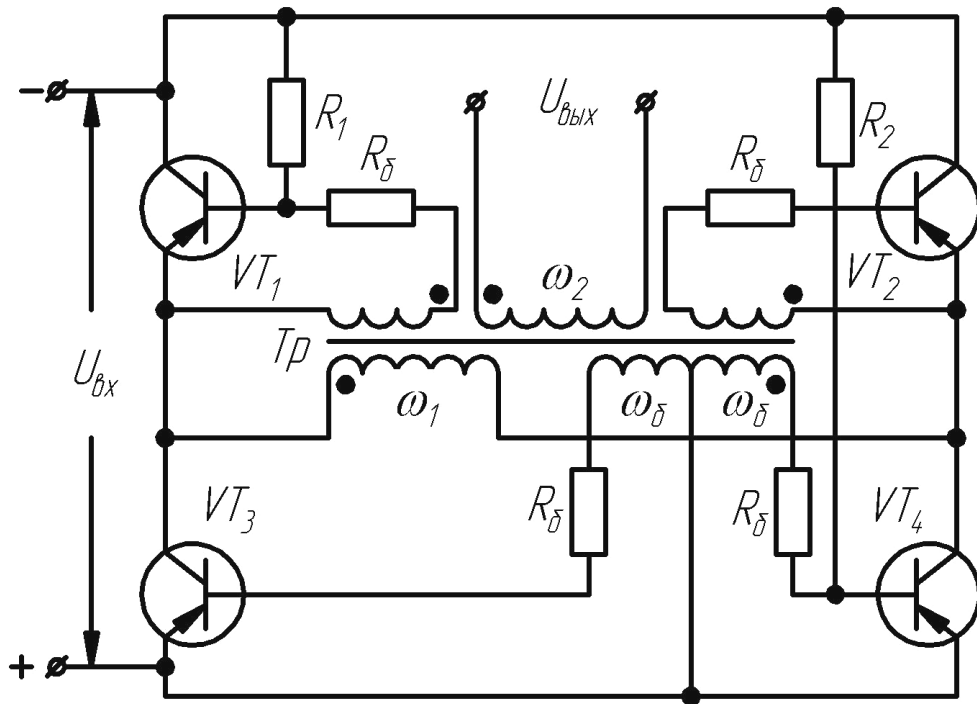
$$f = \frac{1}{2R_y C_y}. \quad (1.1)$$

Схема рис. 1.2 позволяет регулировать частоту выходного напряжения в широких пределах с помощью изменения сопротивления  $R_y$ . В результате регулирования амплитуда импульсов выходного напряжения остается постоянной, а частота выходного напряжения незначительно зависит от изменения напряжения питания (т.е. изменение на  $\pm 20\%$  напряжения питания вызывает изменение выходного напряжения не более  $1\%$  в диапазоне от 800 Гц до 1.5 кГц).

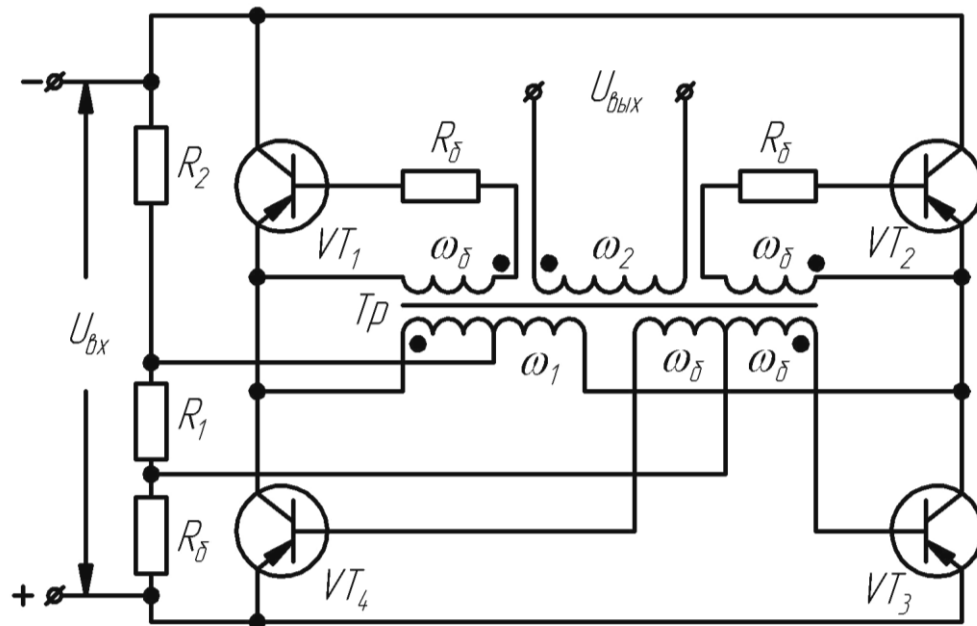
Схемы, в которых трансформатор ПН выполнен с отводом от середины коллекторной обмотки, имеют удвоенное напряжение источника питания на коллекторе транзистора (не учитывая коммутационных перенапряжений). Поэтому они применяются при низких напряжениях источника питания ( $U_{\text{вх}} \leq 25\text{--}30\text{ В}$ ).

Преимуществом мостовых автогенераторов (рис. 1.3) является возможность работать от источника более высокого напряжения в связи с тем, что в них напряжение между эмиттером и коллектором запертого транзистора ниже напряжения источника питания. На рис. 1.3 видно, что транзисторы  $VT_1 - VT_4$  образуют мост. В одной его диагонали включен источник питания с напряжением  $U_{\text{вх}}$ , а к другой подключена первичная обмотка  $\omega_1$  трансформатора преобразователя. Обмотка обратной связи подключена к базовым выводам транзисторов через дополнительные сопротивления  $R_{\delta}$ .

В момент подачи питающего напряжения сопротивление  $R_1$  в схеме рис. 1.3, а служит для обеспечения надежного запуска автогенератора. В схеме на рис. 1.3, б для этой цели подключен делитель напряжения  $R_1 - R_2 - R_6$ , а базовые обмотки транзисторов  $VT_3$  и  $VT_4$  объединены и имеют отвод от средней точки.

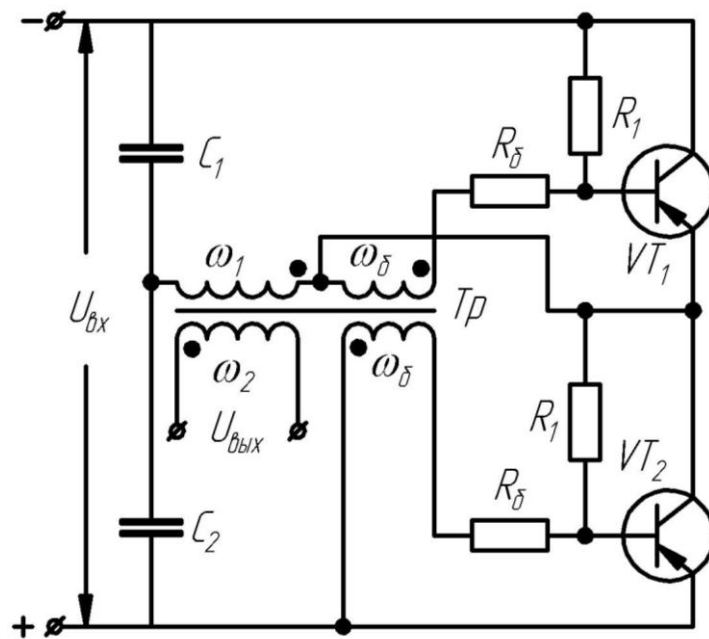


а)

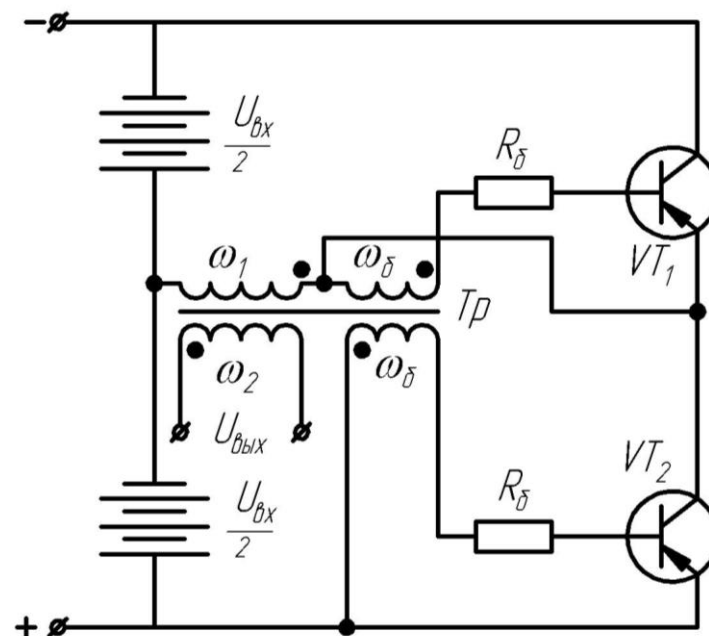


б)

Рис. 1.3. Мостовые автогенераторы



а)



б)

Рис. 1.4. Схемы полумостовых преобразователей напряжения с самовозбуждением

В связи с возможностью работать на напряжениях выше 30 В мостовые схемы являются перспективными при преобразовании средних и больших мощностей. Основным недостатком мостовых схем по сравнению со схемами на рис. 1.1 и 1.2 является большое количество транзисторов. Увеличение числа транзисторов сказывается



на увеличении потребляемой преобразователем мощности. Поэтому для решения некоторых технических задач применяются полумостовые преобразователи напряжения. Они реализуются на базе мостовой схемы заменой двух транзисторов смежных плеч моста емкостным делителем (рис. 1.4, а). Емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  выбираются по величине допустимого постоянного напряжения и допустимой переменной составляющей. В свою очередь, этим ограничивается преобразуемая мощность.

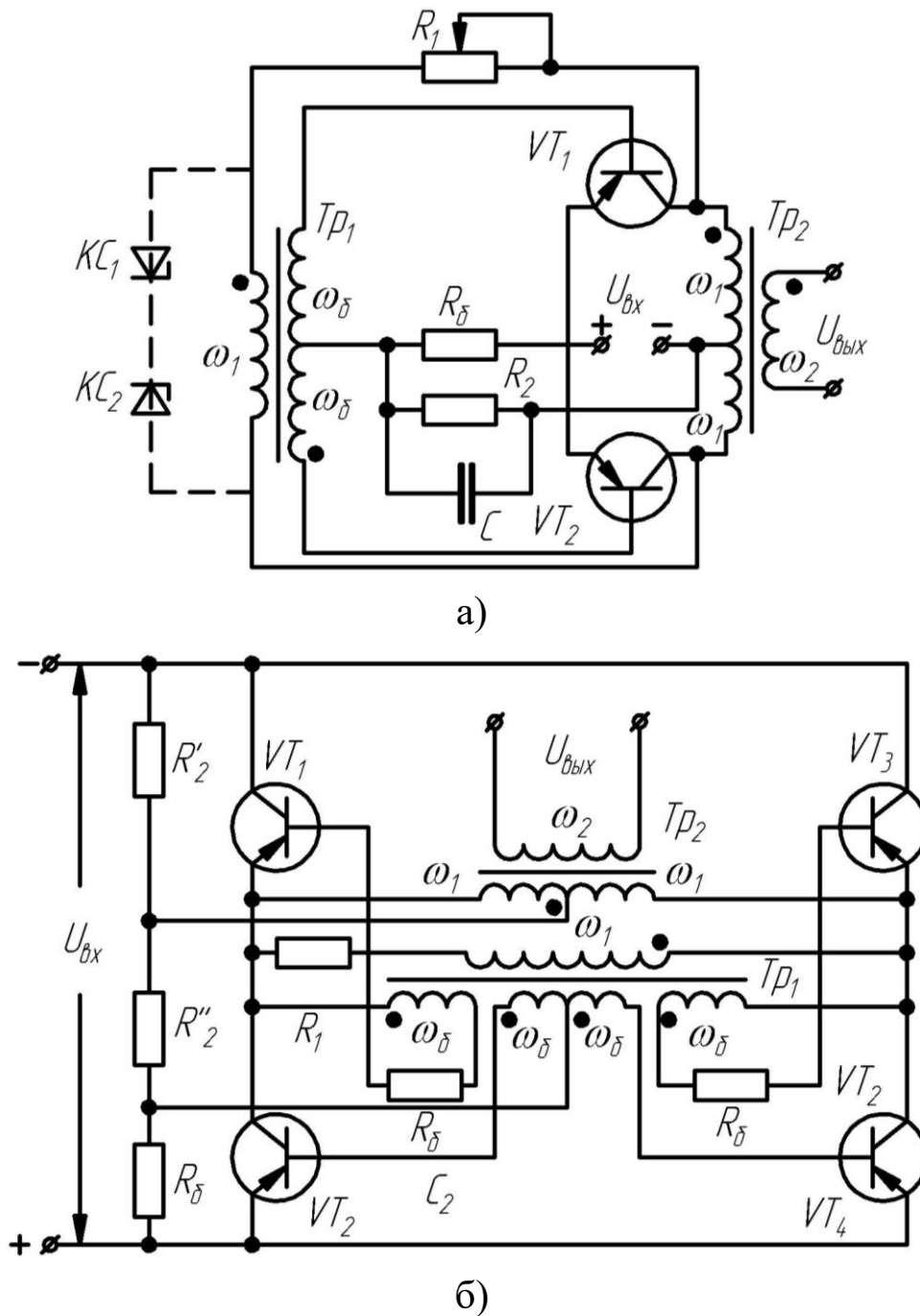


Рис. 1.5. Схемы автогенераторов с переключающим трансформатором

Емкость конденсаторов делителя определяется по формуле

$$C \geq \frac{I_{\text{вх}} \cdot T}{2U_{\text{вх}}}.$$

На рис. 1.4, б показана полумостовая схема без емкостного делителя. В таком случае необходимо осуществить питание от источника постоянного тока с отводом от середины.

На рис. 1.5 показана схема преобразователя с переключающим трансформатором, который работает без захода в режим насыщения материала магнитопровода. Переключение транзисторов в нем осуществляется по уровню насыщения маломощного трансформатора  $Tr_1$ .

Выходное напряжение преобразователя имеет ту же форму, что и в предыдущих схемах, а частота определяется по уравнению (1.1), в котором вместо  $U_{\text{вт}}$  необходимо поставить  $U_1$  – напряжение на первичной обмотке переключающего трансформатора.

Изменяя величину сопротивления  $R_1$  в цепи первичной обмотки маломощного переключающего трансформатора, можно регулировать частоту выходного напряжения в небольшом диапазоне.

Стабилитроны  $KC_1$  и  $KC_2$  на схеме рис. 1.5, а, подключенные параллельно обмотке трансформатора стабилизируют частоту выходного напряжения преобразователя. В результате потери мощности в транзисторах снижаются. Подобные преобразователи могут применяться при более высоких частотах преобразования и на мощности более 200 Вт в отличие от преобразователей с насыщенным выходным трансформатором.

### *Усилители мощности*

Усилители мощности (рис. 1.6) отличаются тем, что базовые обмотки управления расположены на магнитопроводе трансформатора  $Tr_1$  маломощного задающего генератора [1].

Наибольшее применение в источниках питания получили схемы усилителей мощности с отводом от середины первичной обмотки выходного трансформатора (рис. 1.6, а) и мостовая схема (рис. 1.6, б)

[1]. Полумостовые схемы используются значительно реже, так как они требуют применения либо источника питания с отводом от середины (рис. 1.6, в), либо установки двух конденсаторов значительной емкости (рис. 1.6, г) [1].

Усилители мощности (см. рис. 1.6, а) применяются при питании от напряжения  $U_{\text{вх}} \leq 25\text{--}30\text{ В}$ , а преобразователи (см. рис. 1.6, б) – при питании напряжением свыше 30 В. В усилителе мощности выходной трансформатор работает без захода в режим насыщения материала магнитопровода. Из-за несимметрии плеч схемы происходит подмагничивание магнитопровода постоянной составляющей результирующего тока первичной обмотки [1].

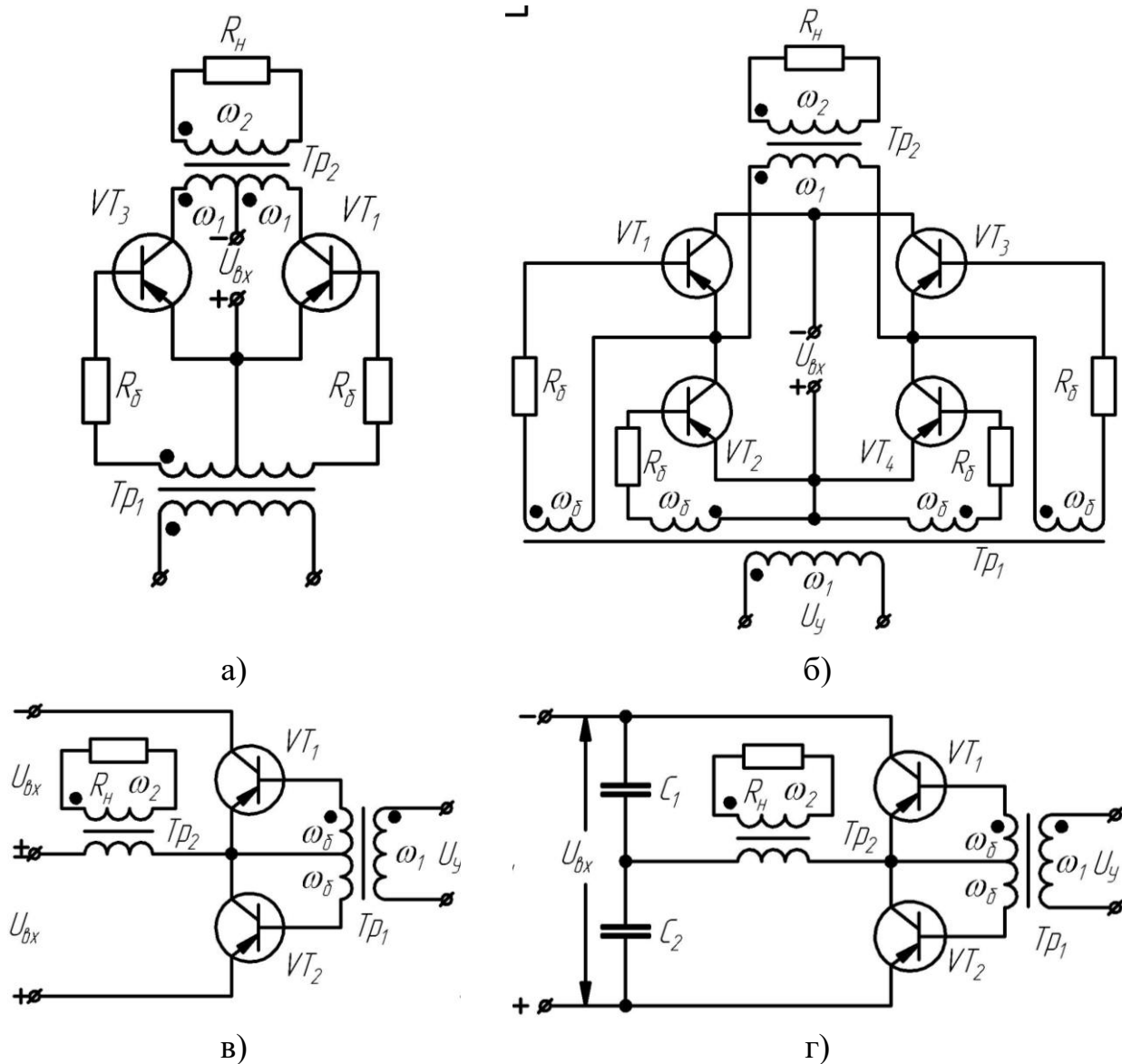


Рис. 1.6. Схемы усилителей мощности

Из-за такого подмагничивания происходит искажение петли гистерезиса и магнитопровод входит в режим насыщения. Искажение образуется во время переключения транзисторов вследствие применения материала трансформатора с прямоугольной петлей гистерезиса. Указанное явление сопровождается всплесками тока и существенным различием тепловых режимов работы смежных плеч. Применение материалов при изготовлении сердечников трансформаторов с непрямоугольной петлей гистерезиса (например сталь ХВП) и выполнение их разрезными позволит устранить указанное явление.

## **1.2. Особенности проектирования преобразователей напряжения и основные расчетные соотношения**

Основными этапами разработки преобразователей напряжения является:

- 1) выбор рациональной схемы преобразователя в соответствии с заданными условиями работы,
- 2) выбор типа и подбор по параметрам транзисторов,
- 3) расчет режимов работы транзисторов,
- 4) расчет и проектирование трансформатора – основной элемент преобразователя.

Как уже отмечалось выше, выбор транзисторов осуществляется по следующим параметрам: току коллектора, напряжению коллектор – эмиттер, коэффициенту усиления и граничной частоте.

Расчетные формулы статического режима транзисторов схожи для автогенераторов и усилителей мощности.

Ток коллектора открытого транзистора зависит от выходной мощности преобразователя и напряжения питания и определяется следующими соотношениями [1]:

для преобразователей со средней точкой

$$I_{\text{кс}} = \frac{I_2 U_2}{\gamma_{\text{in}} (U_{\text{вх}} - U_{\text{кн}})}; \quad (1.2, a)$$

для мостовой схемы

$$I_{\text{КС}} = \frac{I_2 U_2}{\gamma_{\text{in}} (U_{\text{вх}} - 2U_{\text{кн}})}; \quad (1.2, б)$$

для полумостовой схемы

$$I_{\text{КС}} = \frac{2 \cdot I_2 U_2}{\gamma_{\text{in}} (U_{\text{вх}} - 2U_{\text{кн}})}. \quad (1.2, в)$$

Максимальная величина силы тока коллектора в момент включения зависит от параметров схемы, режима работы транзисторов и инерционных свойств.

Для преобразователей с самовозбуждением и насыщающимся выходным трансформатором амплитудное значение силы тока коллектора определяется по формуле

$$I_{\text{к. макс}} = I_{\text{КС}} \cdot K_1 \cdot b_{\text{мин}} \frac{B_{\text{ст. макс}}}{B_{\text{ст. мин}}}, \quad (1.3)$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий влияние инерционных свойств транзистора и величины коллекторного напряжения на амплитудное значение тока коллектора.

Для мощных транзисторов (типа ГТ701А, КТ837 или зарубежных аналогов 2NУ74, 2N2659, 2N5891, AD130 и др.), имеющих толщину базовой области порядка 100 мкм [5],

$$K_1 \approx \frac{1}{(1 - 0,03\sqrt{U_{\text{вх}}})^2}.$$

Минимальное значение коэффициента насыщения  $b_{\text{мин}}$  определяется формулой

$$b_{\text{мин}} = \frac{I_{\text{б}} \cdot B_{\text{ст. мин}}}{I_{\text{КС}}}$$

и обычно выбирается равным  $b_{\text{мин}} = 1,3-1,5$ .

В уравнении (1.3) амплитуда тока коллектора в автогенераторах зависит от коэффициента усиления транзисторов по току.

В ПН с самовозбуждением для эффективного работы рекомендуется применять транзисторы с минимально возможным разбросом по  $B_{\text{ст}}$ .

Ток коллектора транзистора в усилителе мощности определяется по следующей формуле:

$$I_{к.макс} = K_2 I_{кс}, \quad (1.4)$$

где  $K_2$  – коэффициент, учитывает взаимное влияние транзисторов усилителя мощности друг на друга и принимается  $K_2 \approx 1,1–1,3$ .

Сравнивая формулы (1.3) и (1.4), можно сказать, что сила тока коллектора в автогенераторе может значительно превышать силу тока коллектора в усилителе мощности. В связи с тем, что соотношение  $V_{ст.макс} / V_{ст.мин}$  для различных типов транзисторов может колебаться в пределах  $2 \div 7$ , транзисторы в автогенераторах работают неэффективно по сравнению с усилителями мощности. Поэтому для преобразования мощностей свыше 100 Вт рекомендуется применять усилители мощности.

Параллельное включение транзисторов применяется в случаях, когда сила тока коллектора превышает предельно допустимое значение. Количество транзисторов для параллельного включения (работы) определяется по формуле

$$N = \frac{I_{к.макс} \cdot K_3}{I_{кд}},$$

где  $K_3 \approx 1,5–2$  – коэффициент запаса.

Для равномерного распределения тока между параллельно включенными транзисторами в эмиттерные или базовые цепи их могут включаться уравнивающие сопротивления. Эти транзисторы рекомендуется располагать на общем радиаторе с целью выравнивания их теплового режима [1].

В коллекторные или эмиттерные цепи параллельно включенным транзисторам включают быстродействующие предохранители, что повышает надежность работы ПН. В результате при выходе из строя транзисторов в разных плечах он остается в рабочем состоянии. Запас по току коллектора в таком случае обеспечивает надежную работу оставшихся исправных транзисторов ПН.

Величина напряжения во время коммутационных процессов на закрытом транзисторе не должна превышать предельно допустимого значения напряжения коллектор – эмиттер транзистора согласно тех-

ническим условиям. Величина перенапряжений зависит от индуктивности рассеяния первичной обмотки трансформатора и скорости изменения тока коллектора. Для уменьшения индуктивности параллельно выводам коллектора и эмиттера включаются диоды или стабилитроны (см. рис. 1.5, а).

Напряжение эмиттер – коллектор транзистора преобразователя рассчитывается по максимальному напряжению питания и принимается примерно равным [1]:

для преобразователей с выводом средней точки первичной обмотки выходного трансформатора

$$U_{\text{эк}} \approx 2,4U_{\text{вх.макс}}; \quad (1.5, а)$$

для мостового или полумостового преобразователя

$$U_{\text{эк}} \gg 1,2U_{\text{вх.макс}}. \quad (1.5, б)$$

Если рассчитанное значение напряжения на закрытом транзисторе превышает предельное допустимое значение, то транзисторы или преобразователи подключаются последовательно. В таком случае является обязательным одновременная подача напряжения возбуждения на транзисторы, что достигается расположением обмоток управления на одном трансформаторе.

Равномерное распределение напряжения на запертых транзисторах достигается включением параллельно им шунтирующих сопротивлений. Ток через них должен быть в 2–3 раза больше тока утечки коллектора при максимальной температуре корпуса транзистора.

Для защиты транзисторов от пробоя в результате динамических процессов переключения включают стабилитроны параллельно эмиттеру и коллектору или коллектору и базе.

При проектировании ПН стараются улучшить массогабаритные показатели. Это возможно за счет увеличения частоты переключения транзисторов. В результате повышения частоты переключения транзисторов увеличиваются потери в них и потребляемая мощность, вследствие чего наблюдается снижение КПД преобразователя и увеличение габаритов и веса радиаторов охлаждения. Поэтому рекомен-

дуются использовать высокочастотные транзисторы с меньшим сопротивлением насыщения.

На практике широкое распространение нашли мощные транзисторы П210, П214–П217 с частотами переключения не выше 1–3 кГц. Маломощные П26, 1Т403 применяются при частотах не выше 3–5 кГц. Преобразователи высоких частот выполняются на высокочастотных дрейфовых транзисторах типа П605, 2Т803 и др.

Указанные транзисторы применялись в военно-промышленном комплексе, поэтому к свойствам и характеристикам этих транзисторов предъявлялись особые требования. В настоящее время они не производятся, в связи с чем рекомендуется применять современные транзисторы, наиболее схожие по свойствам с транзисторами типа ГТ701А, КТ837 или зарубежными аналогами 2NУ74, 2N2659, 2N5891, AD130 и др.

Мощность, рассеиваемая транзистором в преобразователе напряжения, состоит из мощности потерь в режимах отсечки  $P_{отс}$  насыщения  $P_{нас}$  и в активной области работы транзистора  $P_{дин}$  [1]:

$$P_k = P_{отс} + P_{нас} + P_{дин}. \quad (1.6, a)$$

Потери мощности в режиме отсечки

$$P_{отс} = \frac{1}{2} \cdot I_{к0} \cdot U_{кэ}. \quad (1.6, б)$$

Потери мощности в режиме насыщения транзистора определяются по формуле

$$P_{нас} = \frac{1}{2} \cdot I_{кс} \cdot U_{кн}. \quad (1.6, в)$$

Динамические потери мощности в режиме переключения транзисторов зависят от частотных свойств используемых транзисторов и определяются из выражения

$$P_{дин} = U_{вх.макс} I_{кс} \cdot \tau_\beta \cdot f \cdot \gamma, \quad (1.6, г)$$

где  $\tau_\beta$  – время жизни неосновных носителей в базовой области транзистора;

$\gamma$  – коэффициент, зависящий от схемы преобразователя и режима работы транзисторов.



Величина  $\tau_\beta$  может быть вычислена по известной граничной частоте  $f_\beta$  в соответствии с формулой

$$\tau_\beta = \frac{1}{2\pi \cdot f_\beta}. \quad (1.7)$$

Для схемы автогенератора (см. рис. 1.1, а) значение  $\gamma$  определяется формулой [1]

$$\gamma \approx 1 + \frac{0,2}{K_1}, \quad (1.7, а)$$

а для схемы на рис. 1.1, б – формулой

$$\gamma \approx \frac{\pi}{b} \cdot \frac{0,83K_1 - 0,25}{K_1^2}. \quad (1.7, б)$$

Для УМ величина  $\gamma$  зависит от коэффициента насыщения (рис. 1.7) [1,4]

$$b = \frac{I_\phi \cdot B_{CT}}{I_{КС}}. \quad (1.7, в)$$

На уменьшение динамических потерь мощности в транзисторах ПН влияет включение конденсаторов  $C_d$  параллельно базовым сопротивлениям  $R_5$ .

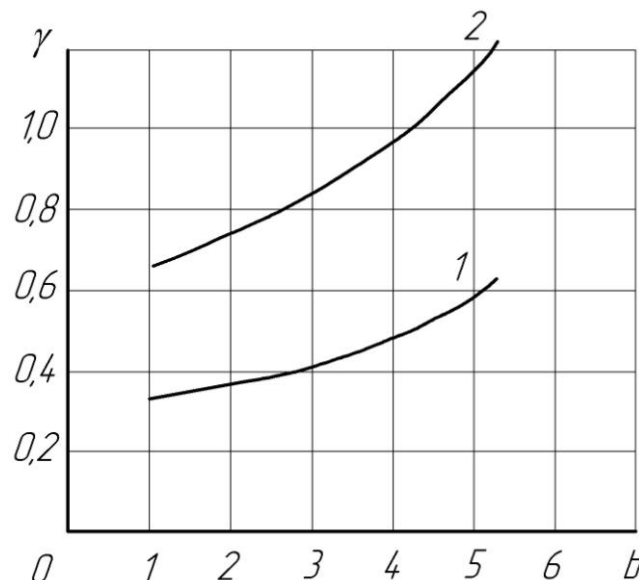


Рис. 1.7. Зависимость величины коэффициента  $\gamma$ , характеризующего величину динамических потерь в транзисторах усилителя мощности, от коэффициента насыщения транзистора:

1 – для мостового усилителя мощности;

2 – для усилителя мощности с выводом от середины первичной обмотки

Величина емкости конденсатора для симметричного преобразователя (см. рис. 1.1, *a*) находится по формуле

$$C_o \leq \frac{T}{2R_o}.$$

Коэффициент  $b$  характеризует избыточную величину тока базы, при которой достигается полное насыщение транзистора.

Минимальное значение  $b$  определяется исходя из надежного насыщения транзисторов при наихудших условиях эксплуатации для преобразователей, работающих в широком диапазоне изменения напряжения питания и температуры окружающей среды. Наихудшими условиями эксплуатации являются: минимальное напряжение питания, максимальная нагрузка, минимальная температура окружающей среды при разбросе параметров транзисторов ПН.

Минимальная величина тока базы, при которой обеспечивается надежный режим насыщения транзисторов, определяется как

$$I_{б.мин} = \frac{I_{кс} \cdot b_{мин}}{B_{ст.мин}}.$$

При расчете динамических потерь мощности в транзисторах преобразователя необходимо учитывать максимальное значение коэффициента насыщения  $b_{макс}$ , которое может превосходить  $b_{мин}$  в несколько раз [1]:

$$b_{макс} = \frac{I_{б.макс} \cdot B_{ст.макс}}{I_{кс.макс}}.$$

При проектировании и расчете ПН необходимо выбирать значения параметров транзисторов в соответствии с полученными расчетными значениями тока коллектора и напряжения на коллекторе по справочным данным.

К трансформатору преобразователя предъявляются следующие основные требования:

- 1) трансформатор должен работать либо в зоне насыщения материала сердечника, либо нет. Зависит от типа ПН;
- 2) должен иметь малые потери в магнитопроводах и обмотках;

- 3) должен обладать небольшой величиной тока холостого хода;
- 4) должен характеризоваться малой индуктивностью рассеяния.

Указанные требования достигаются выбором марки стали и толщины ленты магнитопровода сердечника в соответствии с рабочей частотой. Оптимальные конструкция трансформатора и размещение обмоток позволяют уменьшить потери и улучшить его охлаждение.

Для выбора магнитного материала сердечника можно воспользоваться специальными справочными таблицами и графиками, учитывающими свойства материалов, определяемые петлей гистерезиса (рис. 1.8) и статическими характеристиками на постоянном токе. В зависимости от формы петли гистерезиса (см. рис. 1.8) магнитные материалы можно разделить на три основные группы.

К первой группе относятся магнитные материалы с высокой прямоугольностью петли гистерезиса (кривая 1), для которых  $B_1/B_s = 0,85-0,9$ , это пермаллоевые сплавы 34НКМП, 79НМ, 50НП и магний-марганцевые ферриты с такими же характеристиками.

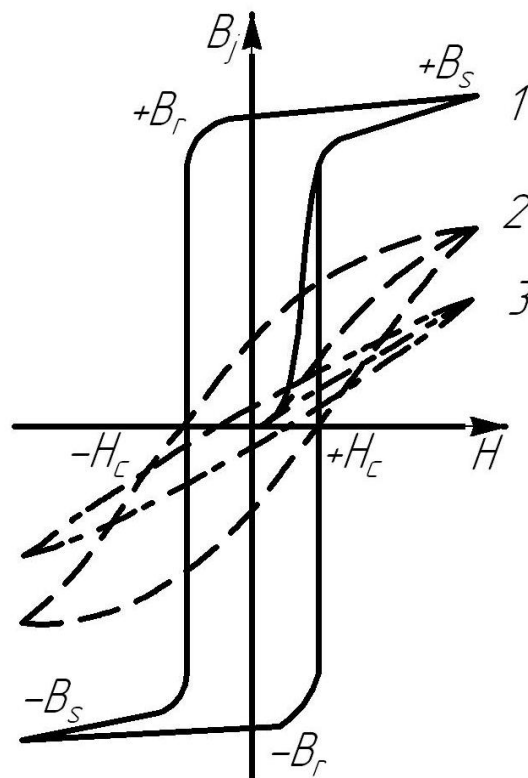


Рис. 1.8. Форма петли гистерезиса ферромагнитных материалов

Магнитные материалы этой группы применяются для изготовления тороидальных магнитопроводов трансформаторов автогенераторов и переключающих трансформаторов в двухтрансформаторных схемах. Они работают с заходом в область насыщения материала магнитопровода.

Вторая группа магнитных материалов характеризуется сравнительно большой магнитной проницаемостью, но имеет меньшую прямоугольность петли гистерезиса (кривая 2). К ней относятся электротехнические стали Э306-Э380 (ХВП), которые применяются в силовых трансформаторах усилителей мощности и автогенераторов при низких частотах преобразования.

К третьей группе относятся магнитные материалы с пологой петлей гистерезиса и линейной кривой намагничивания (кривая 3). Характерным для них является малое значение магнитной проницаемости, которая почти не зависит от величины индукции. Такие магнитные материалы находят применение в резонансных LC-контурах ПН [1].

На практике магнитопровод трансформатора ПН работает в режиме перемагничивания напряжением прямоугольной формы повышенной частоты. Поэтому при выборе магнитного материала необходимо учитывать частотные характеристики, а именно удельные потери.

Частотные характеристики магнитных материалов, значения напряженности магнитного поля в диапазоне частот, наиболее часто применяемых в трансформаторах ПН, приведены в табл. 1.1. Используя данные таблицы, можно определить ток холостого хода трансформатора по формуле

$$I_{xx} = \frac{H \cdot I_{cp}}{\omega_1},$$

где  $I_{cp}$  – средняя длина магнитной силовой линии.

Наилучшими будут магнитные материалы с минимальными удельными потерями и максимальной проницаемостью на данной частоте.

Таблица 1.1

**Частотные характеристики материалов при питании напряжением****прямоугольной формы  $P_{уд}\left(\frac{6m}{\kappa z}\right)$  и  $H\left(\frac{a}{m}\right)$** 

$f, \text{кГц}$	$B_T, \text{Тл}$	Марка материала и толщина ленты, мм				
		Э350	33НК	34НКМП	34НК	40НКМ
		0,1	0,05	0,1	0,05	0,1
1,0	0,5	7/30	1,8/9,5	2,3/12	2,7/15	5,8/24
	0,6	11/34	2,9/12	3,6/13	3,9/16	8/25
	1,0	24,6/47	7,2	7,2/17	7/17	15,3/2
	1,2	35/57	10	10/19	9,1/19	19/33
	1,4	50/80	—	13/25	11,5/2	23/58
1,6	0,5	14/35	—	4,5	4,8	11,3
	0,6	23/41	—	7	7	16
	1,0	48/55	—	14	13,3	31
	1,2	68/65	—	19	17,3	39
	1,4	98/90	—	25	22	47
2,4	0,5	25,5/40	5	7,4/16	8,5/20	20,5/3
	0,6	40/47	8/14	11,5/19	12,5/2	29/36
	5	86/64	19	26/25	1	54/44
	1,2	118/77	26	35/30	30/24	69/56
	1,4	165/99	—	45/42	37/30	83/105
3,5	0,5	43/48	9	14/21	15/23	38/42
	0,6	70/56	15/15	21/23	22/24	54/45
	1,0	150/75	35	43/32	42/26	93/56
	1,2	200/89	50	60/40	54/28	17/67
	1,4	280/110	—	75/56	68/48	43/120

**Частотные характеристики материалов при питании напряжением****прямоугольной формы (продолжение)  $P_{уд}\left(\frac{вт}{кз}\right)$  и  $H\left(\frac{а}{т}\right)$** 

<b>Марка материала и толщина ленты, мм</b>						
40НК	50НП	50НП	68Н	79НМ	79НМ	79Н
0,05	0,05	0,02	0,05	0,1	0,05	0,02
3,1/13 4,5/15 8,5/20 11/26 14	6/28 8,4/29 15/30 19/32 23/37	3,4/14 4,4/15 — — —	2,5/1 3,6/1 7,1/1 — — —	1,2/5,8 2,1/8 — — —	0,9/4 1,4/9 — — — —	1/7 1,4 — — — —
6,1/15 9 16/22 20,5/2 25,5	— — — —	— — — —	5/14 7,5/1 14,7/22 —	2,5/8 4,5/11 — — —	1,6/5 2,7/9 — — — —	1,6/8 2,6 — — — —
10/17 14,5/2 28/25 36,5/3 45	17/32 24/33 43/34 54/37 65/45	9,6/17 13,5/1 — — —	9,5/1 14/18 28/25 — —	5,2/10 9,4/13 — — —	2,9/6 4,8/10 — — — —	2,7/8 4,3 — — — —
16/20 24/23 45/28 58/35 72	27/35 37/36 70/37 89/41 107/5	— — — — —	16/17 23,5/20 47/29 — —	11/14 20/18 — — —	5,2/7 8,6/11 — — — —	4,4/9 7 — — — —

$f$ , кГц	ВГ, ТЛ	Марка материала и толщина ленты, мм				
		Э350	33НКМС	34НКМП	34НКМП	40НКМП
		0,1	0,05	0,1	0,05	0,1
5,0	0,5	75/56	15	25/24	23/26	67/475
	0,65	120/68	24/18	38/28	33/27,5	93/52
	1,0	260/96	57	79/40	66/29	160/68
	1,2	355/113	80	105/50	86/33	202/89
	1,4	480/135	—	135/85	107/53	243/165
7,5	0,5	133/70	26	46/28	40/30	100/56
	0,65	215/85	43/21	65/34	58/33	140/62
	1,0	460	103	133/48	118/36	255/84
	1,2	620	143	180/60	152/41	320/103
	1,4	820	—	230/100	190/64	390/190
10	0,5	205/83	42	68/34	61/33	145/63
	0,65	430/98	68/23	103/39	90/36	200/71
	1,0	650	160	220/54	173/44	400/94
	1,2	880	225	295/66,5	225/54	500/125
	1,4	—	—	380/103	280/74	600/250
15	0,5	390/100	74	132/42	113/39	260/78
	0,65	610/117	120/25	205/48	165/42	360/88
	1,0	—	280	400/66	220/50	690/124
	1,2	—	400	550/76	425/59	860/155
	1,4	—	—	700/110	540/86	—
20	0,5	600/117	147/33	212/48	155/43	490/85
	0,65	135	240	330/55	230/48	540/98
	1,0	—	580	650/75	460/581	1000/137
	1,2	—	800	900/86	600/66	—

Марка материала и толщина ленты, мм						
40НКМП	50НП	60НП	68НМП	79НМ	79НМ	79НМ
0,05	0,05	0,02	0,05	0,1	0,05	0,02
29/23,5	42/36,5	21,5/21	29/23	20/18	10,5/8	6,6/9
42/26	59/38	30/22	42/25	36/27	16/14	11
79/31	120/41	—	84/38	—	—	—
100/39	150/44	—	—	—	—	—
125	180/58	—	—	—	—	—
50/27	67/40	41/25	50/28	41/27	20/10	12/10
72/29	94/41	58/27	73/32	74/40	33/18	20
134/35	205/43	—	147/55	—	—	—
173/44	260/48	—	—	—	—	—
213	310/60	—	—	—	—	—
84/30	100/42,5	56/29	86/35	90/34	32/13	18/12
120/32	140/44	78/32	130/40	160/53	51/20	38
225/37	287/50	—	260/69	—	—	—
200/46	260/56	—	—	—	—	—
200/37	142/45	—	152/39	175/50	63/17	35/16
375/41	195/46	—	235/47	320/75	100/25	60
485/54	470/54	—	470/84	—	—	—
600/85	600/62	—	—	—	—	—
240	720/100	—	—	—	—	—
350/48	190/48	—	235/50	305/68	100/20	53/22
630/54	260/52	—	363/63	500/10	150/30	80
800/69	720/63	—	720/115	—	—	—
—	930/78	—	—	—	—	—
Примечания:						
Для каждого материала при данной частоте $f$ и индукции $B_T$ в таблице приведены над чертой значения удельных потерь, а под чертой – напряженность магнитного поля. Например, для материала 34НКМП толщиной 0,1 мм при частоте $f = 2,4$ кГц и индукции $B=0,5$ Тл находим из таблицы $P_{уд}=7,4$ Вт/кг, а $H=16$ а/м.						

Как видно из табл. 1.1, для ряда магнитных материалов существует оптимальная толщина ленты, при которой удельные потери ока-



зываются минимальными. Например, для тороидальных трансформаторов из пермаллоя 79НМ минимальные потери на частотах до 5 кГц получаются при толщине ленты 0,05 мм. Это объясняется тем, что с уменьшением толщины магнитного материала наряду с уменьшением потерь на вихревые токи растут потери на гистерезис. Поэтому можно выбрать некоторые оптимальные толщины магнитных материалов, указанные в табл. 1.2.

Таблица 1.2

**Рекомендуемые толщины (мм) магнитных материалов  
для трансформаторов преобразователей на повышенные частоты**

Материал	Частота $f$ , кГц			
	1–2	2–6	6–10	10–20
34НКМП	0,1	0,05	0,05–0,02	0,02
40НКМП	0,1–0,05	0,05	0,05–0,02	—
50НП	0,1	0,05–0,02	0,02	—
68НМП	0,1–0,05	0,05	0,02	—
79НМ	0,1	0,1–0,05	0,05	0,02
33НКМС	0,1	0,05	0,05–0,02	0,02
Э350	0,1–0,05	—	—	—

Размеры магнитопровода трансформатора определяются по формуле

$$Q_{cm} \cdot Q_0 = \frac{P_{gab} \cdot 10^2}{2f \cdot B_m \cdot \zeta \cdot k_c \cdot k_m \cdot \gamma_{TP}}. \quad (1.8)$$

Габаритная мощность трансформатора, входящая в формулу (1.8), равна, по определению, полусумме габаритных мощностей первичных и вторичных обмоток трансформатора. Если выходная обмотка преобразователя нагружена на активное сопротивление или мостовой выпрямитель, то в соответствии с [1]

$$P_{gab} = 1,3 \cdot U_2 \cdot I_2. \quad (1.9, a)$$

Если нагрузкой ПН служит двухполупериодный выпрямитель со средней точкой, то

$$P_{gab} = 2,1 \cdot U_2 \cdot I_2. \quad (1.9, б)$$

Для мостовых преобразователей соответственно

$$P_{\text{заб}} = 1,1 \cdot U_2 \cdot I_2; \quad (1.10)$$

$$P_{\text{заб}} = 1,3 \cdot U_2 \cdot I_2, \quad (1.11)$$

где  $U_2$  – напряжение вторичной обмотки;

$I_2$  – действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора.

На характеристики ПН оказывает влияние конструкция трансформатора. При мощности преобразования до 1 кВт наиболее эффективными являются трансформаторы, выполненные на тороидальных магнитопроводах [1]. Небольшие габаритные размеры и низкие потери достигаются применением тонких ленточных высококачественных магнитных материалов, повышением плотности тока в обмотках и хорошим их охлаждением. Намотка коллекторной (расположенной первой на магнитопроводе) и базовой обмоток параллельными проводами и равномерное их размещение по периметру магнитопровода дают возможность снизить индуктивность рассеивания.

Основные параметры тороидальных сердечников нормализованного ряда приведены в табл. 1.3.

Недостатком тороидальных трансформаторов является плохое охлаждение сердечника и трудность намотки проводом большого сечения. Это ограничивает мощность тороидальных трансформаторов: на частотах 400 Гц – не выше 500 ВА, а на 1000 Гц – до 1 кВА.

Наряду с тороидальными сердечниками возможно также применение витых разрезных сердечников, особенно при достаточно больших мощностях преобразователя напряжения.

**Основные параметры некоторых типов тороидальных сердечников  
нормализованного ряда для трансформаторов**

Тип торои- дального сердечника	Параметры тороидальных сердечников								
	Размеры, мм*				Площадь сечения магнито- провода $Q_{ст}$ , см <sup>2</sup>	Длина средней магнит- ной си- ловой линии, см	Площадь окна $Q_0$ , см <sup>2</sup>	Вес маг- нитопрое- вода, г	Произве- дение сечений $Q_{ст} Q_0$ , см <sup>4</sup>
	$d$	$a$	$b$	$D$					
ОЛ-12/14-3	12	1	3	14	0,03	4,1	1,13	0,96	0,034
ОЛ-14/17-3	14	1,5	3	17	0,045	4,86	1,54	1,71	0,069
ОЛ-16/20-3	16	2	3	20	0,06	5,65	2,0	2,65	0,121
ОЛ-18/23-4	18	2,5	4	23	0,1	6,45	2,55	5,0	0,25
ОЛ-20/25-5	20	2,5	5	25	0,125	7,1	3,14	6,9	0,39
ОЛ-20/25-6,5	20	2,5	6,5	25	0,162	7,1	3,14	9,1	0,51
ОЛ-20/28-5	20	4	5	28	0,2	7,55	3,14	11,6	0,63
ОЛ-22/30-5	22	4	5	30	0,2	8,2	3,82	12,7	0,765
ОЛ-22/30-6,5	22	4	6,5	30	0,26	8,2	3,82	16,5	0,99
ОЛ-25/35-5	25	5	5	35	0,25	9,42	4,9	18,3	1,23
ОЛ-25/35-6,5	25	5	6,5	35	0,325	9,42	4,9	23,8	1,6
ОЛ-25/40-5	25	7,5	5	40	0,375	10,2	4,9	27,6	1,84
ОЛ-25/40-6,5	25	7,5	6,5	40	0,49	10,2	4,9	36	2,4
ОЛ-28/40-8	28	6	8	40	0,48	10,7	6,1	40	2,95
ОЛ-28/40-10	28	6	10	40	0,6	10,7	6,1	50	3,7
ОЛ-32/45-8	32	6,5	8	45	0,52	12,1	8,0	48,8	4,15
ОЛ-32/50-8	32	9	8	50	0,72	12,9	8,0	58,5	5,7
ОЛ-36/56-10	36	10	10	56	1,0	14,4	10,2	112	10,2
ОЛ-40/56-16	40	8	16	56	1,28	15	12,5	150	16

$d$  – внутренний диаметр;

$D$  – наружный диаметр;

$b$  – ширина ленты;

### 1.3. Двухтактные преобразователи напряжения с самовозбуждением

Рассмотрим работу двухтактного ПН (см. рис. 1.1, б). Осциллограммы процессов в данной схеме приведены на рис. 1.9.

При включении источника питания в цепи делителя  $R_1 - R_5$  протекает ток, который создает на сопротивлении  $R_8$  напряжение смещения, приоткрывающее оба транзистора преобразователя.

Из-за разброса параметров транзисторов в момент запуска преобразователя токи коллекторов оказываются различными. Токи первичной обмотки трансформатора наводят во всех обмотках ЭДС. Затем напряжение положительной обратной связи в обмотках возбуждения лавинообразно открывает один из транзисторов и закрывает другой. В результате ток открытого транзистора можно определить по формуле

$$i_k = i_1 = i_2 n_2 + i_6 n_6 + i_m. \quad (1.12)$$

Изменение тока от нуля до значения  $I_k$  соответствует точке  $A$  (рис. 1.9, б), одновременно с этим падение напряжения на транзисторе  $U_{кн}$  незначительно. Индукция в сердечнике трансформатора ПН увеличивается от  $-B_s$  до  $+B_s$  (рис. 1.9, в, г). Перемещение точки на выходной характеристике транзистора (см. рис. 1.9, б) из положения  $A$  в положение  $D$  вызвано уменьшением магнитной проницаемости материала сердечника. В этот момент перестает выполняться условие насыщения транзистора

$$I_{кс} \leq I_6 B_{ст}. \quad (1.13)$$

Увеличение напряжения между эмиттером и коллектором открытого транзистора сопровождается уменьшением напряжения на первичной обмотке трансформатора ПН и на обмотках положительной обратной связи. В результате ток базы уменьшается, а падение напряжения на его коллекторе увеличивается. В связи с указанным ла-

винным процессом рабочая точка перемещается в положение отсечки (точка В на рис. 1.9, б).

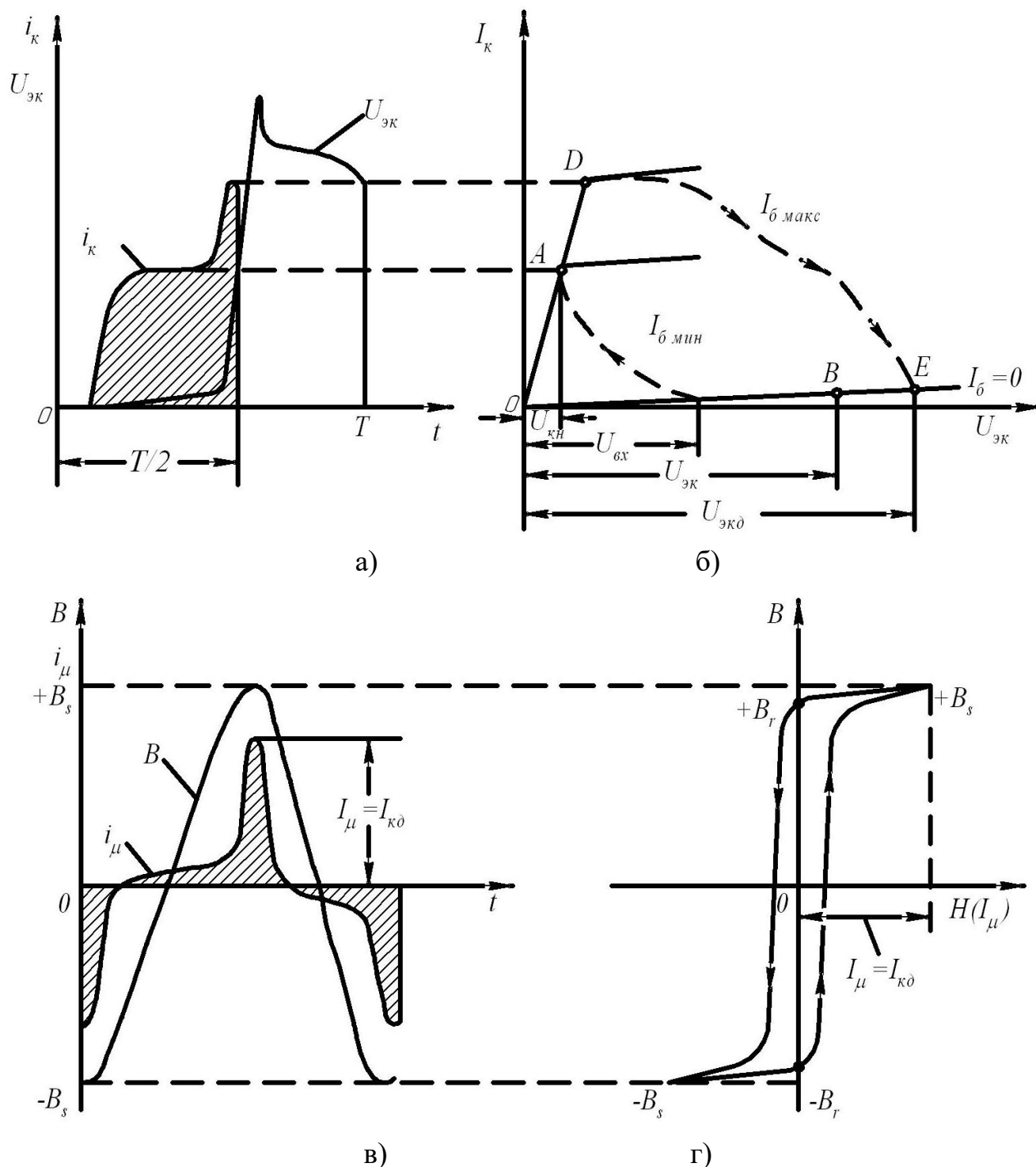


Рис. 1.9. Осциллограммы процессов в автогенераторе

Индукция в сердечнике трансформатора уменьшается от  $-B_s$  до  $+B_r$  (при  $H=0$ ), вызывая изменение полярности напряжений на обмотках трансформатора. В это время на базу закрытого транзистора подается отпирающее напряжение, а на базу открытого транзистора —

запирающее. Это приводит к переключению транзисторов ПН. Индукция в сердечнике трансформатора продолжает изменяться до значения  $-B_s$  (рис. 1.9, з) и процессы в схеме повторяются.

Ток базы открытого транзистора определяется по формуле

$$I_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}y} - U_{\bar{o}н}}{R_{\bar{o}}} \quad (1.14)$$

и обеспечивается соответствующим выбором напряжения базовой обмотки и дополнительного сопротивления в цепи базы транзистора:

$$R_{\bar{o}} = \frac{(U_{\bar{o}y} - U_{\bar{o}н})B_{ст.мин}}{I_{кс} \cdot b_{мин}}. \quad (1.15)$$

При расчете ПН следует задавать напряжение питания, выходную мощность, выходное напряжение, условия работы преобразователя.

Начинать проектирование ПН необходимо с выбора рациональной по условиям и режимам работы схемы. Если в схеме преобразователя на выходе должны присутствовать выпрямитель со сглаживающим фильтром, то сначала необходимо произвести расчет выпрямителя, определить величину напряжения вторичной обмотки трансформатора и действующее значение тока.

По формулам (1.3) и (1.5) рассчитываются величина силы тока коллектора и напряжение на коллекторе. Затем производится выбор транзисторов ПН по справочным данным каталогов [1, 2].

Для обеспечения надежного самовозбуждения автогенераторов в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды и нагрузки необходима достаточно сильная положительная обратная связь. Такая обратная связь в случае германиевых транзисторов обеспечивается выбором напряжения базовой обмотки порядка 2–3 В. При этом величина дополнительного сопротивления в цепи базы транзистора может быть рассчитана в соответствии с формулой (1.15) [1].

Иногда в делителе напряжения вместо сопротивления  $R_{\bar{o}}$  включается полупроводниковый диод в прямом направлении. Надежная работа преобразователя зависит от величины напряжения на

базовой обмотке. Оно должно быть для любых условий работы больше напряжения смещения, формируемого сопротивлением  $R_6$  и током делителя  $R_1$ – $R_6$ . В большинстве случаев для преобразователей на германиевых транзисторах напряжение смещения находится в пределах 0,5–1,0 В.

Величина сопротивления  $R_1$  делителя в этом случае может быть определена по формуле

$$R_1 = \frac{R_6(U_{ex} - U_{6н})}{U_{R6}}. \quad (1.16)$$

Для надежного запуска преобразователя при максимальной нагрузке и при пониженной температуре окружающей среды сопротивление  $R_1$  может шунтироваться конденсатором емкостью от единиц до десятков микрофарад [1].

Аналогичным образом рассчитывается делитель напряжения для мостовых схем автогенераторов. На схеме (см. рис. 1.3, б) сопротивление  $R_6$  определяется по формуле (1.15), а остальные сопротивления рассчитываются по следующим формулам:

$$R_2 + R_3 = R_1 \frac{U_{ex} - U_{R1}}{U_{R6}}, \quad (1.17)$$

$$R_3 = 2R_1 \frac{U_{ex}}{U_{R6} \cdot B_{ст.мин}}. \quad (1.18)$$

Если частота преобразователя не задана, то с учетом сказанного выше можно ориентироваться при выборе на минимизацию веса и размеров ПН. Обычно преобразователи напряжения на мощных транзисторах работают в диапазоне частот от 400–500 до 1500–2500 Гц.

После расчета параметров и выбора транзисторов, а также определения режима их работы необходимо рассчитать трансформатор преобразователя. При расчете трансформатора выбираются материал и тип магнитопровода в соответствии с требованиями, предъявляемыми к проектируемой аппаратуре: КПД, массогабаритными характеристиками, стоимостью массового производства, состоянием технологии и т.п.

Электрический и конструктивный расчет трансформатора преобразователя напряжения производится по методике расчета маломощных силовых трансформаторов с учетом специфики работы его в схеме преобразователя.

После выбора типа и марки материала магнитопровода определяется типоразмер магнитопровода трансформатора (см. табл. 1.3) по величине произведения  $Q_{ст}Q_o$  (1.8).

Число витков первичной (коллекторной) обмотки трансформатора определяется с учетом (1.1) по формуле

$$\omega_1 = \frac{U_1 \cdot 10^1}{4 f B_s Q_{cm} k_c}, \quad (1.19)$$

где  $\omega_1$  – число витков половины первичной обмотки для трансформатора с выводом средней точки коллекторной обмотки или полное число витков первичной обмотки в случае мостовых или полумостовых преобразователей.

В зависимости от схемы преобразователя напряжение первичной обмотки трансформатора определяется по следующим формулам:

для ПН с выводом средней точки первичной обмотки трансформатора

$$U_1 = U_{\text{вх}} - U_{\text{кн}}; \quad (1.20, а)$$

для мостовых преобразователей

$$U_1 = U_{\text{вх}} - 2U_{\text{кн}}; \quad (1.20, б)$$

для полумостовых преобразователей

$$U_1 = 0,5(U_{\text{вх}} - U_{\text{кн}}). \quad (1.20, в)$$

В преобразователях с переключающим трансформатором величина напряжения на первичной обмотке переключающего трансформатора определяется по формулам:

$$\text{для схемы на рис. 1.5, а} \quad U_1 = 2(U_{\text{вх}} - U_{\text{кн}}) - U_{R1}; \quad (1.20, з)$$

$$\text{для схемы на рис. 1.5, б} \quad U_1 = U_{\text{вх}} - 2U_{\text{кн}} - U_{R1}. \quad (1.20, д)$$

Здесь  $U_{R1}$  – падение напряжения на сопротивлении  $R_1$ , включенном в цепь первичной обмотки переключающего трансформатора. Если первичная обмотка переключающего трансформатора подключена параллельно первичной обмотке выходного трансформатора преобразователя, как показано на рис. 1.5, а, то принимается обычно



$$U_{R1} = 0,5U_{\text{вх}}. \quad (1.21)$$

Расчет числа витков первичной обмотки выходного (ненасыщающегося) трансформатора в ПН с времязадающей  $RC$ -цепью или выходного трансформатора в преобразователе с переключающим трансформатором производится в соответствии с (1.19) при условии, что вместо  $B_s$  в формулу подставляется значение индукции  $B_m$ :

$$B_m = (0,7 - 0,8)B_s. \quad (1.22)$$

Число витков базовой обмотки определяется по формуле

$$\omega_o = \omega_1 \frac{U_{\text{вы}}}{U_1}. \quad (1.23)$$

Величина  $U_1$  рассчитывается по формулам (1.20) с учетом минимального напряжения питания  $U_{\text{вх.мин}}$ .

Число витков выходной обмотки

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{U_2}{U_1}. \quad (1.24)$$

Выбор сечения проводов обмоток трансформатора ПН производится согласно правилам устройства электроустановок и справочным таблицам по действующему значению токов соответствующих обмоток:

коллекторной

$$I_{\text{кэф}} = \frac{I_{\text{кс}}}{\sqrt{2}} \quad (1.25)$$

(для мостовых и полумостовых схем  $I_{\text{кэф}} = I_{\text{кс}}$ );

базовой

$$I_{\text{кбэф}} = \frac{I_{\text{б}}}{\sqrt{2}} = \frac{I_{\text{кс}} \cdot b}{\sqrt{2}B_{\text{ст.мин}}}. \quad (1.26)$$

Действующее значение тока вторичной обмотки зависит от характера нагрузки. При активной нагрузке преобразователя или при работе на выпрямитель, выполненный по мостовой схеме или схеме удвоения,

$$I_{2\text{эф}} = I_{2\text{макс}}, \quad (1.27, a)$$

а при двухтактном выпрямителе со средней точкой

$$I_{2\text{эф}} = \frac{I_{2\text{макс}}}{\sqrt{2}}. \quad (1.27, б)$$

Диаметры проводов обмоток трансформатора рассчитываются по формуле

$$d_i = 1,13 \sqrt{\frac{I_{i\text{э}}}{\delta}}. \quad (1.28)$$

По результатам электрического расчета ПН определяется тепловой режим работы полупроводникового прибора. Вычислив мощность потерь (1.6) и учтя температуру окружающей среды, условия охлаждения, можно рассчитать требуемую поверхность теплоотводящих радиаторов.

#### 1.4. Расчет полупроводниковых преобразователей напряжения

Исходные данные по вариантам для выполнения расчетов приведены в табл. 1.4. Вариант определяется по порядковому номеру из списка (ведомости) группы.

Таблица 1.4

Варианты исходных данных для расчета ПП напряжения

№ варианта	$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$f, \text{Гц}$
1	4±2	10	0,005	100
2	6±3	20	0,015	200
3	8±2	30	0,03	300
4	10±3	40	0,075	400
5	12±2	50	0,088	500
6	14±3	60	0,1	600
7	16±2	70	0,12	700
8	18±3	80	0,16	800
9	20±3	90	0,18	900
10	22±2	100	0,2	1000
11	24±3	110	0,215	1100
12	26±3	120	0,25	1200

№ варианта	$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$f, \text{Гц}$
13	$28 \pm 2$	130	0,35	1300
14	$30 \pm 3$	140	0,45	1400
15	$32 \pm 2$	150	0,55	1500
16	$34 \pm 3$	160	0,75	1600
17	$36 \pm 3$	170	0,85	1700
18	$38 \pm 3$	180	1,25	1800
19	$40 \pm 3$	190	2,5	1900
20	$42 \pm 3$	200	3	2000

### Задание № 1.4.1. Порядок расчета преобразователей с самовозбуждением

Порядок расчета преобразователей с самовозбуждением выполняется согласно уточненной и дополненной методике изложенной в [4].

#### *Исходные данные*

а) Величина входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ , по которой производится выбор и расчет схемы преобразователя. В задании определены отклонения напряжения питания, поэтому выбор транзисторов выполняем по максимальному значению напряжения питания  $U_{\text{вх.макс}}$ .

Зададимся для примера напряжением питания  $U_{\text{вх}}=14 \text{ В}$ , которое имеет отклонения в пределах от 12 до 17 В.

б) Рассмотрим случай, когда преобразователь работает на выпрямитель. Из предварительного расчета можно определить напряжение на выходе преобразователя  $U_2 = 100 \text{ В}$  и ток вторичной обмотки трансформатора  $I_2 = 0,2 \text{ А}$ . В нашем случае эти параметры заданы и принимаются по табл. 1.4 в соответствии с вариантом задания.

в) Частота преобразования  $f = 1000 \text{ Гц}$ .

г) Температура окружающей среды  $20 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Требуется выбрать схему преобразователя, тип транзисторов, рассчитать режим их работы и силовой трансформатор.

### Порядок расчета

1. Выбираем схему преобразователя напряжения исходя из величины напряжения питания  $U_{вх}$  и требуемой мощности. Если напряжение питания сравнительно низкое – до 20–25 В, а мощность мала – до 50–100 Вт, то рекомендуется выбрать схему автогенератора с выводом средней точки первичной обмотки трансформатора, так как в таких схемах число транзисторов вдвое меньше, чем в мостовых схемах преобразователей. В нашем примере выбираем двухтактную схему преобразователя напряжения (см. рис. 1.1, а).

2. Задаваясь величиной КПД преобразователя напряжения, определяем величину тока коллектора открытого транзистора  $I_{кс}$ . Если преобразователь работает на выпрямитель, то обычно  $\eta_{п} = 0,75–0,85$ , а при работе на активную нагрузку  $\eta_{п} = 0,85–0,95$ .

Следует отметить, что КПД преобразователя напряжения определяется многими факторами: величиной напряжения питания, частотой преобразования, выходной мощностью преобразователя, типом используемых транзисторов, качеством трансформатора и т.п. Поэтому при расчете величина  $\eta_{п}$  выбирается ориентировочно, а затем уточняется в процессе расчета.

Принимаем  $\eta_{п} = 0,75$  и вычисляем ток коллектора открытого транзистора. Полагая в (1.2, а)  $U_{кн}=0$ , получаем

$$I_{кс} = \frac{U_2 I_2}{\eta_{п} U_{вх}} = \frac{100 \cdot 0,2}{0,75 \cdot 14} = 1,9 \text{ А.}$$

Это значение тока коллектора открытого транзистора преобразователя может быть уточнено после выбора транзисторов с учетом падения напряжения на последних в режиме насыщения.

3. Определяем амплитуду напряжения между эмиттером и коллектором транзисторов преобразователя в соответствии с выражением (1.5, а):

$$U_{эк} = 2,4 \cdot U_{вх..макс} = 2,4 \cdot 17 = 41 \text{ В.}$$

4. По полученным значениям  $I_{кс}$  и  $U_{эк}$  выбираем транзистор типа КТ818. Транзисторы такого типа разбиваются на 4 группы по вели-

чине статического коэффициента усиления по току. В пределах каждой группы величина отношения  $B_{ст.макс}/B_{ст.мин}$  колеблется в диапазоне 1,65–1,75. Например, для транзисторов 3-й группы при температуре окружающей среды +20 °С  $B_{ст}=25–46$ .

При расчете преобразователя напряжения следует учитывать наихудшие параметры транзисторов (с учетом допустимого разброса и температурных уходов), с тем чтобы любые приборы выбранного типа обеспечивали надежную работу преобразователя.

5. Уточняем значение тока коллектора открытого транзистора преобразователя напряжения. Для выбранной схемы в соответствии с (1.2, а), учитывая, что при токе коллектора 2 А для транзистора КТ818  $U_{кн} = 0,5$  В, получаем

$$I_{кс} = \frac{U_2 I_2}{\eta_n (U_{ex} - U_{кн})} = \frac{100 \cdot 0,2}{0,75(14 - 0,5)} = 1,98 \text{ А.}$$

Такое уточнение величины тока коллектора открытого транзистора целесообразно проводить, когда напряжение  $U_{кн}$  превышает 10–15 % величины напряжения питания.

6. Проверяем максимальную величину тока коллектора транзистора преобразователя напряжения в момент переключения.

Приняв  $b_{мин} = 1,5$ ,  $K_1 = 1,4$ ,  $\frac{B_{ст.макс}}{B_{ст.мин}} = 1,7$ , получим в соответствии с (1.3):

$$I_{к.макс} = I_{кс} \cdot b_{мин} \cdot K_1 \frac{B_{ст.макс}}{B_{ст.мин}} = 1,98 \cdot 1,5 \cdot 1,4 \cdot 1,7 = 7 \text{ А.}$$

Для транзисторов КТ818  $I_{к.доп} = 9$  А, т.е.  $I_{к.макс} < I_{к.доп}$ .

7. По характеристикам магнитных материалов выбираем материал 34НКМП с толщиной ленты 0,1 мм. Для этого материала  $B_s = 1,47$  Тл. Магнитопровод трансформатора тороидальный.

8. Находим габаритную мощность трансформатора преобразователя согласно (1.9, а):

$$P_{габ} = 1,3 U_2 I_2 = 1,3 \cdot 100 \cdot 0,2 = 26 \text{ Вт.}$$

9. Задавшись значениями величин, входящих в выражение (1.8):

$$\eta_{mp} = 0,85; \delta = 3 \text{ А/мм}^2; \kappa_c = 0,8; \kappa_m = 0,3,$$

вычисляем произведение  $Q_{ст} \cdot Q_0$  для выбора типа магнитопровода:

$$Q_{ст} \cdot Q_0 = \frac{P_{заб} \cdot 10^2}{2 f B_s \eta_{mp} \delta \cdot k_c k_m} = \frac{26 \cdot 10^2}{2 \cdot 10^3 \cdot 1,47 \cdot 0,85 \cdot 3 \cdot 0,8 \cdot 0,3} = 1,44 \text{ см}^4.$$

По справочным данным табл. 1.3 ближайшим является магнитопровод ОЛ-25/35-5 с площадью поперечного сечения  $Q_{ст} = 0,25 \text{ см}^2$ .

10. Определяем число витков половины коллекторной обмотки трансформатора преобразователя. В соответствии с (1.19), (1.20, а) имеем

$$\omega_1 = \frac{(U_{вх} - U_{кн}) \cdot 10^4}{4 f \cdot B_0 Q_{ст} k_c} = \frac{(14 - 0,5) \cdot 10^4}{4 \cdot 10^3 \cdot 1,47 \cdot 0,25 \cdot 0,8} = 114 \text{ витков}.$$

11. Задавшись величиной напряжения обратной связи  $U_{бу} = 3 \text{ В}$ , вычисляем число витков базовой обмотки (1.23) с учетом минимального напряжения питания:

$$\omega_{\delta} = \frac{\omega_1 U_{бу}}{U_{вх.мин} - U_{кл}} = \frac{114 \cdot 3}{12 - 0,5} = 30 \text{ витков}.$$

12. Находим число витков вторичной обмотки (1.24):

$$\omega_2 = \frac{\omega_1 U_2}{U_{вх} - U_{кн}} = \frac{114 \cdot 100}{14 - 0,5} = 840 \text{ витков}.$$

13. Определяем действующие значения токов обмоток трансформатора:

$$\text{коллекторной (1.25)} \quad I_{кэф} = \frac{I_{кс}}{\sqrt{2}} = \frac{1,98}{\sqrt{2}} = 1,4 \text{ А};$$

базовой (1.26), принимая  $B_{ст.мин} = 25$ ,

$$I_{бэф} = \frac{I_{кэф} b_{мин}}{\sqrt{2} B_{ст.мин}} = \frac{1,4 \cdot 1,5}{1,4 \cdot 25} = 0,06 \text{ А}.$$

14. Вычисляем значения диаметров проводов обмоток трансформатора преобразователя (1.28):

$$\text{коллекторной} \quad d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{I_{кэф}}{\delta}} = 1,13 \sqrt{\frac{1,4}{3}} = 0,685 \text{ мм};$$

$$\text{базовой} \quad d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{I_{\text{бэф}}}{\delta}} = 1,13 \sqrt{\frac{0,06}{3}} = 0,14 \text{ мм};$$

$$\text{выходной} \quad d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{I_{2\text{эф}}}{\delta}} = 1,13 \sqrt{\frac{0,2}{3}} = 0,29 \text{ мм};$$

15. Определяем сопротивление дополнительного резистора в базовых цепях транзисторов преобразователя напряжения (1.15):

$$R_{\text{б}} = \frac{(U_{\text{бу}} - U_{\text{бн}}) B_{\text{ст.мин}}}{I_{\text{кс}} \cdot b_{\text{мин}}} = \frac{(3 - 0,4) 25}{1,98 \cdot 1,5} = 22 \text{ Ом.}$$

16. Задавшись величиной напряжения смещения от тока делителя на  $R_{\text{б}}$ , равной  $U_{R_{\text{б}}} = 0,3 \text{ В}$ , вычисляем величину сопротивления  $R_1$  делителя (1.16) при минимальном напряжении питания:

$$R_1 = R_{\text{б}} \frac{U_{\text{вх.мин}} - U_{\text{бн}}}{U_{R_{\text{б}}}} = 22 \frac{12 - 0,4}{0,3} = 850 \text{ Ом.}$$

Для обеспечения надежного запуска преобразователя рекомендуется шунтировать резистор  $R_1$  делителя конденсатором. Емкость такого конденсатора выбираем равной 1 мкФ.

17. Находим потери мощности в транзисторах преобразователя. Для транзисторов КТ818  $f_{\beta} = 5 \text{ кГц}$ .

$$\tau_{\beta} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{\beta}} = \frac{1}{6,28 \cdot 5 \cdot 10^3} = 32 \cdot 10^{-6} \text{ сек.}$$

$$\text{По формуле (1.7, а):} \quad \gamma = 1 + \frac{0,2}{K_1} = 1 + \frac{0,2}{1,4} = 1,14.$$

Среднее значение мощности потерь в транзисторе в соответствии с (1.6) при условии, что  $P_{\text{отс}} \approx 0$ , составляет величину

$$P_k = \frac{1}{2} I_{\text{кс}} U_{\text{кн}} + U_{\text{вх.макс}} I_{\text{кс}} \tau_{\beta} f \gamma = \frac{1}{2} 1,98 \cdot 0,5 + 17 \cdot 1,98 \cdot 32 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 \cdot 1,14 = 0,5 + 1,23 = 1,73 \text{ Вт}$$

По вычисленной рассеиваемой мощности с учетом заданных максимальной температуры окружающей среды и теплового сопротивления транзисторов рассчитывается необходимая поверхность теплоотводящего радиатора.

## **Задание № 1.4.2. Порядок расчета преобразователей напряжения с независимым возбуждением**

Когда есть необходимость преобразования энергии большой мощности при полном использовании полупроводниковых ключей, уменьшении влияния нагрузки на параметры ПН, снижении затрат энергии на стабилизацию или регулировку частоты, применяются ПН с независимым возбуждением (усилители мощности).

Схемы усилителей мощности, как правило, состоят из маломощного задающего генератора и мощного выходного каскада. Задающим генератором может служить одна из рассмотренных ранее схем ПН с самовозбуждением. Чаще всего при питании от источников с низким напряжением применяются схемы с выводом средней точки первичной обмотки трансформатора, а при повышенных напряжениях питания – мостовые преобразователи.

Базовые цепи транзисторов выходного каскада питаются от выходного трансформатора задающего генератора. При этом силовой трансформатор выходного каскада работает без захода в режим насыщения материала магнитопровода.

В мостовых и полумостовых выходных каскадах нагрузку можно включать непосредственно в диагональ моста без выходного трансформатора [1].

Ранее отмечалось, что включение параллельно выводам эмиттера и коллектора диодов в обратном направлении или стабилитронов в преобразователях с независимым возбуждением позволяет защитить транзисторы от перенапряжения.

В преобразователях с независимым возбуждением необходимо использовать специальную быстродействующую защиту для исключения возможности пробоя, транзисторов выходного каскада при перегрузках или коротких замыканиях в нагрузке. В преобразователях напряжения с самовозбуждением в аналогичных случаях происходит лишь срыв генерации, и после устранения перегрузки преобразователь напряжения остается работоспособным.



## ***Порядок расчета преобразователей напряжения с независимым возбуждением***

При проектировании преобразователей напряжения с независимым возбуждением задаются те же основные параметры преобразователя и условия его работы, как и в случае проектирования автогенераторов. Расчет начинают с выходного каскада, так как входные цепи такого устройства являются нагрузкой задающего генератора [4].

Рассмотрим порядок расчета преобразователя напряжения с независимым возбуждением на примере преобразователя, схема которого приведена на рис. 1.6, б.

*Исходные данные:*

а) Напряжение питания выходного каскада и задающего генератора одинаково и равно  $U_{\text{вх}}=27\pm 3$  В.

б) Ток вторичной обмотки трансформатора  $I_2=1$  А, нагрузка активная.

в) Напряжение вторичной обмотки  $U_2=200$  В.

г) Частота преобразования  $f=1200$  Гц. Требуется произвести электрический расчет преобразователя напряжения с независимым возбуждением.

*Порядок расчета*

Расчет начинается с определения режима работы и выбора транзисторов выходного каскада.

1. Ориентировочно определяем величину тока коллектора открытого транзистора в режиме насыщения, задавшись КПД выходного каскада  $\eta_{\text{п}}=0,9$ . Полагая в (1.26)  $U_{\text{кн}}=0$ , при  $U_{\text{вх мин}}=24$  В получим

$$I_{\text{кс}} = \frac{P_{\text{вых}}}{\eta_{\text{п}} \cdot U_{\text{вх мин}}} = \frac{200 \cdot 1}{0,9 \cdot 24} = 9,2 \text{ А.}$$

2. Находим амплитуду напряжения между эмиттером и коллектором транзистора (1.56):

$$U_{\text{эк}} = 1,2U_{\text{вх макс}} = 1,2 \cdot 24 = 29 \text{ В.}$$

3. Полученным данным расчета наиболее соответствует транзистор типа КТ818.

4. Проверяем максимальную величину тока коллектора транзистора выходного каскада в момент переключения. Для транзисторов КТ818 при расчетном значении тока коллектора  $I_{\text{КС}}=9,2$  А падение напряжения в режиме насыщения примерно равно  $U_{\text{КН}}=1$  В. В соответствии с (1.26)

$$I_{\text{КС}} = \frac{U_2 I_2}{\eta_n \cdot (U_{\text{вх.мин}} - U_{\text{КН}})} = \frac{200 \cdot 1}{0,9 \cdot (24 - 2)} = 10,1 \text{ А.}$$

Полагая величину  $K_2=1,2$ , согласно выражению (1.4) находим максимальное значение тока коллектора транзистора:

$$I_{\text{К.макс}} = I_{\text{КС}} \cdot K_2 = 10,1 \cdot 1,2 = 12,1 \text{ А.}$$

Для выбранного типа транзисторов КТ818  $I_{\text{К доп}}=9$  А.

Поскольку оказалось, что максимальное значение тока коллектора превышает предельно допустимое, в преобразователе необходимо использовать параллельное включение двух транзисторов в каждом плече мостового усилителя мощности. При этом ток через каждый транзистор в режиме насыщения окажется равным

$$I_{\text{КС1}} = \frac{I_{\text{К.макс}}}{N} = \frac{10,1}{2} = 5,05 \text{ А,}$$

а максимальное значение тока в момент переключения транзисторов  $I_{\text{К макс1}}=5,05 \cdot 1,2=6,05$  А и не превышает значения предельно допустимого тока коллектора транзистора.

5. Определяем суммарный ток базы транзисторов, принимая для транзисторов КТ818  $B_{\text{ст мин}}=25$  и  $b_{\text{мин}}=2$ .

$$I_{\text{б}} = \frac{NI_{\text{КС1}}b_{\text{мин}}}{B_{\text{ст.мин}}} = \frac{2 \cdot 5,05 \cdot 2}{25} = 0,81 \text{ А.}$$

Ток базы каждого транзистора составляет

$$I_{\text{б}} = \frac{I_{\text{б}}}{N} = \frac{0,81}{2} = 0,405 \text{ А.}$$

6. Находим величину напряжения на выходных обмотках трансформатора задающего генератора. Как и в автогенераторах, в базовые

цепи транзисторов усилителя мощности включаются дополнительные сопротивления для уменьшения влияния разброса параметров входной цепи транзисторов на режим их работы. Величина этого сопротивления  $R_6$  должна выбираться большей, чем величина входного сопротивления транзистора  $R_6 = (2-3)R_{вх}$ . Для транзисторов КТ818  $U_{6н}$  составляет примерно 0,5 В, при этом входное сопротивление транзистора оказывается равным

$$R_{вх} \approx \frac{U_{6н}}{I_6} = \frac{0,5}{0,405} = 1,23 \text{ Ом.}$$

Выбираем  $R_6 = 3 \text{ Ом}$ , тогда напряжение на выходных обмотках трансформатора задающего генератора составит

$$U_{6у} = U_{6н} + I_6 R_6 = 0,5 + 0,405 \cdot 3 \approx 1,8 \text{ В.}$$

7. Электрический расчет трансформатора выходного каскада преобразователя с независимым возбуждением проводится по тем же уравнениям, что и для преобразователя с самовозбуждением, с той разницей, что вместо индукции насыщения магнитного материала сердечника в соответствующие уравнения подставляется величина индукции (0,7–0,8)  $B_s$  при заданной частоте 1200 Гц.

8. Расчет усилителя мощности заканчивается проверкой теплового режима транзисторов и расчетом необходимой поверхности теплоотводящих радиаторов. Для этого, пользуясь выражениями (1.6, а), (1.6, в), (1.6, г) и кривыми на рис. 1.7, определяют потери мощности в транзисторах выходного каскада.

9. Последовательность расчета задающего генератора преобразователя напряжения остается такой же, как и для преобразователей напряжения с самовозбуждением. Выходная мощность этого каскада определяется по расчетным значениям тока базы транзисторов выходного каскада и напряжением на выходных обмотках его трансформатора:

$$P_{вых} = 2I_6 U_{6у} = 2 \cdot 0,81 \cdot 1,8 = 2,94 \text{ ВВ}$$

## 1.5. Способы стабилизации частоты и выходного напряжения преобразователей

На практике в большинстве случаев требуются специальные меры для поддержания частоты и амплитуды выходного напряжения на заданном уровне. Это связано с изменением амплитуды и частоты выходного напряжения преобразователя в результате изменения напряжения питания и нагрузки. Поэтому в преобразователях используются различные способы стабилизации выходного напряжения и частоты (рис. 1.10).

В схемах (рис. 1.10, *а*, *б*) стабилизируется напряжение на входе преобразователя. Для поддержания выходного напряжения преобразователя с высокой точностью в стабилизаторе напряжения постоянного тока регулирующей элемент может работать в двух режимах: линейном или ключевом.

Линейный режим работы позволяет уменьшить уровень пульсаций на выходе ПН, но КПД стабилизатора низкий и находится в пределах 0,5–0,7. Ключевой режим дает возможность получить значительно более высокий КПД, но при этом необходимо дополнительное подключение сглаживающих фильтров на входе и выходе регулирующего элемента, что сказывается на увеличении массогабаритных показателей ПН.

Для улучшения массогабаритных показателей можно повышать частоту коммутаций регулирующего элемента стабилизатора.

В схемах (см. рис. 1.10, *а*, *б*) стабилизации напряжения напряжение на выходе ПН меньше напряжения питания, в схеме (см. рис. 1.10, *б*) выходное напряжение стабильно, но величина его может превышать максимальное значение напряжения питания (входное напряжение  $U_{вх}$ ).

Указанный эффект реализуется с помощью сравнительно небольшого регулируемого вольтодобавочного преобразователя постоянного напряжения, выходное напряжение которого суммируется с напряжением питания. Его часто реализуют по функциональной схе-

ме, показанной на рис. 1.10, а, включая на выходе выпрямитель со сглаживающим фильтром.

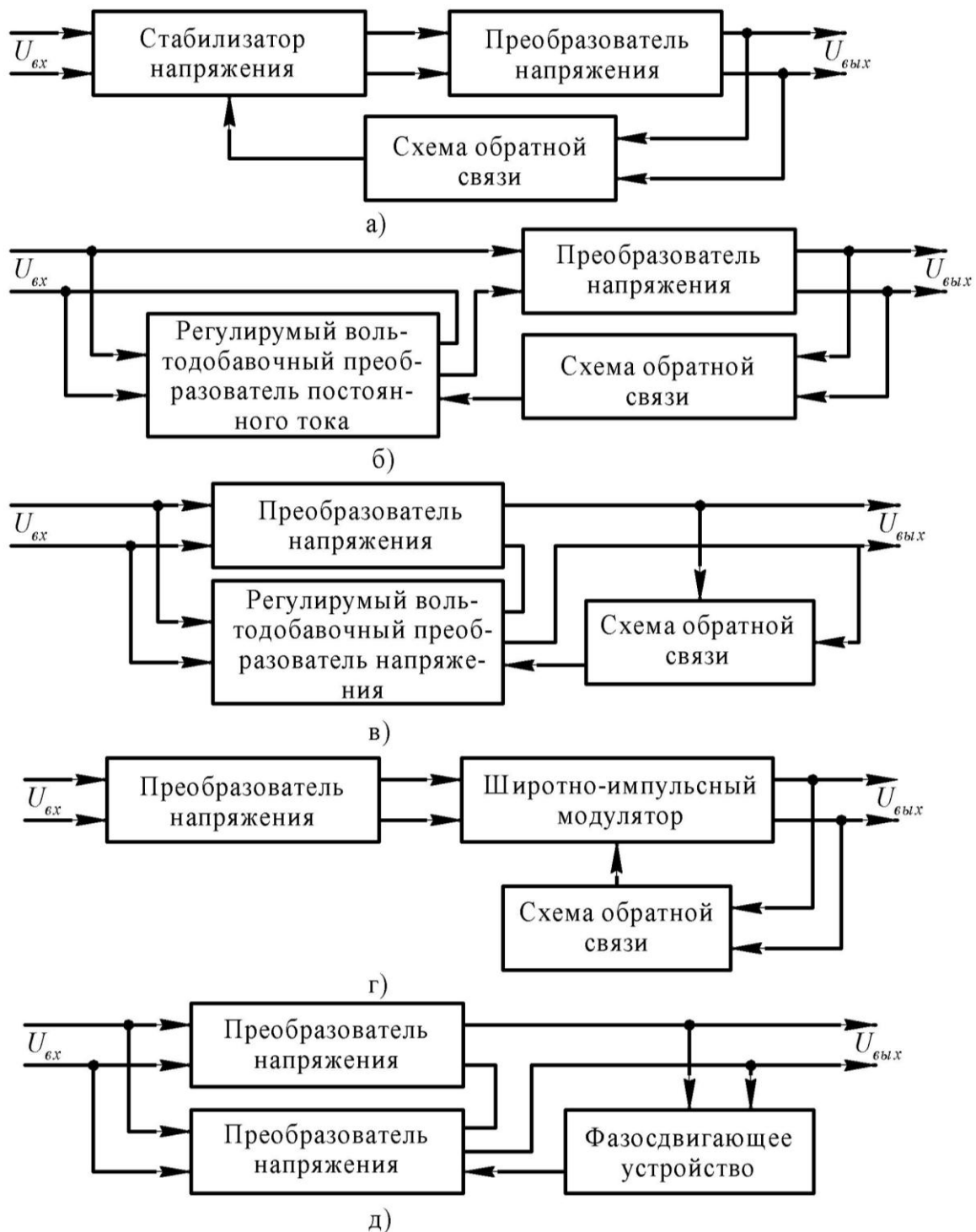


Рис. 1.10. Структурные схемы стабилизированных ПН

Преобразователи, выполненные по рассматриваемым схемам (см. рис. 1.10, а, б), имеют выходное напряжение в виде неискаженных импульсов прямоугольной формы, а значит, для получения несколь-

ких уровней стабилизированных напряжений с малым уровнем пульсаций их применяют для работы на выпрямитель. Как правило, такие преобразователи выполняют на мощности до 500 Вт.

В функциональной схеме (рис. 1.10, в) выход регулируемого вольтодобавочного ПН включен последовательно с выходом основного преобразователя; таким образом, они работают в фазе, а их выходные напряжения суммируются. В результате схема вольтодобавочного преобразователя упрощается по сравнению с рассмотренной схемой (см. рис. 1.10, б) из-за отсутствия необходимости в выпрямителе и сглаживающем фильтре на выходе. Поэтому вольтодобавочный преобразователь реализуется по схеме рис. 1.10, а.

Стабилизированные преобразователи на большие мощности и с высоким КПД порядка 0,7–0,8 могут выполняться по функциональной схеме (рис. 1.10, з) с включенным на выходе широтно-импульсным модулятором. Его функции могут выполнять магнитный усилитель или тиристорный регулятор, где стабилизированное выходное напряжение формируется путем изменения длительности прямоугольных двухполярных импульсов. По функциональной схеме (см. рис. 1.10, з) могут выполняться регулируемые вольтодобавочные преобразователи, используемые в схемах на рис. 1.10, б, в.

Возможно совмещение функций преобразования и стабилизации в одном стабилизированном ПН с широтно-импульсной стабилизацией выходного напряжения (рис. 1.10, д), который состоит из ведущего и ведомого преобразователей. Выходное напряжение стабилизируется путем изменения фазы выходного напряжения ведомого преобразователя относительно выходного напряжения ведущего. Форма выходного напряжения представлена на рис. 1.11. Если оба преобразователя выполнены идентичными, то форма выходного напряжения будет выглядеть так, как показано на рис. 1.11, а, если нет – то как на рис. 1.11, б.

На функциональной схеме (см. рис. 1.10, д) для стабилизации выходного напряжения по среднему или эффективному значению применено фазосдвигающее устройство.

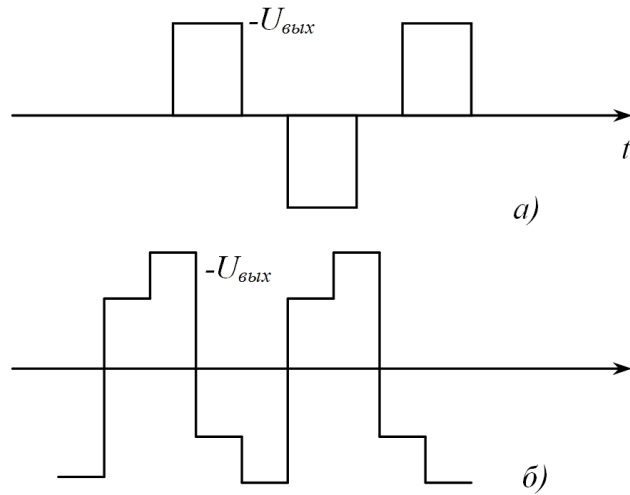


Рис. 1.11. Форма кривой напряжения на выходе стабилизированного преобразователя (см. рис. 1.10, д)

Для обеспечения стабилизации выходного напряжения и по среднему, и по эффективному значению необходимо выбирать коэффициенты трансформации выходных трансформаторов преобразователей из условия [1]

$$\frac{n_1}{n_2} = 1,1 \frac{U_{\text{вх.макс}} + U_{\text{вх.мин}}}{U_{\text{вх.макс}} - U_{\text{вх.мин}}}.$$

Преобразователи напряжения, выполненные по схеме на рис. 1.10, д, при изменении напряжения питания на +10 % имеют практическую стабильность эффективного значения выходного напряжения по отношению к среднему значению не хуже  $\pm 0,3$  %.

Нестабильность частоты преобразователя по схеме двухтактного ПН с насыщающимся трансформатором, у которого выходное напряжение прямо пропорционально величине напряжения питания, связано с различающимися параметрами трансформаторов и протекающими тепловыми процессами, в связи с чем диапазон изменения частоты в первом случае может составлять  $\pm 15$  % и, соответственно, по тепловым причинам – порядка  $\pm 2$  %.

Для устранения указанных причин и, как следствие, повышения точности и поддержания частоты выходного напряжения применяются либо стабилизация напряжения питания, либо включаемые в схему времязадающие  $LC$ - или  $RC$ -цепочки.

Для повышения точности стабилизации могут применяться задающие *LC*-генераторы или генераторы с кварцевой стабилизацией частоты.

*LC*-генератор [1] обеспечивает относительное изменение частоты в пределах

$$\frac{\Delta f_z}{f_z} = 5(10^{-5} + 10^{-4}) \frac{\Delta T}{^{\circ}C} + 1 \cdot 10^{-3},$$

где  $\Delta f$  – изменение частоты генератора.

Предел колебаний частоты *LC*-генератора ориентировочно составляет порядка 0,06–0,1 % при изменении температуры окружающей среды в пределах от -50 до +50 °С. Для контура применяются слюдяные конденсаторы с малым температурным коэффициентом емкости (ТКЕ) и емкостью в пределах 0,1–1,0 мкФ.

Для повышения добротности индуктивность контура рекомендуется выбирать на тороидальных магнитопроводах из магнитного материала с линейной характеристикой намагничивания.

Некоторые схемы *LC*-генераторов приведены на рис. 1.12, *а*, *б*. В указанных схемах выходное напряжение *LC*-генератора усиливается, преобразуется в прямоугольное и подается на вход ПН в виде сигнала синхронизации. Сигнал обеспечивает переключение транзисторов до момента насыщения материала магнитопровода.

Частота выходного напряжения *LC*-генератора выбираться больше, чем частота собственных колебаний ПН.

Часто применяемые схемы подачи сигнала синхронизации на ПН показаны на рис. 1.13. Кварцевые генераторы обеспечивают более высокую точность частоты:

$$\frac{\Delta f_{зк}}{f_{зк}} = 5(10^{-6} + 10^{-5}) \frac{\Delta T}{^{\circ}C} + 1 \cdot 10^{-4}.$$

Изменение температуры окружающей среды в пределах от -50 до +50 °С влияет на колебания частоты кварцевого генератора в пределах 0,001–0,01 %.



Основные схемы кварцевых генераторов приведены на рис. 1.12, в, г. Они обладают следующими недостатками:

1. Большая инерционность, т.е. колебания стабилизируются в течение 0,5–3,0 сек. после подачи напряжения питания. Повысить быстродействие ПН стабилизированного кварцевым генератором можно путем последовательного включения кварцевого и  $LC$ -генераторов.

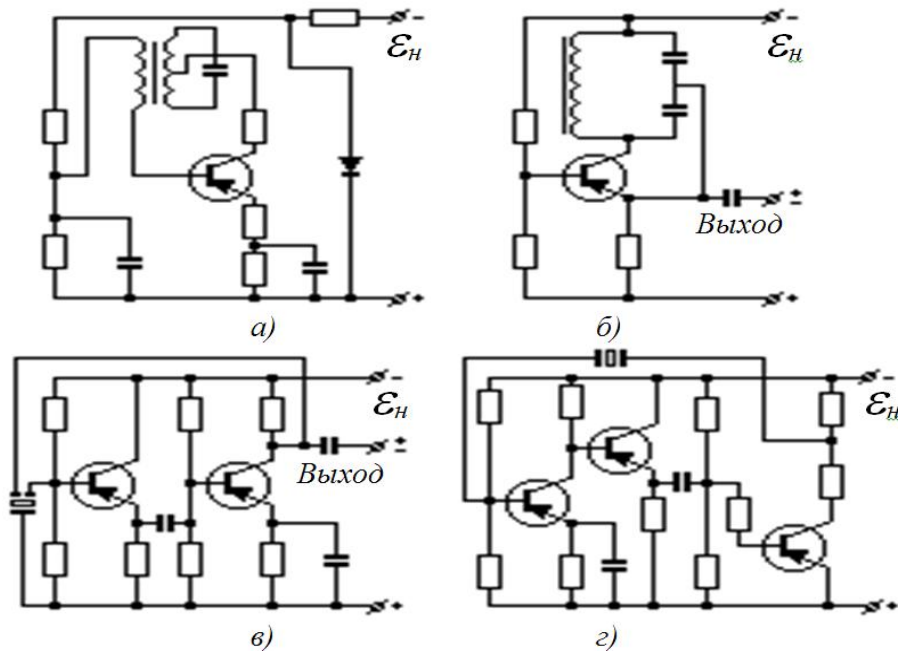


Рис. 1.12. Схемы кварцевых и  $LC$ -генераторов

2. Кварцевые генераторы маломощны, а форма выходного напряжения близка к синусоиде. Поэтому для управления ПН сигнал, снимаемый с выхода кварцевого генератора, необходимо усиливать и формировать в напряжение прямоугольной формы выходного трансформатора задающего генератора. Далее это напряжение может подаваться:

а) последовательно с напряжением положительной обратной связи в базы транзисторов ПН;

б) параллельно базовым выводам транзисторов (рис. 1.13, б);

в) на отдельную обмотку двухстержневого трансформатора ПН (рис. 1.13, в). В этом случае для стабилизации частоты преобразования необходима малая мощность задающего генератора, т.е. на выходные мощности от 100 до 1500 Вт необходима мощность сигнала синхронизации порядка 0,06–1,2 Вт.

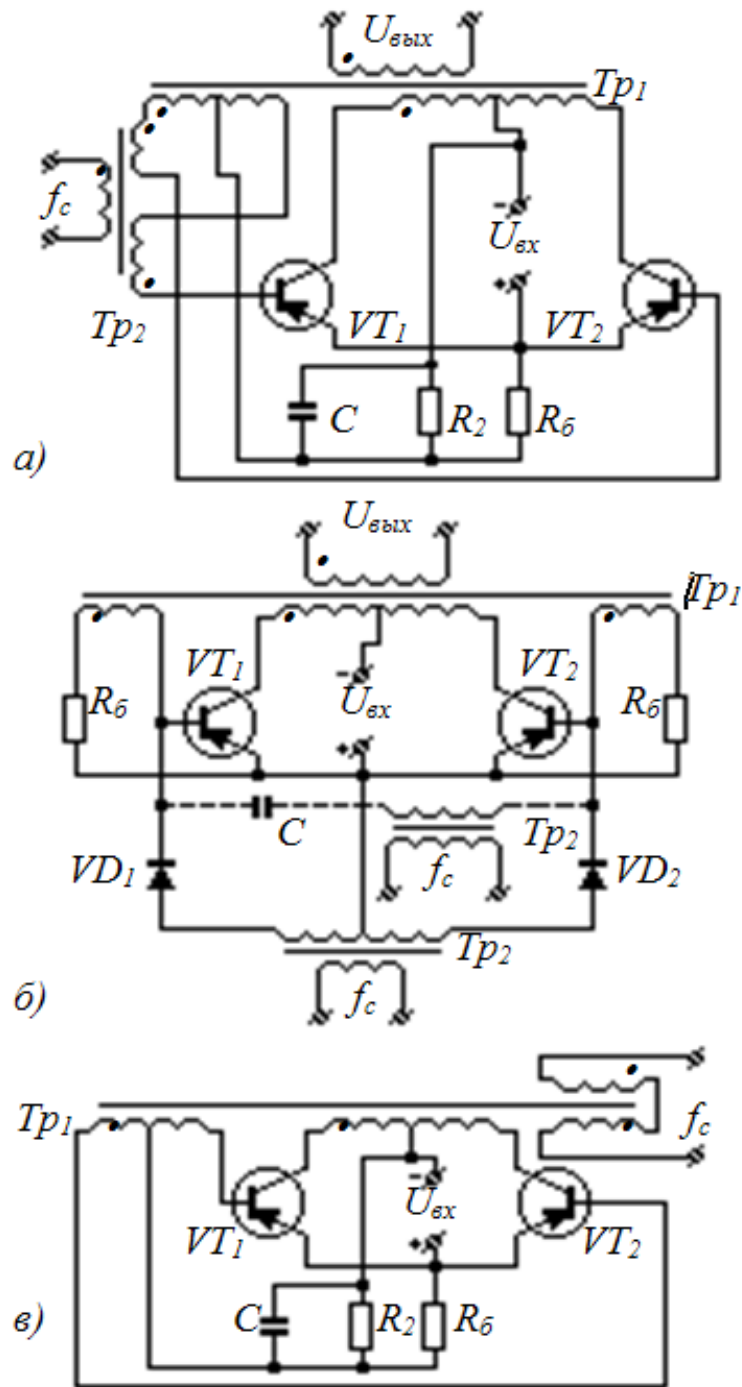


Рис. 1.13. Способы стабилизации частоты ПН

### Контрольные вопросы к первому разделу «Полупроводниковые преобразователи напряжения»

1. Разновидности и назначение преобразователей напряжения.
2. Принцип работы и область применения преобразователей с самовозбуждением (автогенераторы).
3. Принцип работы и область применения преобразователей в качестве усилителей мощности.

4. Каким образом работает силовой трансформатор и чем определяется частота переменного напряжения в преобразователях с времязадающей RC-цепью?
5. По каким причинам мостовые автогенераторы могут работать от источника питания с большим напряжением?
6. Недостатки мостовых автогенераторов по сравнению с другими схемами преобразователей.
7. Чем отличаются рассмотренные схемы усилителей мощности от схем автогенераторов?
8. Какие схемы нашли наибольшее применение в источниках питания?
9. В каком режиме должен работать выходной трансформатор усилителя мощности?
10. Что необходимо применять в усилителях мощности для устранения явления разности тепловых режимов работы в транзисторах смежных плеч?
11. По каким параметрам производится выбор транзисторов преобразователя напряжения?
12. От чего зависит ток коллектора открытого транзистора в преобразователе напряжения?
13. От чего зависит амплитуда тока коллектора в автогенераторах?
14. Какие транзисторы рекомендуется использовать для обеспечения одинаковых режимов работы в преобразователях напряжения с самовозбуждением?
15. Какие преобразователи используют для преобразования мощностей свыше 50–100 Вт?
16. Какое включение транзисторов применяют, когда амплитуда тока коллектора превышает предельно допустимое значение? Пояснить ответ.
17. Назначение уравнивающих сопротивлений и место их включения.
18. Для чего и в каких цепях преобразователя напряжения включаются быстродействующие предохранители?
19. От чего зависит амплитуда всплесков тока и напряжения и какие элементы включаются параллельно выводам коллектора и эмиттера транзистора для ее уменьшения? Пояснить ответ.
20. По какому параметру рассчитывается напряжение эмиттер – коллектор транзистора преобразователя?
21. Чем достигается равномерное распределение напряжения на запертых транзисторах? Пояснить ответ.
22. Что предпринимают для уменьшения веса и габаритных размеров преобразователей напряжения?

23. Почему в преобразователях напряжения повышенной частоты рекомендуется применять высокочастотные транзисторы с малым сопротивлением насыщения?

24. На какие характеристики преобразователя напряжения оказывает влияние трансформатор?

25. Для чего необходима сильная положительная обратная связь и чем она обеспечивается в автогенераторах с самовозбуждением?

26. В каких случаях применяются преобразователи напряжения с независимым возбуждением (усилители мощности)?

27. Недостатком преобразователей с независимым возбуждением.

28. Назначение вольтодобавочного преобразователя с включенным на выходе выпрямителем со сглаживающим фильтром.

29. Чем можно повысить точность частоты выходного напряжения преобразователя?

30. Для какой цели применяются в преобразователях напряжения задающие  $LC$ -генераторы или кварцевые генераторы?

## 2. СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

### 2.1. Назначение и принципы работы стабилизаторов напряжения

Стабилизаторы постоянного напряжения предназначены для стабилизации выходного напряжения на нагрузке при колебаниях сетевого напряжения и изменении силы тока нагрузки. Их подключают между выпрямителем с фильтром и нагрузкой (потребителем).

Стабилизаторы разделяют на параметрические и компенсационные.

Основой параметрических стабилизаторов является элемент с нелинейной характеристикой, например такой, как полупроводниковый стабилитрон, у которого напряжение на участке характеристики, относящемся к обратимому электрическому пробое, почти постоянно при сильном изменении обратного тока через элемент [2].

Схема параметрического стабилизатора приведена на рис. 2.1.

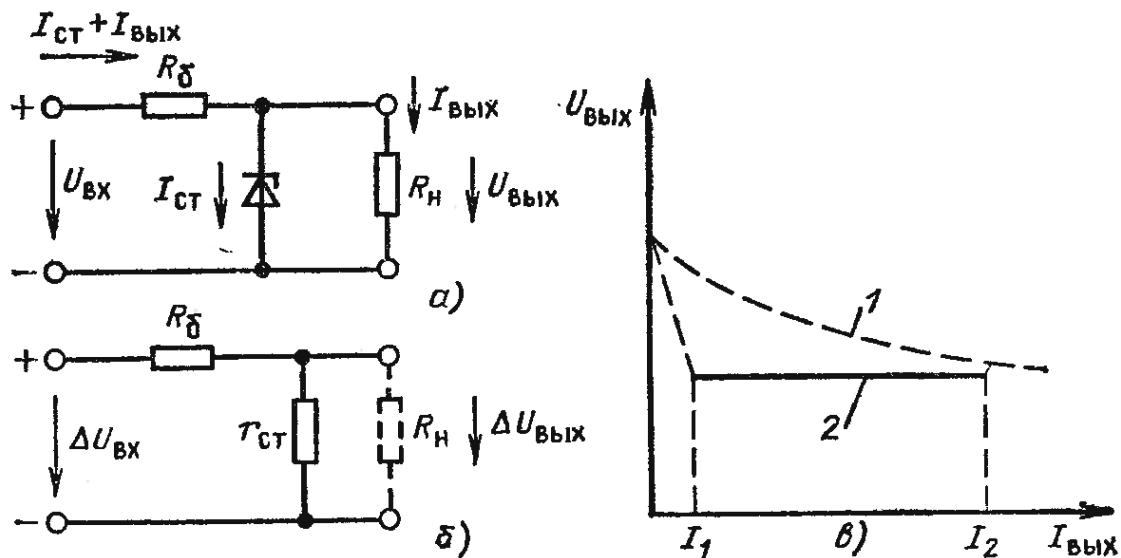


Рис. 2.1. Параметрический стабилизатор (а), его схема замещения для приращений (б) и внешняя характеристика выпрямителя со стабилизатором (кривая 2) и без стабилизатора (кривая 1) (в)

Как правило, коэффициент стабилизации  $K_{\text{ст}}$  для параметрических стабилизаторов равен отношению приращений входного и выходного напряжений. Его значение не превышает 20–40, а величина  $R_{\text{вых}}$  лежит в пределах от нескольких ом до нескольких сот ом.

Если показатели качества параметрических стабилизаторов не удовлетворяют требованиям, то применяют компенсационные стабилизаторы. На рис. 2.2 приведена одна из простейших схем компенсационных стабилизаторов, в котором нагрузка подключена к источнику входного напряжения через регулирующий нелинейный элемент – транзистор  $V$ , на базу которого через операционный усилитель (ОУ) подается сигнал обратной связи (ОС). На вход ОУ поступают напряжения с высокоомного резистивного делителя  $U_{\text{вых}} R_2 / (R_1 + R_2) = U_{\text{вых}} \gamma$  и эталонное (опорное) напряжение  $U_0$  [2].

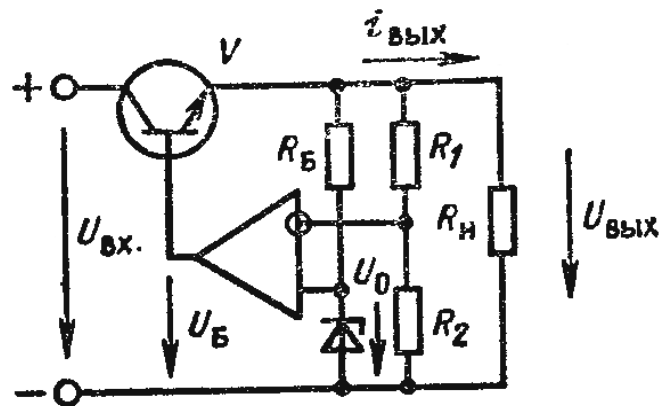


Рис. 2.2. Простейшая схема компенсационного стабилизатора с ОУ

Работает стабилизатор следующим образом. При увеличении напряжения на входе стабилизатора  $U_{\text{вх}}$  растет и выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ . При этом на инвертирующий вход ОУ подается положительное приращение напряжения  $\Delta U_{\text{вых}} \gamma$ , а на выходе ОУ возникает отрицательное приращение напряжения  $\Delta U_{\text{б}}$ . В свою очередь, к управляющему эмиттерному переходу транзистора  $V$  приложена разность базового и эмиттерного напряжений  $U_{\text{б}} - U_{\text{э}}$ . В результате возникает приращение напряжения базы – эмиттера  $\Delta U_{\text{бэ}} = \Delta U_{\text{б}} - \Delta U_{\text{вых}} < 0$  и, как следствие, ток транзистора  $V$  и напряжение  $U_{\text{вых}}$  снижаются почти до первоначального значения. Аналогичные процессы происходят при увеличении или уменьшении сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}}$ , т.е. для регулирования  $U_{\text{вых}}$  возникнет  $\Delta U_{\text{бэ}}$  соответствующего знака и изменится ток транзистора  $I_{\text{бэ}}$  [2].

В стабилизаторе работа контура ОС поддерживает равенство нулю разности  $U_0 - \gamma U_{\text{вых}}$ , поэтому  $U_{\text{вых}} = U_0 / \gamma$ . Коэффициент усиления ОУ влияет на повышение точности выполнения этого равенства, на увеличение коэффициента стабилизации  $K_{\text{ст}}$  (он может достигать  $10^3$  и выше) и на уменьшение  $R_{\text{вых}}$  стабилизатора ( $R_{\text{вых}} = 10^{-2} \div 10^{-3}$  Ом) [1,2].

Схема параметрического стабилизатора на полупроводниковом стабилитроне (см. рис. 2.2) используется для создания опорного напряжения в компенсационном стабилизаторе. Стабильность  $U_0$  очень высока, так как в процессе работы режим работы стабилитрона практически не изменяется и ток через него стабилен [1, 2].

На рис. 2.1, б показана внешняя характеристика источника питания со стабилизатором, ее рабочий участок ограничен значениями тока  $I_1 < I_{\text{вых}} < I_2$ .

### **Задание № 2.1.1. Расчет транзисторного стабилизатора напряжения**

В результате расчета необходимо определить типы транзисторов и стабилитрона, величины параметров всех деталей, входящих в схему стабилизатора и обеспечивающих заданный режим его работы, необходимую величину входного напряжения, коэффициент стабилизации схемы по напряжению и КПД стабилизатора.

Исходные данные для расчета стабилизатора приведены в табл. 2.1:

- номинальное выходное напряжение стабилизатора  $U_{\text{вых}}$  с плавной регулировкой в пределах  $U_{\text{вых}}$ ;
- номинальный ток нагрузки  $I_{\text{вых}}$ ;
- допустимое отклонение напряжение на входе стабилизатора от номинального значения в сторону увеличения ( $\Delta U_{\text{вх}}^+$ ) и в сторону уменьшения ( $\Delta U_{\text{вх}}^-$ ):  $\Delta U_{\text{вх}}^+ = \Delta U_{\text{вх}}^-$ ,
- допустимое отклонение выходного напряжения от номинального:  $\Delta U_{\text{вых}}^+ = \Delta U_{\text{вых}}^-$ .

## Исходные данные для расчета стабилизатора

№ варианта	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$I_{\text{вых}}, \text{А}$	$\Delta U_{\text{ex}}^+, \%$	$\Delta U_{\text{ex}}^-, \%$
1	4±0,8	0,1	20	0,4
2	6±1	0,1	18	0,3
3	8±1,6	0,2	16	0,4
4	10±0,8	0,3	14	0,3
5	12±2	0,4	12	0,2
6	14±2,4	0,6	10	0,2
7	16±2,6	0,8	8	0,1
8	18±2,8	1,0	6	0,1
9	20±3,2	1,2	4	0,1
10	18±2,8	0,7	10	0,3
11	16±2,7	1,6	20	0,3
12	14±2,2	0,4	18	0,3
13	12±2,2	1	16	0,2
14	10±1,8	0,8	12	0,1
15	8±1,6	0,5	10	0,3
16	6±1,2	0,2	8	0,2
17	4±1	0,2	6	0,1
18	20±3,4	1,6	20	0,4
19	18±2,8	1,4	18	0,4
20	16±2,5	1,2	16	0,3

## Пример расчета транзисторного стабилизатора напряжения

Схема транзисторного стабилизатора напряжения изображена на рис. 2.3 [3].

Исходные данные для расчета стабилизатора:

- номинальное выходное напряжение стабилизатора  $U_{\text{вых}} = 12 \text{ В}$  с плавной регулировкой в пределах  $\pm 2 \text{ В}$ ;
- номинальный ток нагрузки  $I_{\text{вых}} = 0.2 \text{ А}$ ;
- допустимое отклонение напряжения на входе стабилизатора от номинального значения в сторону увеличения ( $\Delta U_{\text{ex}}^+$ ) и в сторону уменьшения ( $\Delta U_{\text{ex}}^-$ ):  $\Delta U_{\text{ex}}^+ = \Delta U_{\text{ex}}^- = 10 \%$ ;



- допустимое отклонение выходного напряжения от номинального:  $\Delta U_{\text{вых}}^+ = \Delta U_{\text{вых}}^- = 0,2 \%$ .

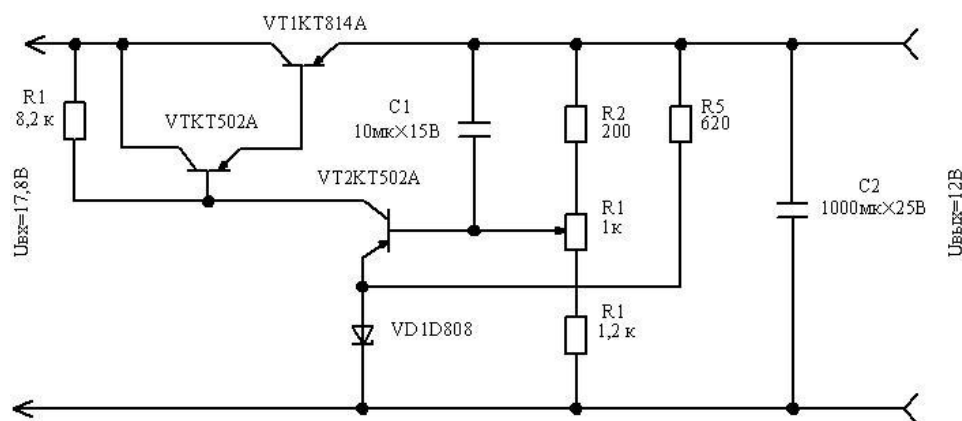


Рис. 2.3. Схема транзисторного стабилизатора напряжения

Порядок расчета.

1. Определим требуемое значение коэффициента стабилизации:

$$K_{\text{ст}(u)\text{треб}} = (\Delta U_{\text{вх}}^+ + \Delta U_{\text{вх}}^-) / (\Delta U_{\text{вых}}^+ + \Delta U_{\text{вых}}^-) = (10 + 10) / (0,2 + 0,2) = 50.$$

2. Находим величину минимального напряжения на входе стабилизатора:

$$U_{\text{вх.мин}} = U_{\text{вых}} + U_{\text{к.э1.мин}} + \Delta U_{\text{вых}}, \quad (2.1)$$

где  $U_{\text{к.э1.мин}}$  – минимально допустимое напряжение между эмиттером и коллектором регулирующего транзистора, при котором работа еще происходит на линейном участке выходной характеристики  $I_{\text{к}} = f(U_{\text{к.э}})$  при  $I_{\text{с}} = \text{const}$ ;

$\Delta U_{\text{вых}}$  – отклонение напряжения на выходе стабилизатора от номинального.

Напряжение  $U_{\text{к.э1.мин}}$  для большинства транзисторов не превышает 1–3 В. При расчете  $U_{\text{к.э1.мин}}$  можно принять равным 2 В.

Величина напряжения  $\Delta U_{\text{вых}}$  для нашего примера определяется верхним пределом регулировки выходного напряжения, т.е. равна 2 В. Таким образом,

$$\Delta U_{\text{вых}} = 12 + 2 + 2 = 16 \text{ В}.$$

Номинальное и максимальное напряжения на входе стабилизатора с учетом допустимых отклонений входного напряжения  $\Delta U_{\text{вх}}^+ = \Delta U_{\text{вх}}^- = 10\%$ , соответственно равны

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вх.мин}} / (1 - (\Delta U_{\text{вх}}^- / 100)) = 16 / (1 - (10/100)) \approx 17,8 \text{ В}; \quad (2.2)$$

$$U_{\text{вх.макс}} = U_{\text{вх}} \cdot (1 + (\Delta U_{\text{вх}}^+ / 100)) = 17,8 \cdot (1 + (10/100)) \approx 19,6 \text{ В}. \quad (2.3)$$

3. Определим максимальное падение напряжения на участке эмиттер – коллектор регулирующего транзистора:

$$U_{\text{к.эл.макс}} = U_{\text{вх.макс}} + U_{\text{вых.мин}} = 19,6 - 10 = 9,6 \text{ В}. \quad (2.4)$$

4. Находим максимальную мощность, рассеиваемую на коллекторе регулирующего транзистора:

$$P_{\text{кл.макс}} = U_{\text{к.эл.макс}} \cdot I_{\text{вых.макс}}, \quad (2.5)$$

где  $I_{\text{вых.макс}}$  – максимальное значение тока нагрузки. Для нашего примера (при неизменном токе нагрузки)  $I_{\text{вых.макс}} = 0,2 \text{ А}$ .

Поэтому  $P_{\text{кл.макс}} = 9,6 \cdot 0,2 = 1,92 \text{ Вт}$ .

5. Выбираем тип регулирующего транзистора. При выборе необходимо выполнить условия:

$$I_{\text{к.эл.макс}} \approx I_{\text{вых}} \leq I_{\text{к.эл.макс.доп}}; \quad (2.6)$$

$$U_{\text{к.эл.макс}} \leq U_{\text{к.эл.макс.доп}}; \quad (2.7)$$

$$P_{\text{кл.макс}} \leq P_{\text{кл.макс.доп}}. \quad (2.8)$$

По справочнику [3, 5] выбираем транзистор  $T_1$  типа КТ814А с такими параметрами: статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером  $h_{2,1\text{э.мин}} = 40$ , максимально допустимое постоянное напряжение коллектор – эмиттер ( $I_{\text{б}} = 0$ )  $U_{\text{к.э.макс}} = 25 \text{ В}$ ; максимально допустимый постоянный ток коллектора  $I_{\text{к.макс}} = 1,5 \text{ А}$ ; максимально допустимая рассеиваемая постоянная мощность (с теплоотводом)  $P_{\text{к.макс}} = 10 \text{ Вт}$ .

Таким образом, для выбранного транзистора КТ814А условия (2.6)–(2.8) выполняются.

6. Выбираем тип согласующего транзистора  $T_2$ . Транзистор  $T_2$  предназначен для согласования большого выходного сопротивления

(порядка 10 кОм) усилителя постоянного тока, собранного на транзисторе  $T_3$ , с малым входным сопротивлением (порядка 10 Ом) регулирующего транзистора  $T_1$ . Кроме того, транзисторы  $T_1$  и  $T_2$ , образуя составной транзистор, имеют общий коэффициент усиления по току:

$$h_{2.1э.общ} = h_{2.1э1}(T_1) \cdot h_{2.1э1}(T_2), \quad (2.9)$$

где  $h_{2.1э1}(T_1)$  и  $h_{2.1э1}(T_2)$  – коэффициенты передачи тока транзисторов  $T_1$  и  $T_2$ .

Большой статический коэффициент передачи тока  $h_{2.1э.общ}$  позволяет значительно повысить коэффициент стабилизации схемы по напряжению.

$$I_{к2} \approx I_{э2} = I_{б1},$$

где  $I_{к2}$  и  $I_{э2}$  – токи коллектора и эмиттера транзистора  $T_2$ ;

$I_{б1}$  – ток базы транзистора  $T_1$ .

Учитывая, что

$$I_{б1} = I_{к1} / h_{2.1э}(T_1) \approx I_{вых} / h_{2.1э}(T_1) = 200 / 40 = 5 \text{ мА}, \quad (2.10)$$

получим  $I_{к2} \approx 5 \text{ мА}$ .

Кроме того,

$$U_{к.э2.макс} \approx U_{к.э1.макс} = 9,6 \text{ В}. \quad (2.11)$$

Таким образом, мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора  $T_2$ , составляет

$$P_{к2.макс} \approx U_{к.э2.макс} \cdot I_{к2} = 9,6 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 48 \text{ мВт}. \quad (2.12)$$

7. Выбираем транзистор  $T_2$  типа КТ502А с параметрами: статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером  $h_{2.1э.мин} = 40$ ; максимально допустимое постоянное напряжение коллектор – эмиттер  $U_{к.э2.максдоп} = 25 \text{ В}$ ; максимально допустимый ток коллектора  $I_{к.макс.доп} = 300 \text{ мА}$ , максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность коллектора  $P_{к2.макс.доп} = 500 \text{ мВт}$ .

Поскольку  $P_{к2.макс} = 48 \text{ мВт} \leq P_{к2.макс.доп} = 500 \text{ мВт}$ , транзистор  $T_2$  выбран правильно.

Выбираем тип кремниевого стабилитрона. В качестве источника опорного напряжения обычно используют стабилитрон, который должен иметь номинальное напряжение стабилизации

$$U_{\text{ст.ном}} \approx (0,6 - 0,7) \cdot U_{\text{вых}} = (0,6 - 0,7) \cdot 12 = (7,2 - 8,4) \text{ В.} \quad (2.13)$$

По справочнику [3, 5] выбираем стабилитрон типа Д808, у которого

$$U_{\text{ст.ном}} = 7,75 \text{ В}, \Delta U_{\text{ст}} = \pm 0,75 \text{ В.}$$

8. Находим коэффициент деления напряжения делителем  $R_2, R_3, R_4$ :

$$\alpha \approx U_{2\text{вых}} / U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}} / U_{\text{вых}} \approx 0,65 \text{ В.} \quad (2.14)$$

9. Выбираем тип управляющего (усилительного) транзистора  $T_3$ .

На транзисторе  $T_3$  собран усилитель, который должен реагировать на самые незначительные колебания выходного напряжения и усиливать их до величины, достаточной для управления регулирующим транзистором. Поэтому управляющий транзистор должен обеспечить достаточное усиление сигнала по напряжению. При выборе транзистора необходимо обратить внимание на величину коллекторного тока  $I_{\text{кз}}$ . Этот ток должен быть по возможности небольшим, но всегда превышать ток базы согласующего транзистора  $T_2$ . Обычно величина тока  $I_{\text{кз}}$  выбирается в пределах 0,5–2 мА. Требуемое значение коэффициента усиления по напряжению для управляющего транзистора можно найти по формуле [3]

$$K_{3(u)\text{трб}} = \Delta U_{\text{вх}} \cdot 100 / U_{\text{вых}} \cdot (\Delta U_{\text{облх}}^+ + \Delta U_{\text{облх}}^-) \cdot \alpha, \quad (2.15)$$

где  $\Delta U_{\text{вх}} = U_{\text{вх.макс}} - U_{\text{вх.мин}} = 19,6 - 16 = 3,6 \text{ В.}$

Подставляя в формулу (2.15) численные значения, получим:

$$K_{3(u)\text{трб}} = 3,6 \cdot 100 / 12 \cdot (0,2 + 0,2) \cdot 0,65 = 115.$$

Наиболее часто в качестве управляющих используются мало-мощные и средней мощности низкочастотные и среднечастотные транзисторы. Выбираем опять транзистор КТ502А. Определяем фактический коэффициент усиления каскада на этом транзисторе. Для этого можно воспользоваться формулой

$$K_{3(u)\text{расч}} = \Delta I_{\text{кз}} \cdot R_1 / \Delta U_{\text{б.эз}}, \quad (2.16)$$

где  $\Delta I_{кз} / \Delta U_{б.эз} = S_3$  – крутизна характеристики транзистора  $T_3$  (число, показывающее, на сколько миллиампер изменяется коллекторный ток при изменении напряжения между базой и эмиттером транзистора на один вольт);  $R_1$  – сопротивление нагрузки в цепи коллектора транзистора  $T_3$ .

Для транзисторов средней мощности диапазона средних частот, используемых в схемах стабилизаторов напряжения, значение крутизны лежит в пределах  $S_3 = (20 \div 40) \text{ мА/В}$ .

Принимаем

$$S_3 = 30 \text{ мА/В}.$$

Сопротивление  $R_1$  может быть найдено по формуле

$$R_1 = 0,5 \cdot U_{к.эл.мин} \cdot h_{21э}(T_1) \cdot h_{21э}(T_2) / I_{вых} = 0,5 \cdot 2 \cdot 40 \cdot 40 / 0,2 = 8 \text{ кОм}$$

Принимаем  $R_1 = 8,2 \text{ кОм}$ .

Мощность, рассеиваемая на резисторе  $R_1$ , составляет

$$P_{R1} \approx (I_{кз})^2 R_1 = (2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 8,2 \cdot 10^3 \approx 33 \text{ мВт}. \quad (2.17)$$

В качестве резистора  $R_1$  можно использовать резистор типа МЛТ – 0,125. Таким образом,

$$K_{3(u)расч} = 30 \cdot 10^{-3} \cdot 8,2 \cdot 10^3 = 246 > K_{3(u)треб} = 115.$$

Определим величину мощности, рассеиваемой на коллекторе транзистора  $T_3$ :

$$P_{кз.макс} = U_{кз.макс} I_{кз}. \quad (2.18)$$

Принимая

$$U_{кз.макс} = U_{вых} + \Delta U_{вых} - U_{оп} = 12 + 2 - 7,5 = 6,25 \text{ В} \quad (2.19)$$

и  $I_{кз} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ ,

получим

$$P_{кз.макс} = 6,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,0125 \text{ ВВ} < P_{кз.макс.доп} = 0,5 \text{ ВВ}.$$

Следовательно, транзистор выбран правильно.

10. Определим величины сопротивлений резисторов и емкости конденсаторов схемы. Сопротивление нагрузки в цепи коллектора транзистора  $T_3 = 8,2 \text{ кОм}$ . Найдем сопротивление выходного делите-

ля. Ток делителя  $I_d$  обычно выбирают на один-два порядка выше тока базы управляющего транзистора  $T_3$ . Ток базы транзистора  $T_3$  можно найти по формуле

$$I_{62} = I_{k3} / h_{2.13}(T_3) = 2 \cdot 10^{-3} / 40 = 0,05 \text{ мА}. \quad (2.20)$$

Выбирая ток делителя  $I_d = 5 \text{ мА}$ , найдем общее сопротивление делителя:

$$R_d = R_2 + R_3 + R_4 = U_{\text{вых}} / I_d = 2,4 \text{ кОм}. \quad (2.21)$$

В соответствии с заданием выходное напряжение стабилизатора должно регулироваться в пределах  $\pm 2 \text{ В}$ . Учитывая также, что напряжение стабилизации стабилитрона Д808 может меняться в пределах 7–8,5 В, определим сопротивление нижнего плеча делителя для критических значений  $U_{\text{оп}}$  и  $U_{\text{вых}}$ :

$$(R_{d.n})_{\text{мин}} = R_d \cdot U_{\text{оп.мин}} / U_{\text{вых}} + \Delta U_{\text{вых}} = R_4 = 2,4 \cdot 10^3 \cdot 7 / 12 + 2 = 1,2 \text{ кОм}; \quad (2.22)$$

$$(R_{d.n})_{\text{макс}} = R_d \cdot U_{\text{оп.макс}} / U_{\text{вых}} - \Delta U_{\text{вых}} = R_4 = 2,4 \cdot 10^3 \cdot 8,5 / 12 - 2 = 2 \text{ кОм}. \quad (2.23)$$

Величины сопротивлений  $R_2$  и  $R_3$  составляют:

$$R_3 = (R_{d.n})_{\text{макс}} - (R_{d.n})_{\text{мин}} = 2 - 1,2 = 0,8 \text{ кОм};$$

$$R_2 = R_d - (R_{d.n})_{\text{макс}} = 2,4 - 2 = 0,4 \text{ кОм} = 400 \text{ Ом}. \quad (2.24)$$

Полученные значения сопротивлений делителя соответствуют стандартным величинам, поэтому окончательно принимаем:  $R_2 = 390 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 820 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 1,2 \text{ кОм}$  (тип резисторов  $R_3$  и  $R_4$  – МЛТ–0,125, а  $R_2$  – СПЗ–4аМ).

Сопротивление  $R_5$  выбирается следующим образом. Поскольку

$$I_{62(T_3)} = I_{k(T_3)} / h_{2.13}(T_3) = 2 \cdot 10^{-3} / 40 = 0,05 \text{ мА},$$

воспользуемся расчетными данными [7]. Очевидно, что следует выбрать резистор с сопротивлением  $R_5 = 620 \text{ Ом}$ , тип резистора МЛТ–0,25.

Для увеличения быстродействия стабилизатора используется емкостная связь между выходом стабилизатора и входом усилителя, собранного на транзисторе  $T_3$ . С этой целью в схему стабилизатора включают конденсатор  $C_1$ . Величина емкости этого конденсатора выбирается порядка единиц – десятков микрофарад. Например, для рас-

считываемой схемы можно использовать электролитический конденсатор К50-6 емкостью 10 мкФ с рабочим напряжением 16 В.

Конденсатор  $C_2$  служит для повышения устойчивости стабилизатора и одновременно позволяет уменьшить выходное сопротивление схемы. Емкость конденсатора  $C_2$  выбирается порядка 1000–2000 мкФ. Для этого можно, например, использовать электролитический конденсатор К50-6 емкостью 1000 В с рабочим напряжением 25 В.

11. Находим коэффициент стабилизации стабилизатора по формуле

$$K_{ст(u)расч} = \alpha \cdot K_{з(u)расч} \cdot U_{вых} / U_{вх} = 0,65 \cdot 115 \cdot 12 / 17,8 \approx 50,3.$$

Таким образом, коэффициент стабилизации рассчитываемого стабилизатора больше требуемого, так как

$$K_{ст(u)расч} = 50,3 > K_{ст(u)треб} = 50.$$

12. КПД стабилизатора в номинальном режиме находится по формуле

$$\eta = U_{вых} \cdot I_{вых} / U_{вх} \cdot I_{вх}, \quad (2.25)$$

где  $I_{вх} = I_{вых} + I_{ст.макс} + I_{д} = 200 + 33 + 5 = 238 \text{ мА}$ .

Таким образом,

$$\eta = 12 \cdot 200 \cdot 10^{-3} / 17,8 \cdot 238 \cdot 10^{-3} \approx 0,567 (56,7\%).$$

Для нормального теплоотвода от транзистора  $T_1$  необходимо рассчитать ребристый радиатор. Пользуясь уже упоминавшейся формулой и зная, что коллектор транзистора  $T_1$  рассеивает мощность  $P_{кл} = 2 \text{ Вт}$ , определим суммарную площадь одних сторон всех пластин:

$$S = 40P = 40 \cdot 2 = 80 = 5 \cdot 4 \cdot 4 \text{ см}^2.$$

Таким образом, необходим радиатор с пятью ребрами и площадью одной стороны каждого ребра  $4 \cdot 4 = 16 \text{ см}^2$ .

### **Контрольные вопросы к второму разделу «Стабилизаторы напряжения»**

1. Назначение стабилизаторов постоянного напряжения и область применения.
2. Назначение и принцип работы параметрического стабилизатора напряжения.

3. Назначение и принцип работы компенсационного стабилизатора напряжения.
4. Назначение контура ОС в стабилизаторе напряжения.
5. Чем определяется коэффициент стабилизации схемы по напряжению?
6. Каким образом влияет коэффициент усиления ОУ на коэффициент стабилизации  $K_{ст}$ ?
7. Что используется в качестве источника опорного напряжения в компенсационном стабилизаторе и по каким причинам?
8. Почему стабильность  $U_0$  очень высока?
9. Каким должен быть ток  $I_{кз}$  относительно тока базы согласующего транзистора  $T_2$ ?
10. С какими характеристиками (по мощности и частоте) выбираются транзисторы для целей управления?
11. Что используется и подключается в схему стабилизатора для увеличения его быстродействия?



### 3. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ (ПЛК)

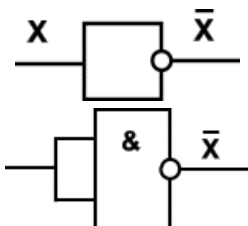
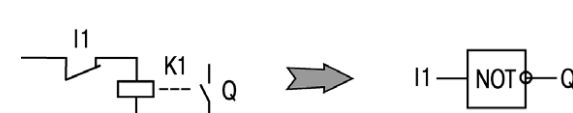
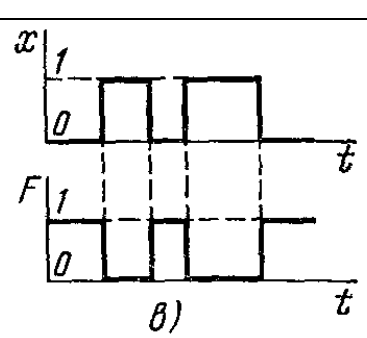
#### 3.1. Математические основы логической алгебры и программирования

Математической основой цифровой электроники и программирования на ПЛК (программируемые логические контроллеры) или ПР (программируемое реле) является логическая алгебра Буля.

Логическая переменная может обозначать любую физическую величину. В алгебре Буля определены следующие логические операции (элементы) (табл. 3.1):

Таблица 3.1

Логические элементы

№ п/п	Выражение логическое	Таблица истинности	Условное графическое обозначение элемента						
1.	Элемент «НЕ»: Инверсия: $Y = \bar{X}$	<table><tr><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	X	Y	0	1	1	0	
	X	Y							
0	1								
1	0								
Схема контактного эквивалента элемента	Временная диаграмма								
									

2	Выражение логическое	Таблица истинности	Условное графическое обозначение элемента																		
	Элемент «ИЛИ» Логическое сложение	<table><tr><td>X</td><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	X	X	Y	1	2		0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	<div><div><div><div>X1</div><div>X2</div></div><div>1</div><div>X1+X2</div></div><div>на основе правила Шеннона де Моргана</div><div><div><div>X1</div><div>&amp;</div><div>○</div></div><div><div>X2</div><div>&amp;</div><div>○</div></div><div><div>&amp;</div><div>X1+X2</div></div></div><div><div><div>I1</div><div>I2</div></div><div>Q</div></div><div><div>I1</div><div>I2</div><div>OR</div><div>Q</div></div><div><div>V1+V2=Q</div><div><div>V1</div><div>V2</div><div>ADD</div><div>Q</div></div></div><div><div>V1-V2=Q</div><div><div>V1</div><div>V2</div><div>SUB</div><div>Q</div></div></div></div>
	X	X	Y																		
1	2																				
0	0	0																			
0	1	1																			
1	0	1																			
1	1	1																			
Схема контактного эквивалента элемента	Временная диаграмма																				
<div><div>SA1</div><div>SA2</div><div>Л1</div></div>	<div><div><div>x1</div><div>1</div><div>0</div></div><div><div>x2</div><div>1</div><div>0</div></div><div><div>F</div><div>1</div><div>0</div></div></div> <div><div>t</div><div>t</div><div>t</div></div>																				

3.	<b>Выражение логическое</b>	<b>Таблица истинности</b>	<b>Условное графическое обозначение элемента</b>															
	Элемент «И» логическое умножение или конъюнкция: $Y = X1 \cdot X2 = X1 \& X2$	<table><tr><td>X</td><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	X	X	Y	1	2		0	0	0	0	1	0	1	1	1	
	X	X	Y															
1	2																	
0	0	0																
0	1	0																
1	1	1																
<b>Схема контактного эквивалента элемента</b>	<b>Временная диаграмма</b>																	
4.	<b>Выражение логическое</b>	<b>Таблица истинности</b>	<b>Условное графическое обозначение элемента</b>															
	Элемент «И-НЕ»	<table><tr><td>X</td><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	X	X	Y	1	2		0	0	1	0	1	1	1	1	0	
X	X	Y																
1	2																	
0	0	1																
0	1	1																
1	1	0																

	Выражение логическое	Таблица истинности	Условное графическое обозначение элемента																	
	Элемент «ИЛИ-НЕ»	<table><tr><td>X</td><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td></td></tr></table>	X	X	Y	1	2		0	0	1	0	1	0	1	1				
X	X	Y																		
1	2																			
0	0	1																		
0	1	0																		
1	1																			
5.	Элемент «ИЛИ-НЕ»	<table><tr><td>X</td><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td></td></tr></table>	X	X	Y	1	2		0	0	1	0	1	0	1	1				
X	X	Y																		
1	2																			
0	0	1																		
0	1	0																		
1	1																			
6.	Выражение логическое	Таблица истинности	Условное графическое обозначение элемента																	
	Элемент «исключающее ИЛИ» $Y = X1 + X2 = X1 * \overline{X2} + \overline{X1} * X2$ элемент неравнозначности	<table><tr><td>X</td><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td></td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	X	X	Y	1	2		0	0	0	0	1	1	1		1	1	1	0
X	X	Y																		
1	2																			
0	0	0																		
0	1	1																		
1		1																		
1	1	0																		

	<b>Выражение логическое</b>	<b>Таблица истинности</b>	<b>Условное графическое обозначение элемента</b>																																				
7.	<b>«исключающее ИЛИ-НЕ»</b> $Y = \overline{X1 + X2} =$ $= \overline{X1} * \overline{X2} +$ $+ X1 * X2$ элемент равно- значности	<table><tr><td>X</td><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	X	X	Y	1	2		0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1																			
X	X	Y																																					
1	2																																						
0	0	1																																					
0	1	0																																					
1	0	0																																					
1	1	1																																					
8.	<b>Выражение логическое</b>  Мажоритарный логический эле- мент или схема голосования. $Y = 1$ – когда на входе единиц больше, чем ну- лей	<table><tr><td>X</td><td>X</td><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	X	X	X	Y	1	2	3		0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	
X	X	X	Y																																				
1	2	3																																					
0	0	0	0																																				
0	0	1	0																																				
0	1	0	0																																				
1	0	0	0																																				
1	0	1	1																																				
1	1	0	1																																				
1	1	1	1																																				
	Основные тождества алгебры Буля																																						
9.	<b>Выражение логическое</b>  Разомкнутый контакт эквива- лентен логиче- скому 0, замкну- тый – 1 $X*0 = 0$																																						
10.	<b>Выражение логическое</b>  $X*1 = X$																																						

	Выражение логическое	Условное графическое обозначение элемента
11.	$X + 0 = X$	

Таблица истинности ставит в соответствие определенной комбинации входных переменных заданное значение логической функции.

Логические элементы «И-НЕ» и «ИЛИ-НЕ» являются универсальными, или базовыми элементами. С их помощью можно реализовать любой другой более сложный логический элемент или устройство (в том числе триггеры, счетчики, дешифраторы и др.) (рис. 3.1) [1].

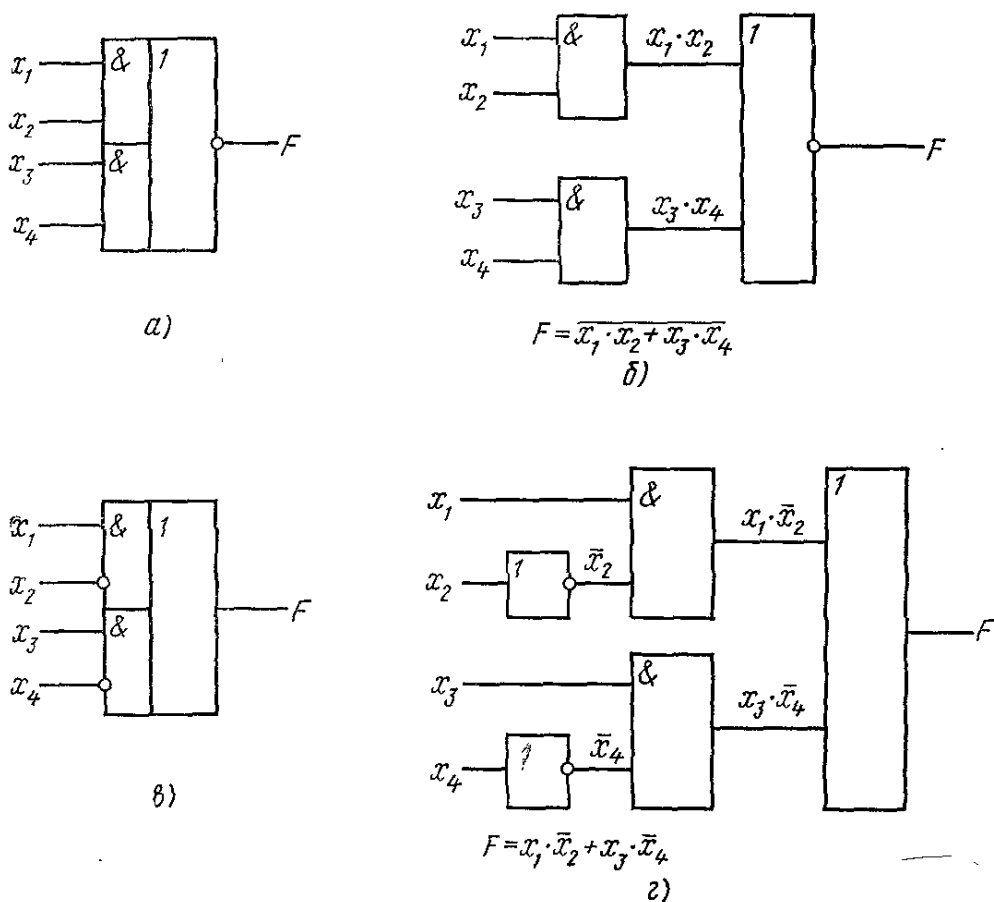


Рис. 3.1. Схемы логического элемента 2И-ИЛИ-НЕ (а) и его функциональный элемент (б), схема логического элемента 2И-ИЛИ (в) и его функциональный элемент (г)

### Законы, аксиомы, тождества и теоремы алгебры логики

В алгебре логики любая переменная может иметь состояние логического «0» или логической «1». В алгебре логики в случае одной переменной  $x$  действуют следующие правила (аксиомы):

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| 1) $X + 0 = X$ ,                                       | 6) $X \cdot 0 = 0$ ,             |
| 2) $X + 1 = 1$ ,                                       | 7) $X \cdot 1 = X$ ,             |
| 3) $X + X = X$ ,                                       | 8) $X \cdot X = X$ ,             |
| 4) $X + \bar{X} = 1$ ,                                 | 9) $X \cdot \bar{X} = 0$ ,       |
| 5) $(\bar{X}) = \bar{X}$ ,                             | 10) $(\overline{\bar{X}}) = X$ , |
| 11) $X1 \cdot (X2 + X3) = X1 \cdot X2 + X1 \cdot X3$ , |                                  |
| 12) $X1 + X1 \cdot X2 = X1$ ,                          |                                  |
| 13) $X1 + \bar{X1} \cdot X2 = X1 + X2$ ,               |                                  |
| 14) $\overline{X1 + X2} = \bar{X1} \cdot \bar{X2}$     |                                  |

Переместительный закон (закон коммутативности):

- 1)  $x + y = y + x$ ,
- 2)  $x \cdot y = y \cdot x$ .

Сочетательный закон (закон ассоциативности):

- 1)  $x + y + z = (x + y) + z = x + (y + z)$ ,
- 2)  $x \cdot y \cdot z = (x \cdot y) \cdot z = x \cdot (y \cdot z)$ .

Распределительный закон (закон дистрибутивности):

$$x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z.$$

Для преобразований полезными являются тождества:

- 1)  $x\bar{y} + x\bar{y} = x$ , 1)  $x(\bar{x} + y) = xy$ ,
- 2)  $x + xy = x$ , 2)  $(x + y)(x + z) = x + yz$ ,
- 3)  $x(x + y) = x$ , 3)  $x\bar{y} + y = x + y$ .

Теоремы де Моргана:

$$\overline{x + y + z} = \bar{x} \cdot \bar{y} \cdot \bar{z},$$

т.е. инверсия суммы переменных есть произведение их инверсий

$$\overline{x \cdot y \cdot z} = \bar{x} + \bar{y} + \bar{z},$$

т.е. инверсия произведения переменных есть сумма их инверсий.

Запись логической функции в виде суммы произведений переменных называют дизъюнктивной нормальной формой (ДНФ):

$$x + \bar{y}z + x\bar{y}z + \bar{x}yz,$$

а запись функции в виде произведения сумм – конъюнктивной нормальной формой (КНФ):

$$x(x + y)(y + z)(\bar{x} + y + z).$$

Инверсия любой функции, записанной в дизъюнктивной (конъюнктивной) нормальной форме, дает замену записи на конъюнктивную (дизъюнктивную) нормальную форму. Например инверсия функции

$$F = x + \bar{y}z + x\bar{y}z$$

имеет вид

$$\bar{F} = \bar{x}(y + \bar{z})(\bar{x} + y + \bar{z}).$$

Логическую функцию, заданную любым аналитическим выражением, можно преобразовать к ДНФ или КНФ, пользуясь правилами алгебры логики.

### Способы расчета логических схем

1. **Первый способ:** с помощью таблицы истинности.

Например, табл. 3.2 «Таблица истинности» следующего вида:

Таблица 3.2

Таблица истинности

X1	X2	X3	Y
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1



## 2. Второй способ: временные диаграммы.

Например, временная диаграмма, характеризующая алгоритмы работы элементов логической схемы, показана на рис. 3.2:

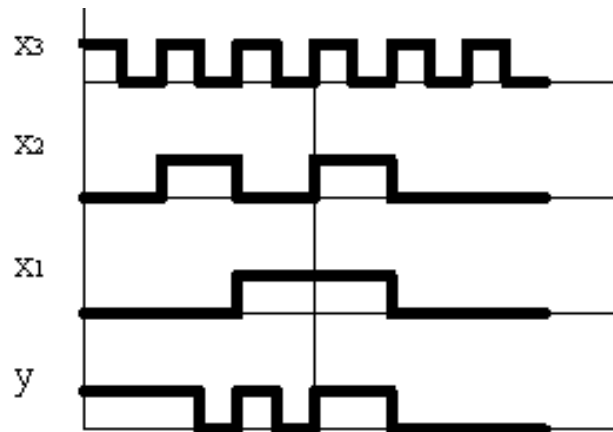


Рис. 3.2. Временная диаграмма логической схемы

## 3. Третий способ: с помощью логического выражения.

$$Y = \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 X_2 X_3$$

4. Четвёртый способ: минимизация логической функции с помощью карты Карно (рис. 3.3). Она представляет собой графическое изображение значений всех возможных комбинаций переменных.

		$xy$			
		00	01	11	10
$zv$	00				
	01				
	11				
	10				

Рис. 3.3. Карта Карно

Любой алгоритм работы логической схемы (электрической принципиальной) можно представить таблицей истинности (табл. 3.3) например вида:

Таблица 3.3

№ комбинации	x	y	z	F
1	0	0	0	0
2	0	0	1	1
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	1	0	0	0
6	1	0	1	0
7	1	1	0	1
8	1	1	1	1

Представление логической функции в виде суммы минтермов определяет ее совершенную дизъюнктивную нормальную форму (СДНФ), т.е. в данном случае

$$F = \overline{x}y\overline{z} + xy\overline{z} + xyz.$$

Минтермами называют комбинации переменных, при которых функция истина. В нашем случае

$$F = 1; \overline{x}y\overline{z} = 1; xy\overline{z} = 1; xyz = 1.$$

Функция, определяемая таблицей истинности, может быть представлена не только ее единичными, но и нулевыми значениями ( $F = 0$  или  $\overline{F} = 1$ ), тогда

$$\overline{F} = \overline{x}y\overline{z} + \overline{x}y\overline{z} + \overline{x}yz + x\overline{y}\overline{z} + x\overline{y}z.$$

Воспользовавшись законом инверсии, приходим к записи функции в совершенной конъюнктивной нормальной форме (СКНФ):

$$\overline{F} = (x + y + z)(x + \overline{y} + z)(x + \overline{y} + \overline{z})(\overline{x} + y + z)(\overline{x} + y + \overline{z}).$$

Каждый сомножитель состоит из суммы переменных, для которых функция обращается в ноль в соответствии с таблицей истинности. Такие суммы называют конституентами нуля, или макстермами, а произведение макстермов определяет СКНФ-функции [2, 4].

Далее полученную функцию как важную операцию при синтезе логической схемы необходимо минимизировать, т.е. упростить форму, что позволяет реализовать схему с наименьшим числом элементов и повысить надежность работы логической программы ПЛК.

Выявлять и устранять избыточность в записи функции можно путем ее преобразования с использованием аксиом, законов, тождеств и теорем алгебры логики.

Для минимизации функции с числом переменных до пяти-шести наиболее удобным является метод карт Карно.

Процесс минимизации на примере четырех переменных  $x, y, z, u$  функции, заданной следующим логическим выражением:

$$F = yzu + \bar{x}yu + \bar{y}zu + \bar{x}yz + x\bar{z}u + \bar{y}\bar{z}\bar{u} + \bar{y}z\bar{u}.$$

С помощью простейших преобразований представим эту функцию в виде

$$\begin{aligned} F &= yzu(x + \bar{x}) + \bar{x}yu(z + \bar{z}) + \bar{y}zu(x + \bar{x}) + \bar{x}yz(u + \bar{u}) + \\ &\quad + x\bar{z}u(y + \bar{y}) + \bar{y}\bar{z}\bar{u}(x + \bar{x}) + \bar{y}z\bar{u}(x + \bar{x}) = \\ &= xyzu + \bar{x}yzu + \bar{x}yzu + \bar{x}\bar{y}zu + x\bar{y}zu + \bar{x}\bar{y}zu + \bar{x}\bar{y}zu + \\ &\quad + \bar{x}yz\bar{u} + xy\bar{z}\bar{u} + x\bar{y}\bar{z}\bar{u} + x\bar{y}\bar{z}\bar{u} + \bar{x}\bar{y}\bar{z}\bar{u} + x\bar{y}\bar{z}\bar{u} \end{aligned}$$

После исключения повторяющихся членов функция выражается в СДНФ:

$$\begin{aligned} F &= xyzu + \bar{x}yzu + \bar{x}yzu + \bar{x}\bar{y}zu + x\bar{y}zu + \bar{x}\bar{y}zu + \bar{x}yz\bar{u} + \\ &\quad + xy\bar{z}\bar{u} + x\bar{y}\bar{z}\bar{u} + \bar{x}\bar{y}\bar{z}\bar{u} + x\bar{y}\bar{z}\bar{u} + \bar{x}\bar{y}\bar{z}\bar{u} \end{aligned}$$

		$xy$			
		$00$	$01$	$11$	$10$
$zu$	$00$	1			1
	$01$	1	1	1	1
	$11$	1	1	1	1
	$10$		1		

Рис. 3.4. Карта Карно

Карта Карно (рис. 3.4) позволяет минимизировать функцию КНФ по нулевым значениям минермов, находящихся в пустых клетках

карты рис. 3.4 и определяющих нулевое значение функции, т.е. ее инверсное значение  $\bar{F}$ . Порядок проведения минимизации сохраняется прежним. Минимизируя контуры, охватывающие соседние клетки с нулевым значением минтернов рассматриваемой функции, показаны на рис. 3.4 пунктиром [2, 4]. Из карты Карно находим:

$$F = \overline{xyzi} + \overline{yzi} + \overline{xzi} + \overline{xui}.$$

Воспользовавшись инверсным преобразованием, находим минимальную функцию, выраженную в КНФ, равносильную ДНФ:

$$F = (x + y + \bar{z} + u)(\bar{y} + z + u)(\bar{x} + \bar{z} + u)(\bar{x} + \bar{y} + u).$$

Реализация функции в ДНФ требует преимущественного использования логических элементов И (И-НЕ), а в КНФ – логических элементов ИЛИ (ИЛИ-НЕ).

При использовании элементов И (И-НЕ) логическую функцию целесообразно представить в виде произведения переменных, а при использовании логических элементов ИЛИ (ИЛИ-НЕ) – в виде суммы переменных [1]. Задача решается правилом двойной инверсии и теоремой де Моргана. Для рассматриваемой функции соответственно имеем:

$$F = \overline{\overline{\bar{x}} \overline{y} \overline{z} \overline{\bar{y}} \overline{\bar{z}} \overline{\bar{u}}},$$

$$F = \overline{x + y + \bar{z} + u + \bar{y} + z + u + \bar{x} + z + u + \bar{x} + \bar{y} + u},$$

нахождение логической функции и последующую минимизацию применяют при проектировании логических схем программирования комбинационного типа.

На основе проведенных операций получили функцию, выраженную в ДНФ:

$$F = \overbrace{\overbrace{\bar{x}y}^1 z}^2 + \bar{y}\bar{z} + u.$$

На основе полученной функции строим логическую схему (алгоритм управления выходом реле или ПЛК  $F$ ) (рис. 3.5).

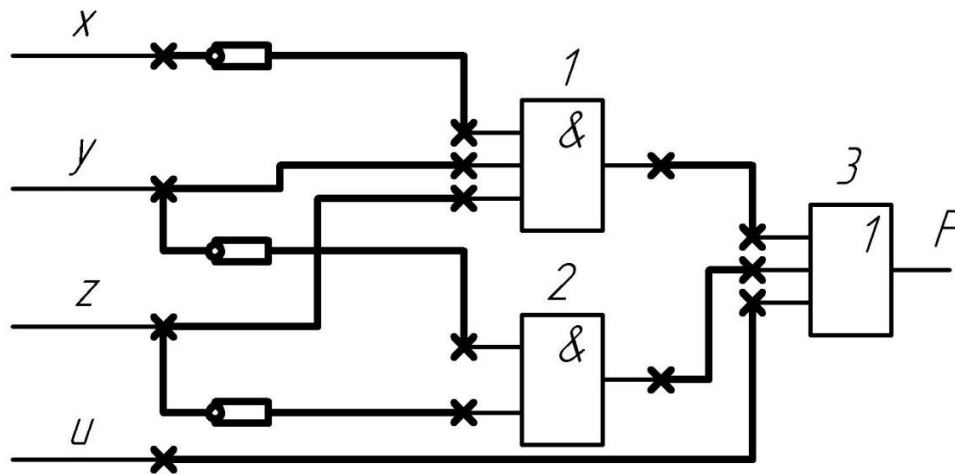


Рис. 3.5. Логическая схема

С учетом особенностей среды программирования, например для OWEN Logic, логическая схема будет выглядеть следующим образом (рис. 3.6):

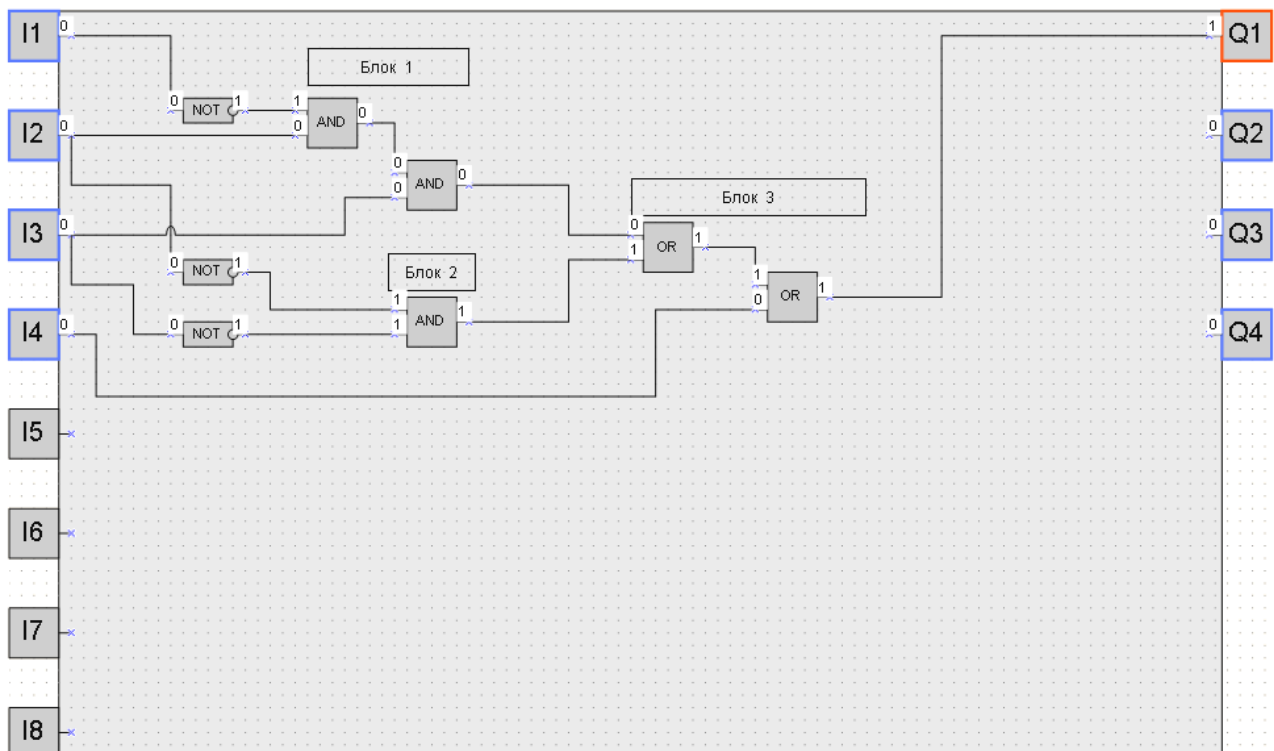


Рис. 3.6. Программа в OWEN Logic

Например, для ONI PLR Studio (рис. 3.7):

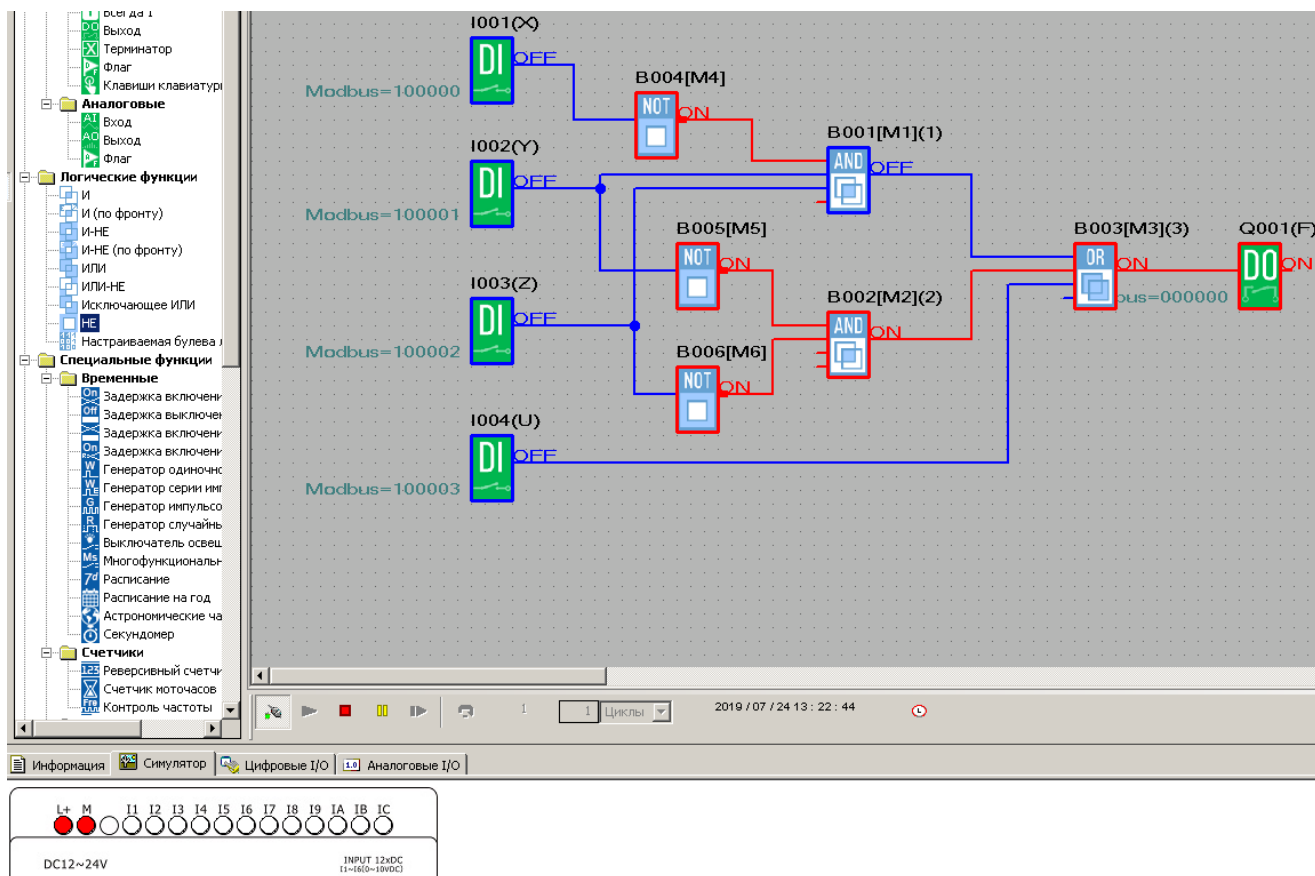


Рис. 3.7. Программа в ONI PLR Studio

Эта особенность связана с отличиями в наименовании блоков и их функциональных возможностях.

Таким образом, составляя логические функции и строя по ним логические схемы, можно реализовать практически любой алгоритм на программируемом реле или ПЛК.

Другим подходом к решению задачи программирования является решение задачи «в лоб», т.е. путем анализа входных и выходных переменных с помощью вербальных конструкций, отражением которых может быть либо Fals, либо True. Другими словами, подход предполагает перебор всех возможных вариантов, т.е. операций. Но если объем данных большой, это слишком дорогое удовольствие, поэтому разработаны приемы сокращения перебора, которые описаны выше. Все возможные воздействия на результат, а также взаимосвязи результата с работой смежных алгоритмов одной системы управления необходимо просчитывать и хранить в уме.

Такой подход к решению задачи программирования подходит при соблюдении следующих условий:

1. Число анализируемых входов и выходов программируемого реле – не более 8.

2. Решение задачи автоматизации объекта путем разработки алгоритма выполняет квалифицированный специалист (наличие базовых знаний и опыта разработки алгоритмов).

Основным недостатком метода является отсутствие единого упорядоченного подхода к разработке программы по алгоритму, а следовательно, значительное увеличение времени при появлении новых алгоритмов для реализации. Программа, вероятнее, будет избыточна и, возможно, будут упущены взаимосвязанные переменные.

Метод показывает хорошие результаты только на простых или однотипных алгоритмах.

### **3.2. Работа с программой OWEN Logic и разработка программы для реле OWEN**

Среда программирования OWEN Logic предназначена для реализации алгоритмов работы оборудования в электромеханических системах автоматизации процессов. Основой таких систем являются программируемые реле или ПЛК. Реле являются универсальными устройствами, способными управлять автоматическими, автоматизированными и полуавтоматизированными системами в реальном режиме времени с функциями защиты и контроля технологических параметров. При использовании ПЛК или ПР требуется меньше переключающих устройств для решения ряда задач малой автоматизации, что снижает затраты на проектирование и изготовление систем, а также повышает их надежность.

В связи с реализованной в среде функцией симуляции при отсутствии связи с реле одновременно можно работать только с одним проектом. Таким образом, отладку проекта и проведение испытаний алгоритма можно проводить в отсутствие подключенного к компью-

теру оборудования (ПР). Это дает убедительное представление о работоспособности алгоритма и предотвращает возможность повреждения реального оборудования.

Рекомендуемая последовательность операций при разработке проекта в среде OWEN Logic:

- 1) установка среды программирования OWEN Logic на ПК;
- 2) запуск среды программирования;
- 3) создание нового проекта (для конкретной модели ПР/ПЛК) или открытие существующего проекта для редактирования;
- 4) сохранение проекта на жестком диске ПР/ПЛК;
- 5) отладка проекта в режиме симуляции;
- 6) загрузка проекта в ПР/ПЛК.

Среда разработки проектов OWEN Logic является русскоязычной и оснащена справочной системой на русском языке с примерами.

### **3.3. Практические примеры выполнения индивидуальных заданий**

#### **Пример № 1 к заданию № 3.3.1**

По таблице истинности четырех переменных (I1, I2, I3, I4):

- 1) составить и упростить логическую схему;
  - 2) составить карту Карно;
  - 3) начертить логическую схему, реализующую данную логическую функцию;
  - 4) написать программу в среде OWEN Logic;
  - 5) написать программу в среде ONI PLR Studio.
- Схему строить на элементах «И-НЕ».

#### **Выполнение задания**

##### **1. Составим по таблице логическую функцию и упростим ее**

На основе аксиом выведены теоремы, содержащие основные законы АЛ.



Воспользуемся конъюнктивной нормальной формой записи функции (запись по «по полям», т.е. функция составляется по значениям  $F=\langle 0 \rangle$ ) с учетом вышепредставленных законов АЛ, позволяющих сократить и упростить полученную функцию:

$$\begin{aligned}
 Q &= (I_1 + \bar{I}_2 + I_3 + I_4)(I_1 + \bar{I}_2 + I_3 + \bar{I}_4)(I_1 + I_2 + \bar{I}_3 + I_4)(\bar{I}_1 + I_2 + \bar{I}_3 + \bar{I}_4) \times \\
 &\quad \times (\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + I_3 + I_4)(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 + I_4) = (I_1 + \bar{I}_2 + I_3)(I_1 + I_2 + \bar{I}_3) \times \\
 &\quad \times (\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + I_3 + I_4)(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 + I_4) = (I_1 I_2 + I_1 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 I_3 + I_2 I_3) \times \\
 &\quad \times (\bar{I}_1 + \bar{I}_1 I_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_1 I_4 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_2 + \bar{I}_2 I_3 + \bar{I}_3 I_4 + \bar{I}_1 \bar{I}_3 + \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_3 I_4 + \bar{I}_1 I_4 + \\
 &\quad + \bar{I}_2 I_4 + I_3 I_4) = (I_1 I_2 + I_1 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 I_3 + I_2 I_3)(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + I_3 I_4 + \bar{I}_3 \bar{I}_4) = \\
 &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 I_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 I_3 + I_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 I_3 + I_1 I_2 I_3 I_4 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 I_3 I_4 + \\
 &+ \bar{I}_1 I_3 I_4 + I_2 I_3 I_4 + I_1 I_2 \bar{I}_3 \bar{I}_4 + I_1 I_3 \bar{I}_4 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 \bar{I}_4 + \bar{I}_2 \bar{I}_3 \bar{I}_4 = \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_1 I_3 + \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \\
 &\quad + \bar{I}_1 \bar{I}_2 I_3 + I_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 I_3 + I_2 I_3 I_4 + \bar{I}_1 I_3 I_4 = \\
 &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_1 I_3 + \bar{I}_2 \bar{I}_3 + I_2 I_3 I_4 + \bar{I}_1 I_3 I_4
 \end{aligned}$$

Функция, составленная по значениям  $F=\langle 1 \rangle$ , будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
 Q &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 \bar{I}_4 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 I_4 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 I_3 \bar{I}_4 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 I_3 I_4 + \bar{I}_1 I_2 \bar{I}_3 \bar{I}_4 + \\
 &\quad + \bar{I}_1 I_2 \bar{I}_3 I_4 + I_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 \bar{I}_4 + I_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 I_4 + I_1 \bar{I}_2 I_3 \bar{I}_4 + I_1 \bar{I}_2 I_3 I_4
 \end{aligned}$$

По виду функции можно сказать, что во втором случае она значительно сложнее для заданных комбинаций переменных, следовательно, проводим преобразования функции полученной в первом варианте, т.е. для  $F=\langle 0 \rangle$ .

## 2. Составим карту Карно

$I_1 I_2$ $I_3 I_4$	00	01	11	10
00	1	0	1	1
01	1	0	0	1
11	1	1	1	0
10	1	1	0	0

Проверка по таблице истинности подтвердила правильность данной функции.

## 3. Реализуем функцию на логических элементах «И-НЕ» или «ИЛИ-НЕ»

Для этого преобразуем функцию из суммы в инверсию произведения и получаем логическую схему (рис. 3.8). Реализация программы в среде OWEN Logic для одного управляющего воздействия на исполнительный элемент схемы (выход  $Q1$ ) показана на рис. 3.9. Для среды разработки ONI PLR Studio (выход  $Q001$ ) (рис. 3.10).

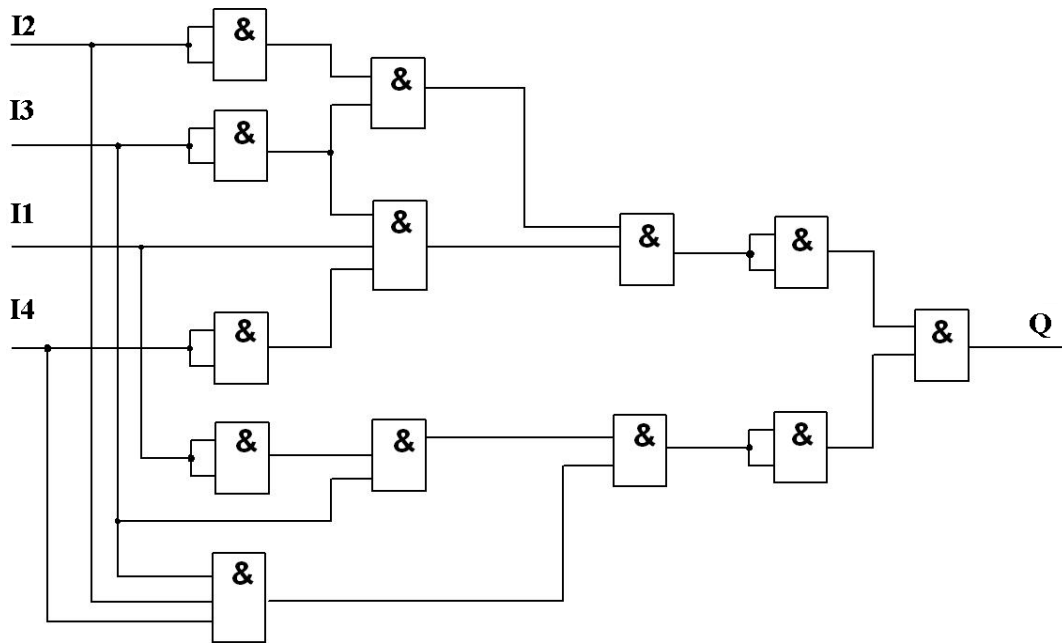


Рис. 3.8. Логическая схема

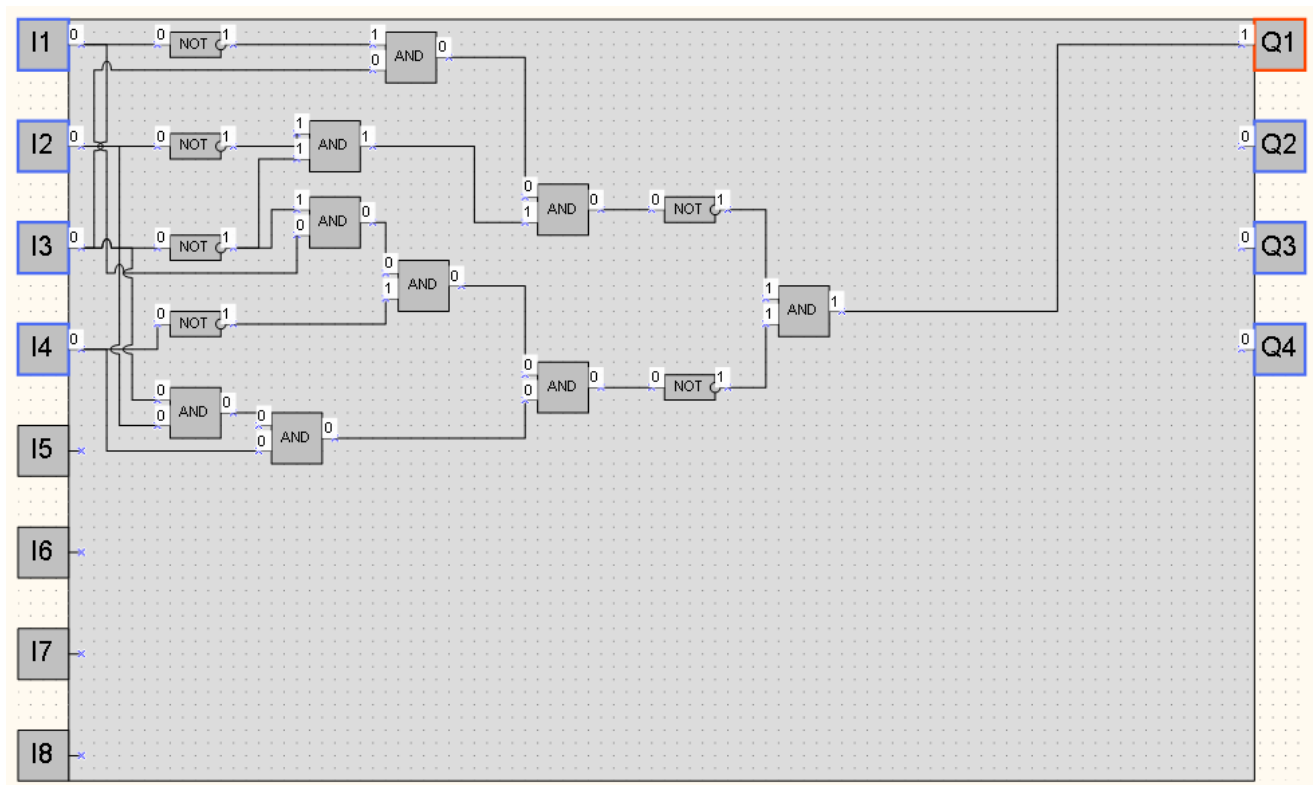


Рис. 3.9. Программа в OWEN Logic

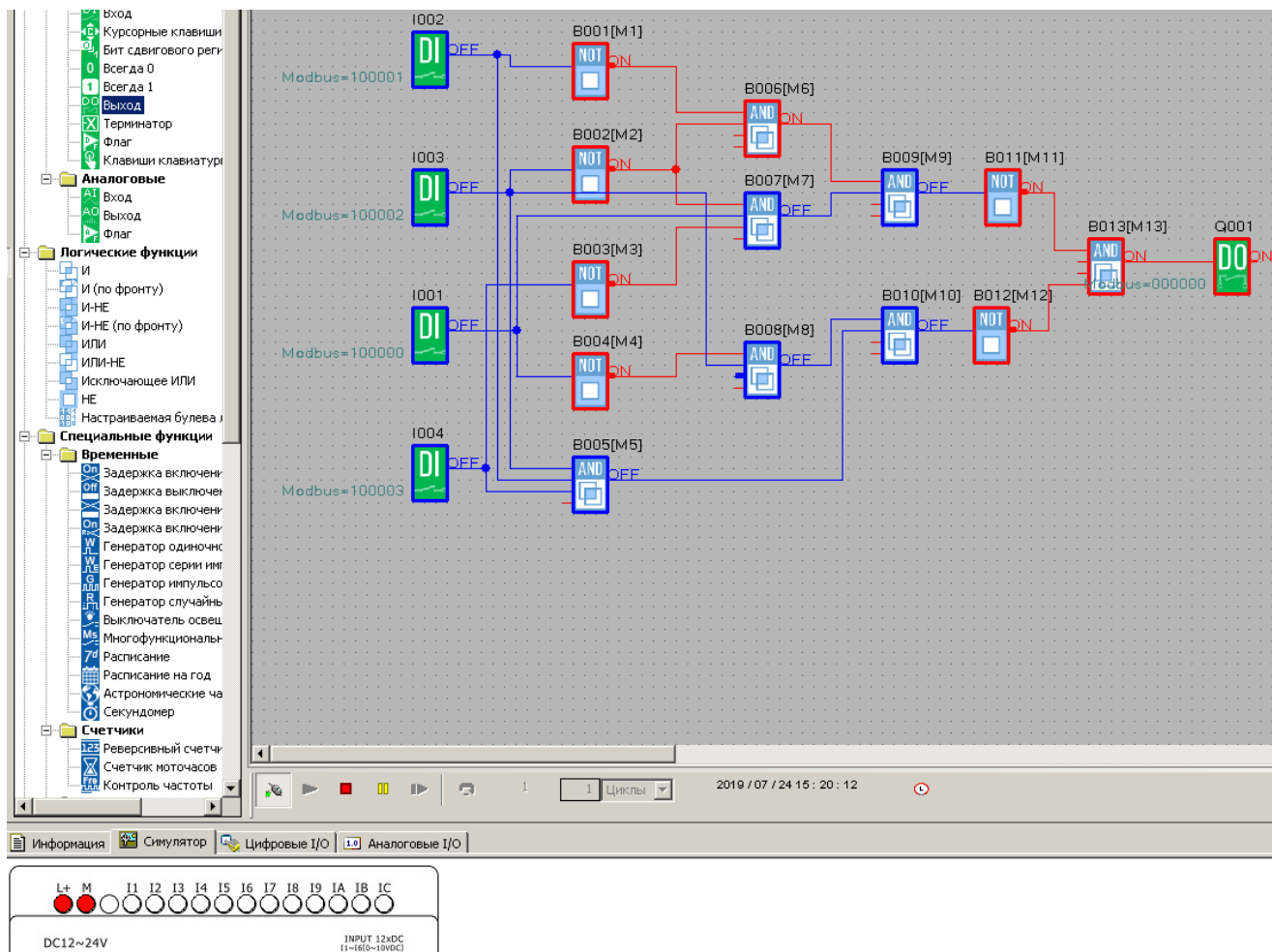


Рис. 3.10. Программа в ONI PLR Studio

### Пример № 2 к заданию № 3.3.2

Для данного логического выражения:

- составить таблицу истинности;
- реализовать функцию на логических элементах «И-НЕ»;
- написать программу в среде OWEN Logic.

#### Выполнение задания

Дана логическая функция

$$Q = I1 I2 \bar{I3} + \bar{I1} I2 \bar{I3}.$$

- Составляем таблицу истинности (табл. 3.4):

Таблица 3.4

I1	I2	I3	Q
1	1	0	1
0	1	0	1

б) Реализуем данную функцию на логических элементах «И-НЕ» (рис. 3.11) в программе OWEN Logic (рис. 3.12).

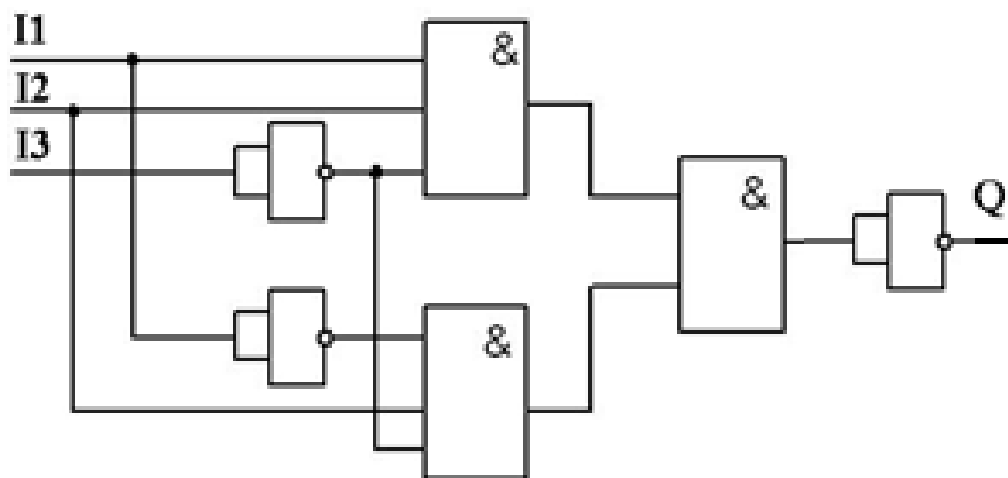


Рис. 3.11. Логическая схема

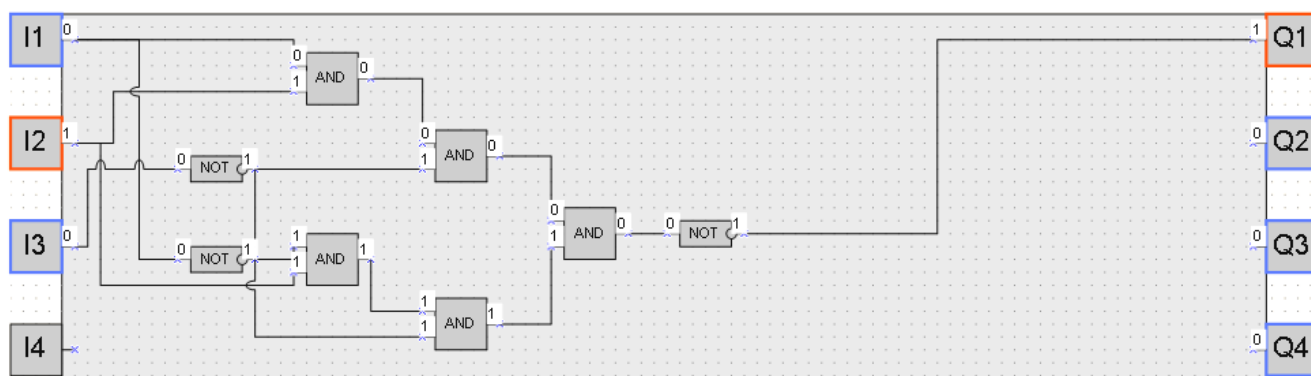


Рис. 3.12. Программа в OWEN Logic

### Задание № 3.3.1. Построить схему на элементах «И-НЕ» и написать программу для ПЛК в OWEN Logic

По таблице истинности (табл. 3.5) четырех переменных:

1. Составить и упростить логическую схему.
2. Составить карту Карно.
3. Начертить логическую схему, реализующую данную логическую функцию. Схему строить на элементах «И-НЕ».
4. Написать программу для ПЛК в OWEN Logic.

Таблица 3.5

№ Варианта				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	B	C	D	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1
1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1
1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1
1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1
1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0
1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0

## Пример № 3 к заданию № 3.3.1

Таблица 3.6

A	B	C	D	F
0	0	0	0	1
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	0	1	1	0
1	1	0	0	1
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	1

**Составим по таблице (табл. 3.6) логическую функцию и упростим ее.**

Воспользуемся конъюнктивной нормальной формой записи функции (запись по «по полям») с учетом следующих законов АЛ:

На основе аксиом выведены теоремы, содержащие основные законы АЛ, необходимые для выполнения задания.

1. Закон нулевого множества:

$$0 \vee x = x;$$

$$0 \& x = 0;$$

$$0 \& x_1 \& x_2 \& \dots \& x_n \& \dots = 0.$$

2. Закон универсального множества:

$$1 \& x = x;$$

$$1 \vee x = 1;$$

$$1 \vee x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_n \vee \dots = 1.$$

3. Закон повторения:

$$x \& x = x;$$

$$x \vee x = x.$$

4. Законы дополнительности:

а) исключенного третьего

$$x \vee \bar{x} = 1;$$

б) логическое противоречие

$$x \& \bar{x} = 0.$$

5. Коммутативный (переместительный) закон:

$$x \& y = y \& x;$$

$$x \vee y = y \vee x.$$

6. Ассоциативный (сочетательный) закон:

$$x \& (y \& z) = (x \& y) \& z = x \& y \& z;$$

$$x \vee (y \vee z) = (x \vee y) \vee z = x \vee y \vee z.$$

7. Дистрибутивный (распределительный) закон:

$$x \& (y \vee z) = x \& y \vee x \& z;$$

$$x \vee y \& z = (x \vee y) \& (x \vee z).$$

8. Законы поглощения:

$$x \& (x \vee y) = x;$$

$$x \vee x \& y = x.$$

$$x \& (x \vee y) = x \& y;$$

$$x \vee x \& y = x \vee y.$$

9. Законы склеивания:

а) полного

$$x \& y \vee x \& y = x;$$

$$(x \vee y) \& (x \vee y) = x.$$

б) неполного

$$x \& y \vee x \& y = x \vee x \& y \vee x \& y;$$

$$(x \vee y) \& (x \vee y) = x \& (x \vee y) \& (x \vee y).$$

10. Законы инверсии (теоремы де Моргана):

$$x_1 \& x_2 \& \dots \& x_n = x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_n;$$

$$x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_n = x_1 \& x_2 \& \dots \& x_n.$$

11. Теоремы разложения (декомпозиции ЛФ):

$$f(x, y, \dots, z) = x \& f(1, y, \dots, z) \vee x \& f(0, y, \dots, z);$$

$$f(x, y, \dots, z) = (x \vee f(0, y, \dots, z)) \& (x \vee f(1, y, \dots, z)).$$

12. Следствия из теорем разложения:

$$x \& f(x, y, \dots, z) = x \& f(1, y, \dots, z);$$

$$x \vee f(x, y, \dots, z) = x \vee f(0, y, \dots, z);$$

$$x \& f(x, y, \dots, z) = x \& f(0, y, \dots, z);$$

$$x \vee f(x, y, \dots, z) = x \vee f(1, y, \dots, z).$$

13. Теорема Шеннона (обобщение теорем де Моргана):

$$f(x, y, \dots, z, \&, v) = f(x, y, \dots, z, v, \&).$$

Данная теорема утверждает, что инверсия любой функции в АЛ получается путем замены каждой переменной ее инверсией и одновременно взаимной заменой символов конъюнкции и дизъюнкции.

Справедливость любого закона АЛ можно доказать разными методами. Законы (1-5) доказываются путем прямой подстановки вместо переменной значений 0 и 1. Ряд законов доказывается методом перебора всех возможных значений переменных, для которых проверяется справедливость закона. Для доказательства закона достаточно показать тождественность выражений, образующих левую и правую стороны доказываемого соотношения при всех наборах переменных,

принимающих значения 0 или 1. Общий формальный метод доказательства законов АЛ состоит в том, что справедливость каждого закона доказывается на основе аксиом и ранее доказанных законов. Доказательство заключается в приведении обеих частей выражения к одному виду с помощью последовательных преобразований. Для доказательства законов инверсии следует воспользоваться методом математической индукции.

Далее на основании указанных выше законов производится упрощение логической функции:

$$\begin{aligned}
 F &= (A + \bar{B} + C + D)(A + \bar{B} + C + \bar{D})(A + B + \bar{C} + D)(\bar{A} + B + \bar{C} + \bar{D}) \times \\
 &\quad \times (\bar{A} + \bar{B} + C + D)(\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + D) = (A + \bar{B} + C)(A + B + \bar{C}) \times \\
 &\quad \times (\bar{A} + \bar{B} + C + D)(\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + D) = (AB + A\bar{C} + \bar{A}\bar{B} + \bar{B}\bar{C} + \bar{A}C + BC) \times \\
 &\quad \times (\bar{A} + \bar{A}C + \bar{A}\bar{B} + \bar{A}\bar{D} + \bar{A}\bar{B} + \bar{B} + \bar{B}C + \bar{B}\bar{D} + \bar{A}C + \bar{B}\bar{C} + \bar{C}\bar{D} + \bar{A}\bar{D} + \\
 &\quad + \bar{B}\bar{D} + CD) = (AB + A\bar{C} + \bar{A}\bar{B} + \bar{B}\bar{C} + \bar{A}C + BC)(\bar{A} + \bar{B} + CD + \bar{C}\bar{D}) = \\
 &\quad = \bar{A}\bar{B} + \bar{A}\bar{B}\bar{C} + \bar{A}C + \bar{A}\bar{B}C + \bar{A}\bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{B} + \bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{B}C + ABCD + \bar{A}\bar{B}CD + \\
 &\quad + \bar{A}CD + BCD + \bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D} + \bar{A}C\bar{D} + \bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D} + \bar{B}\bar{C}\bar{D} = \bar{A}\bar{B} + \bar{A}C + \bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{B}C + \\
 &\quad + \bar{A}\bar{B}C + \bar{A}\bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{B}C + BCD + \bar{A}C\bar{D} + \bar{A}\bar{C}\bar{D} = \bar{A}\bar{B} + \bar{A}C + \bar{B}\bar{C} + BCD + \bar{A}\bar{C}\bar{D}
 \end{aligned}$$

## 2. Составим карту Карно

AB CD	00	01	11	10
00	1	0	1	1
01	1	0	0	1
11	1	1	1	0
10	1	1	0	0

Проверка по таблице истинности подтвердила правильность данной функции.

## 3. Реализуем функцию на логических элементах «И-НЕ»

Для этого преобразуем функцию из суммы в инверсию произведения и строим логическую схему (рис. 3.13).



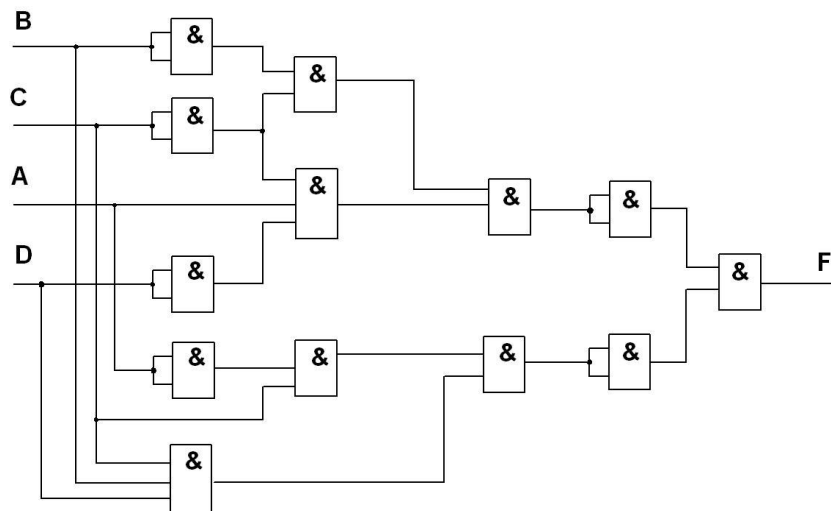


Рис. 3.13. Логическая схема

**4. Реализуем программу для ПЛК в среде OWEN Logic (рис. 3.14)**

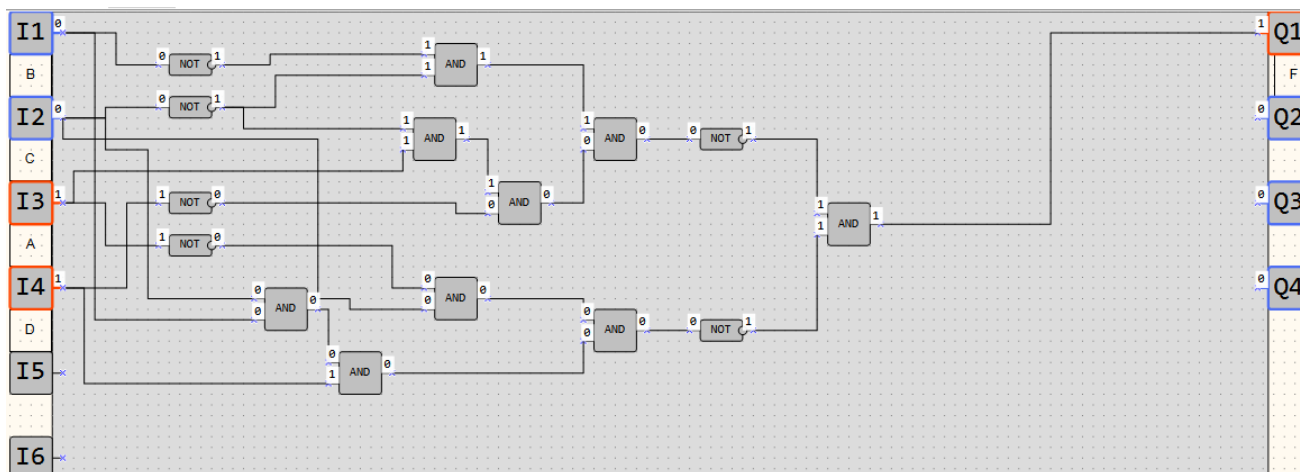


Рис. 3.14. Программа для ПЛК в среде OWEN Logic

**Задание № 3.3.2. Для данного логического выражения построить схему на элементах «И-НЕ» и написать программу для ПЛК в OWEN Logic**

Для данного логического выражения (табл. 3.7):

- составить таблицу истинности;
- реализовать функцию на логических элементах «И-НЕ»;
- написать программу для ПЛК в OWEN Logic.

Таблица 3.7

№ вар.	Логическая функция
1	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3$
2	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 + X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 X_2 \bar{X}_3$
3	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 + \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3$
4	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 X_2 \bar{X}_3$
5	$Y = X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 X_3$
6	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 X_3$
7	$Y = X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 X_2 X_3$
8	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 X_2 \bar{X}_3$
9	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 X_3$
10	$Y = X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 X_2$
11	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_3$
12	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_3$
13	$Y = X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_2 X_3$
14	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2$
15	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 X_2 X_3$
16	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3$
17	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3$
18	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 + X_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_2 \bar{X}_3$
19	$Y = X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 X_2 + \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_2 X_3$
20	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3$

### Пример № 4 к заданию № 3.3.2

Дано: Логическая функция

$$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3.$$

а) Составляем таблицу истинности (табл. 3.8):

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y
1	1	0	1
0	1	0	1
1	0	1	0
0	0	1	0

б) Реализуем данную функцию на логических элементах «И-НЕ» (рис. 3.15);

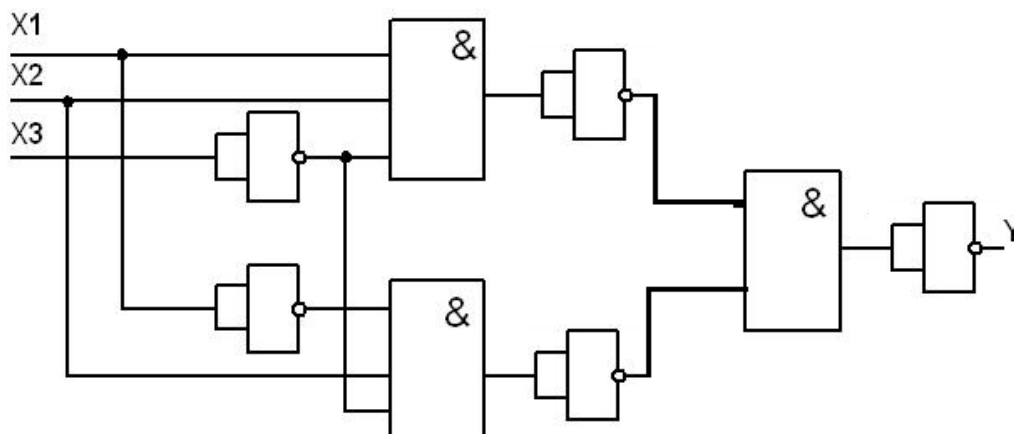


Рис. 3.15. Логическая схема

в) Полученную схему программируем в системе OWEN Logic (рис. 3.16).

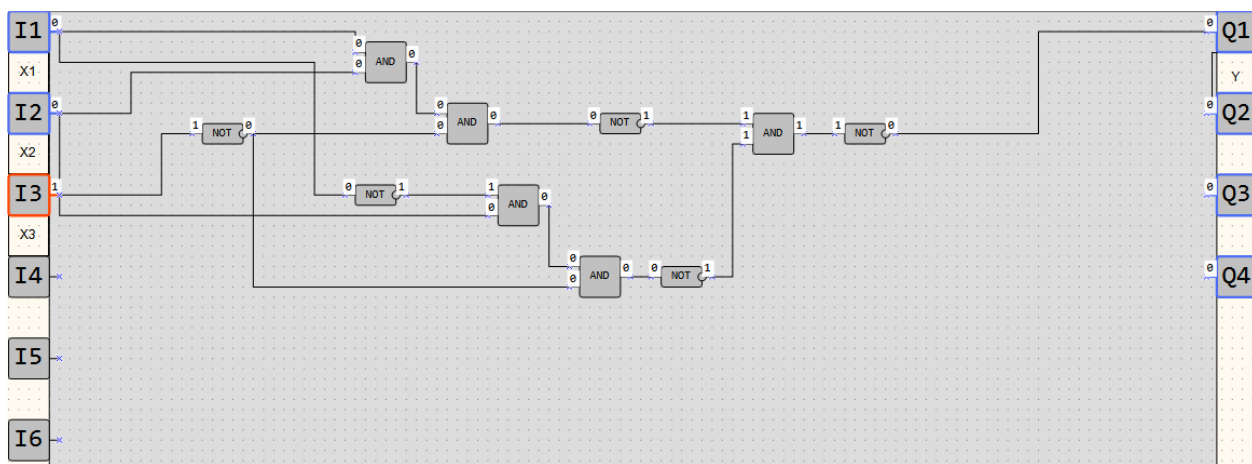


Рис. 3.16. Программа для ПЛК в среде OWEN Logic

### Задание № 3.3.3. Синтезировать реверсивный или нереверсивный счетчики

Функции, выполняемые счетчиками, используются в устройствах регистрации и цифровым представлением информации с высокой степенью точности, устройствах обработки информации и устройствах связи с электронными вычислительными машинами.

В электромеханических системах счетчики используются для определения угла поворота или перемещения исполнительного органа, скорости, частоты, времени, температуры и т.д.

Импульсы преобразуются в напряжения, число которых в соответствующем масштабе характеризует значение данного параметра. Эти импульсы подсчитываются счетчиками импульсов и выражаются в виде цифр.

По целевому назначению счетчики подразделяют на простые и реверсивные (рис. 3.20, а, б). Простые счетчики, в свою очередь, подразделяют на суммирующие (рис. 3.17, 3.19) и вычитающие (рис. 3.18) [1].

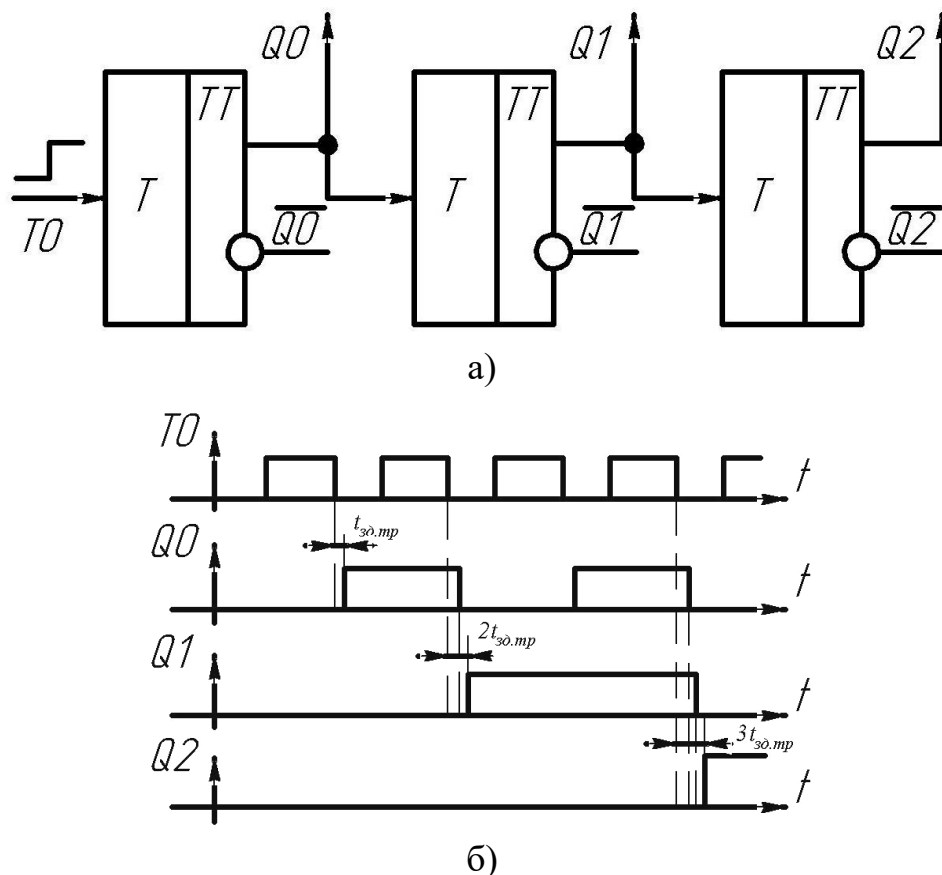


Рис. 3.17. Суммирующий счетчик с последовательным переносом: схема (а), диаграмма работы (б)

Частота следования сигналов (рис. 3.17, б) счета составляет  $F_{сч} \leq 1/(t_{сч} + t_{зд.мп})$ . Полное время счета:

$$T_{сч} \geq t_{сч} + m \cdot t_{зд.мп} + t_{опр},$$

где  $t_{сч}$  – длительность счетного импульса  $T0$ ;  $t_{зд.мп}$  – время переключения триггера;  $t_{опр}$  – длительность сигнала опроса;  $m$  – число разрядов.

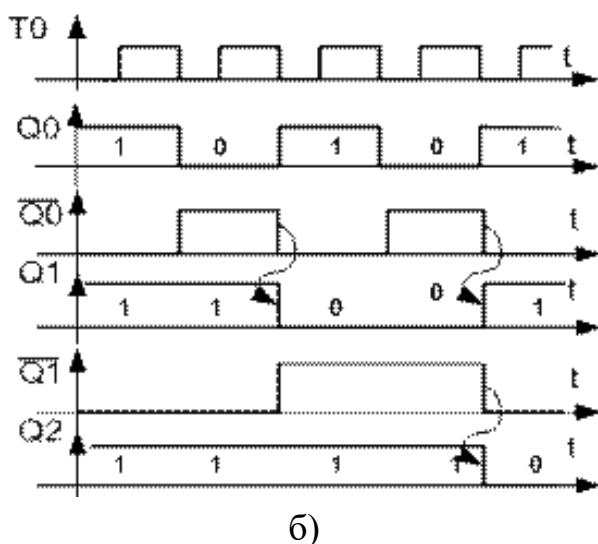
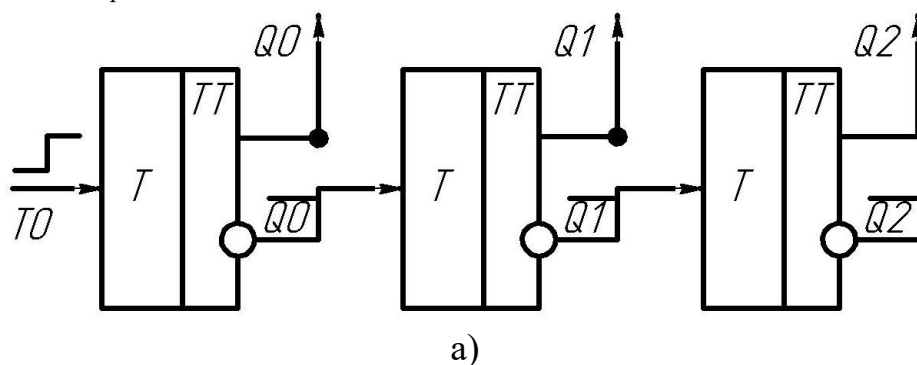


Рис. 3.18. Вычитающий счетчик с последовательным переносом:  
схема (а); диаграмма (б)

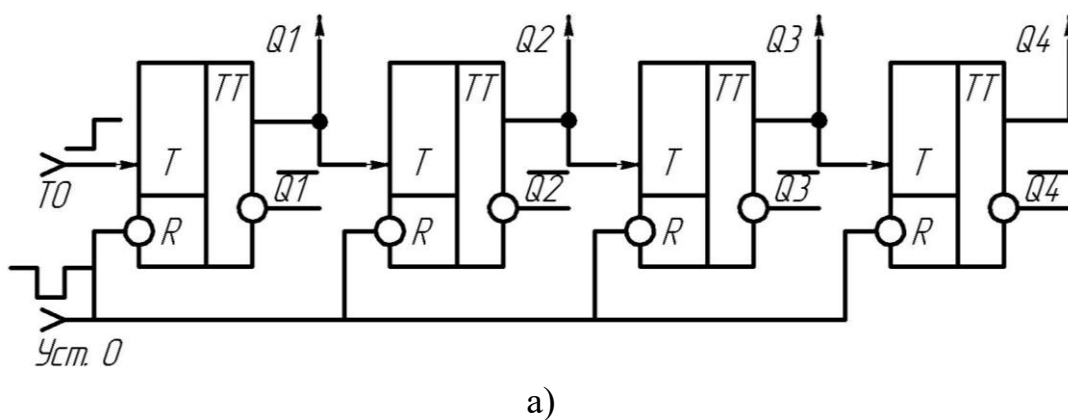
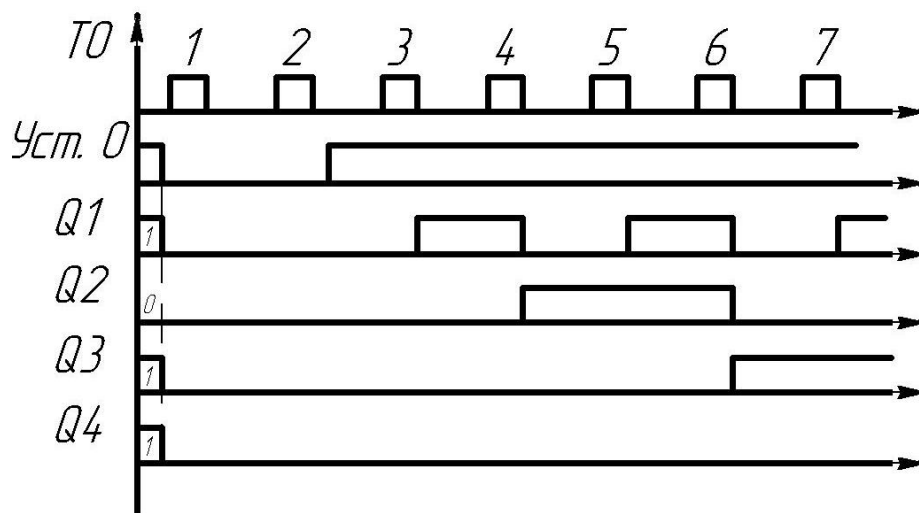
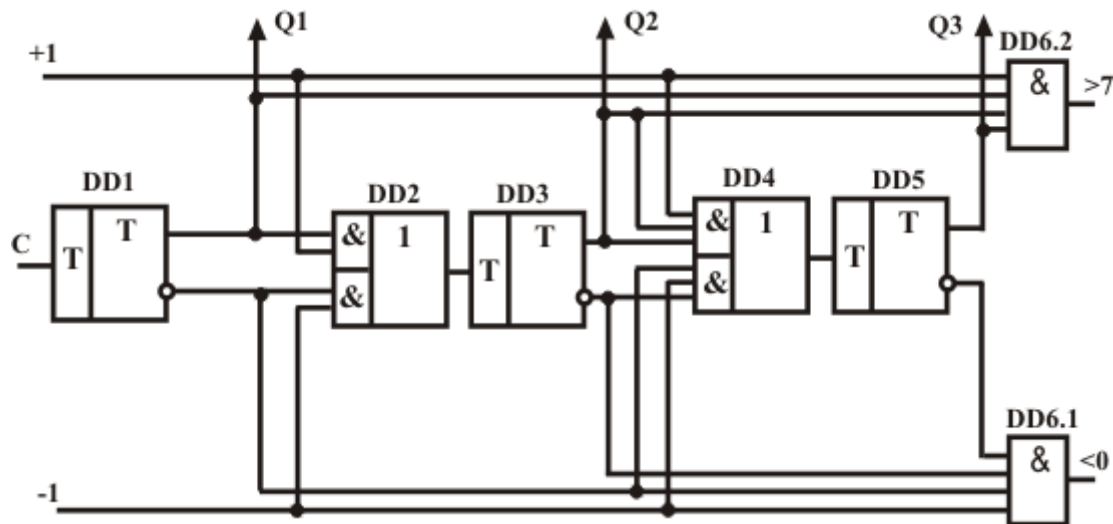


Рис. 3.19. (начало) Асинхронный суммирующий счетчик  
с предварительной установкой в нулевое состояние:  
схема (а); диаграмма (б)

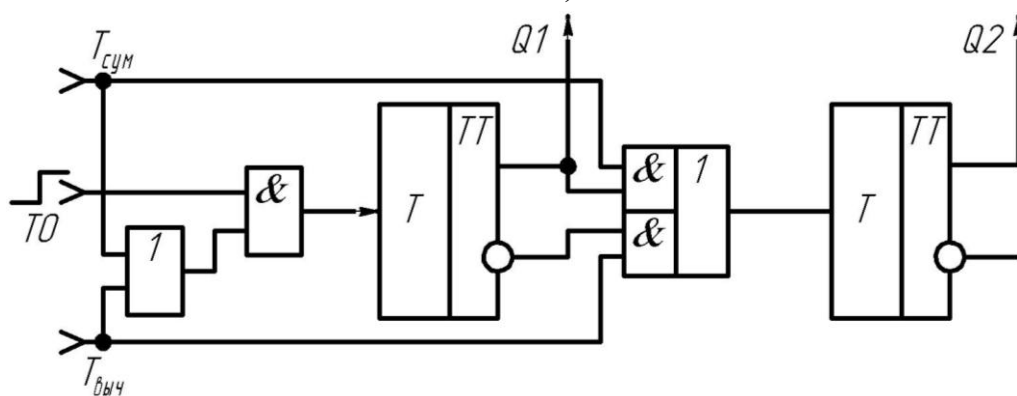


б)

Рис. 3.19. (окончание) Асинхронный суммирующий счетчик с предварительной установкой в нулевое состояние: схема (а); диаграмма (б)



а)



б)

Рис. 3.20. Схемы реверсивных счетчиков.  
Необходимо соблюдение условия  $T_{сум} \cdot T_{выч} = 0$

Основными показателями счетчиков являются модуль счета (коэффициент счета  $K$ ) и быстродействие.

Коэффициент счета определяет число импульсов, которое может быть сосчитано счетчиком.

Быстродействие счетчика характеризуется максимальной частотой следования счетных импульсов и связанным с ней временем.

Счетчики импульсов выполняются на основе триггеров.

Счет числа поступающих импульсов производится с использованием двоичной системы счисления.

Модуль счета двухразрядного, трехразрядного и четырехразрядного двоичных счетчиков равен соответственно 4, 8 и 16. Модуль счета двоичного счетчика находят из соотношения  $K_{сч} = 2^N$ , где  $N$  – число разрядов счетчика.

Иногда требуется получить счетчики с коэффициентом счета  $K_{сч} \neq 2^N$  ( $K_{сч} = 3, 10...$  и др.). Существуют разнообразные способы получения подобных счетчиков [1]. Наибольшее распространение получил способ принудительной установки в состояние «0» всех разрядов двоичного счетчика и способ принудительного насчёта. По первому способу реализуются счетчики с естественным порядком счета, по второму – счетчики с принудительным насчётом [1]. Подробно способы рассмотрены в [1].

В нашем случае необходимо синтезировать счетчик по модулю указанному в табл. 3.9:

Таблица 3.9

№ вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
модуль	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№ вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
модуль	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

Для вариантов 3–10 синтезировать реверсивный счетчик, 11–20 нереверсивный.

### Пример №5 к заданию № 3.3.3

**Задание:** синтезировать нереверсивный двоично-десятичный счетчик по модулю десять.

Счетчик реализуем на двухтактных R-S-триггерах М-S-типа рис. 3.21.

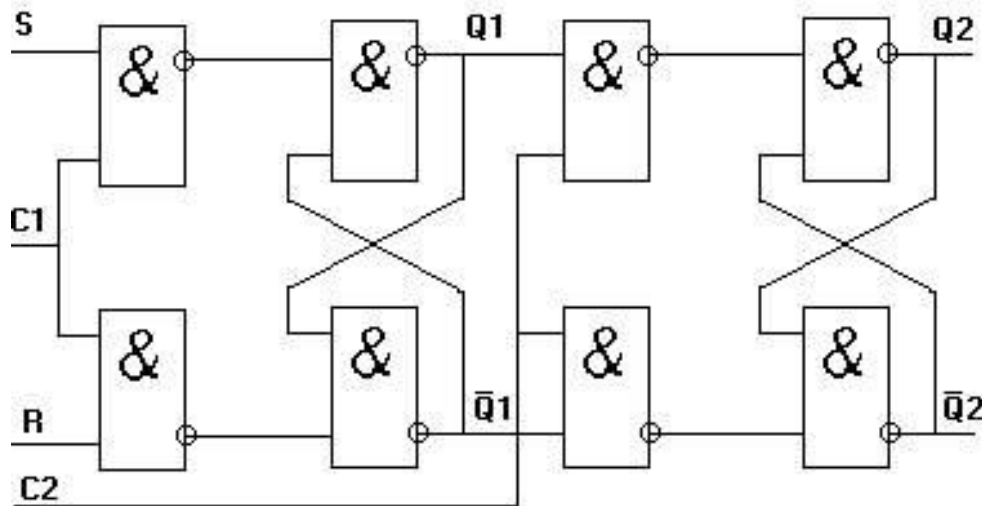


Рис. 3.21. Двухтактный R-S триггер М-S-типа

Получаем следующую схему (рис. 3.22).

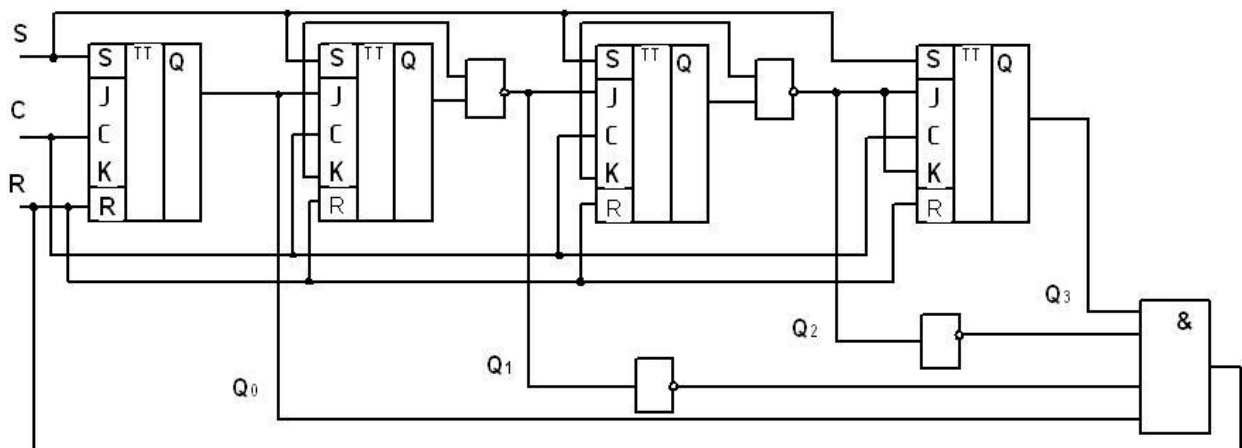


Рис. 3.22. Схема счетчика



Построим временные диаграммы (рис. 3.23).

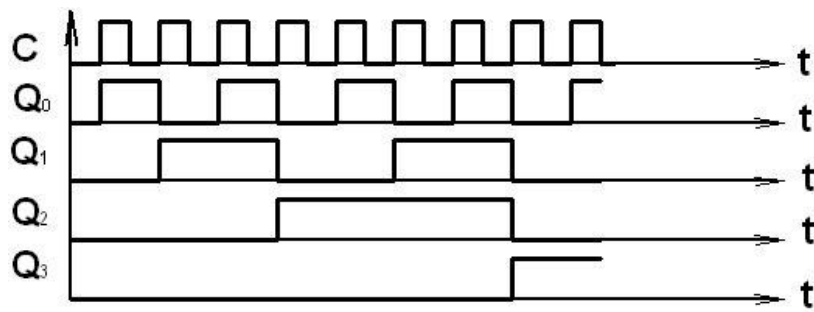


Рис. 3.23. Диаграмма работы счетчика

### Контрольные вопросы третьего раздела

#### «Программирование логических контроллеров (ПЛК)»

1. Три простейших базовых логических элемента.
2. Способы представления логического алгоритма.
3. Принципы логического программирования ПЛК.
4. Применение «Таблиц истинности» для решения практических задач логического программирования механотронных систем.
5. Разновидности и назначение счётчиков.
6. Принцип работы асинхронного суммирующего счетчика с предварительной установкой в нулевое состояние.
7. Принцип работы вычитающего счетчика с последовательным переносом.
8. Принцип работы суммирующего счетчика с последовательным переносом.
9. Принцип работы двухтактного R-S-триггера M-S-типа.
10. Принцип работы реверсивных счетчиков?
11. Что определяет параметр, называемый коэффициентом (модулем) счета?
12. На основе каких устройств выполняются счетчики?
13. Особенности работы и отличия счетчиков с естественным порядком счета и счетчиков с принудительным насчётом?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трудно решаемые проблемы, связанные с согласованием эксплуатационных параметров устройств управления с нагрузкой (например, электромеханические преобразователи), могут быть решены при комплексном подходе с привлечением математического моделирования и экспериментальных исследований в различных режимах работы оборудования. Вторая часть пособия будет посвящена вопросам математического и виртуального моделирования рассмотренных в пособии устройств.

Совершенствование полупроводниковых преобразователей напряжения позволит повысить качество процессов, протекающих в установившихся и переходных режимах работы устройств механотронных систем. С повышением качества переходных процессов и применяемых элементов повышается и надежность работы устройств, поэтому в пособии рассмотрены методики выбора элементной базы, обоснования и применения новых схемных решений, алгоритмов и устройств управления. В практической деятельности опыт проектирования и расчета рассмотренных устройств позволит будущим специалистам оптимально решать возникающие технические задачи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Додик С.Д., Гальперин Е.И. Источники электропитания на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчет. – М.: Советское радио, 1969. – 449 с.
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1982. – 496 с.
3. Родионов Ю.М. Справочник заводского радиоэлектроника / Ю.М. Родионов. – Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 1987. – 159 с.
4. Расчет и проектирование полупроводниковых приборов: пер. с англ. / Под ред. канд. техн. наук Г.Д. Глебова. – М.: Оборонгиз, 1963. – 532 с.
5. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: учебник для энергетических специальностей вузов / Под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
6. Герасимов В.Г. Электротехнический справочник. Т. 2: Электротехнические изделия и устройства [Электронный ресурс] / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. И.Н. Орлов). – 10-е изд., стереотип. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 518 с.
7. Косматов В.И., Андросенко В.В. Проектирование тиристорных преобразователей. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. – 113 с.
8. Справочник разработчика и конструктора РЭА. Элементная база. Кн. 2 / М.Ю. Масленков, Е.А. Соболев, Г.А. Соколов и др. – М., 1993. – 300 с.
9. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е, 1982. – 392 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие .....</b>	<b>3</b>
<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Полупроводниковые преобразователи напряжения.....</b>	<b>6</b>
1.1. Основные схемы транзисторных преобразователей напряжения и их выбор.....	6
1.2. Особенности проектирования преобразователей напряжения и основные расчетные соотношения .....	16
1.3. Двухтактные преобразователи напряжения с самовозбуждением.....	32
1.4. Расчет полупроводниковых преобразователей напряжения. ....	38
Задание № 1.4.1. Порядок расчета преобразователей с самовозбуждением. ....	39
Задание № 1.4.2. Порядок расчета преобразователей напряжения с независимым возбуждением.....	44
1.5. Способы стабилизации частоты и выходного напряжения преобразователей.....	48
Контрольные вопросы к первому разделу «Полупроводниковые преобразователи напряжения».....	54
<b>2. Стабилизаторы напряжения.....</b>	<b>57</b>
2.1. Назначение и принципы работы стабилизаторов напряжения.....	57
Задание № 2.1.1. Расчет транзисторного стабилизатора напряжения .....	59
Контрольные вопросы к второму разделу «Стабилизаторы напряжения» .....	67
<b>3. Программирование логических контроллеров (ПЛК).....</b>	<b>69</b>
3.1. Математические основы логической алгебры и программирования.....	69
3.2. Работа с программой OWEN Logic и разработка программы для реле OWEN .....	83
3.3. Практические примеры выполнения индивидуальных заданий .....	84
Задание № 3.3.1. Построить схему на элементах “И-НЕ” и написать программу для ПЛК в OWEN Logic .....	88
Задание № 3.3.2. Для данного логического выражения построить схему на элементах “И-НЕ” и написать программу для ПЛК в OWEN Logic .....	93
Задание № 3.3.3. Синтезировать реверсивный или нереверсивный счетчики .....	96
Контрольные вопросы третьего раздела «Программирование логических контроллеров (ПЛК)».....	101
<b>Заключение .....</b>	<b>102</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>103</b>

*Учебное издание*

*ВЕРЕЩАГИН Владислав Евгеньевич*

**Электромеханотроника**  
**Часть 1**

Редактор *Е.С. Захарова*

Компьютерная верстка *И.О. Миняева*

Выпускающий редактор *Ю.А. Петропольская*

Подп. в печать 23.03.20

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная

Усл. п.л. 6,08. Уч.-изд. л. 6,05

Тираж 100 экз. Рег. № 61/20

---

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский государственный технический университет»  
443100, г.Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии  
Самарского государственного технического университета  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус 8

**В.Е. ВЕРЕЩАГИН**

# **ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА**

## **ЧАСТЬ 1**

**Учебно-методическое пособие**

**Самара**  
**Самарский государственный технический университет**  
**2020**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

Кафедра «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

В.Е. ВЕРЕЩАГИН

# ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА

## ЧАСТЬ 1

*Учебно-методическое пособие*

Самара  
Самарский государственный технический университет  
2020

Печатается по решению ученого совета СамГТУ (протокол № 8 от 28.03.2019 г.).

УДК 621.313:621.38 (075.8)

ББК 31.261:32.85я73

В 317

**Верещагин В.Е.**

**Электромеханотроника. Часть 1:** учеб.-метод. пособие / В.Е. Верещагин.  
– Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. – 105 с.

Рассматриваются принцип действия и методики расчета параметров полупроводниковых приборов аналоговой и цифровой техники.

Материал предназначен для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения профилей «Электромеханика» и «Электрооборудование автомобилей и тракторов».

Рецензент: д-р техн. наук, проф. *Ю.А. Макаричев*

УДК 621.313:621.38 (075.8)

ББК 31.261:32.85я73

В 317

© В.Е. Верещагин, 2020

© Самарский государственный  
технический университет, 2020



## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Пособие, содержащее задания и контрольные вопросы, рассчитано на практические занятия и самостоятельную работу студентов по дисциплине «Электромеханотроника». Задания могут выдаваться для выполнения контрольных работ.

В учебном пособии рассматриваются преобразователи напряжения, используемые для питания электромеханических устройств, проектирование электронных устройств питания, а также приводятся основы программирования логических реле и контроллеров для автоматизации электромеханических систем.

Даны рекомендации по выбору элементной базы для полупроводниковых преобразователей электронных устройств питания электромеханических систем.

Программирование представлено в системах разработки проектов OWEN Logic и ONI PLR Studio. Это современные отечественные средства автоматизации электромеханотронных систем.

Пособие рассчитано на студентов, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение находят полупроводниковые системы управления электромеханическими системами и комплексами. От их точной и надежной работы зависят оптимальные алгоритмы функционирования оборудования в технологических процессах преобразования механической и электрической энергии.

В пособии рассматриваются методики проектирования преобразователей напряжения (ПН) и стабилизаторов напряжения (СН) для питания электромеханических систем малой мощности. Даны основы логического программирования реле и контроллеров для автоматизации технологических процессов. Рассмотрены примеры реализации программ в системах разработки проектов OWEN Logic и ONI PLR Studio.

Рекомендации по расчету и выбору элементов схем опираются на справочные материалы, а в расчетах приводятся примеры современных компонентов.

Вопросы преобразовательной техники базируются на применении полупроводниковых приборов – диодов, тиристоров, силовых транзисторов. Значительное внимание уделено импульсным преобразователям постоянного напряжения, стабилизаторам напряжения и другим преобразователям, получающим в последнее время большое развитие.

Пособие рассчитано на дисциплину «Электромеханотроника», относящуюся к числу наиболее важных для подготовки современных бакалавров – электриков, электромехаников, электроэнергетиков и представителей других электротехнических специальностей. Студенты в рамках указанной дисциплины должны овладеть навыками проектирования электротехнических систем и их компонентов, а также инженерно-технического сопровождения деятельности по техническому обслуживанию и ремонту оборудования. Будущие специалисты знакомятся с классификацией и областями применения приборов и схем, используемых в электромеханотронике, с принципами действия и особенностями устройств для обработки сигналов в электронных

системах управления и отображения информации, с принципами действия и особенностями работы преобразователей электрической энергии, применяемых в электроприводе, электрической тяге, электроэнергетике и т.д. Поэтому электромеханотроника в совокупности с другими дисциплинами формирует и расширяет возможности будущего специалиста и является средством для дальнейшего прогресса в области преобразовательной полупроводниковой техники и основой автоматизации многих областей промышленности, транспорта и энергетики.

Главная цель дисциплины заключается в обучении студента принципам действия функционально законченных электронных устройств, умению грамотно эксплуатировать их и формулировать задание на разработку нового устройства. Практические занятия позволят им получить первоначальные (базовые) навыки расчета и проектирования электротехнических систем.

Пособие написано в соответствии с направлением подготовки «Электроэнергетика и электротехника» дисциплины «Электромеханотроника».

# **1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ**

Преобразователями напряжения (ПН) называются устройства, которые преобразуют напряжение постоянного тока одной величины в различные по величинам напряжения переменного или постоянного тока, выводы которых не имеют гальванической связи с первичным источником питания. Основными ключевыми элементами ПН являются полупроводниковые элементы – тиристоры и транзисторы. Они широко используются в источниках электропитания различного применения: магнитных усилителях, инверторах, выпрямителях, радиоэлектронной аппаратуры, возбуждателях и схемах управления электрических машин и т.п.

Полупроводниковые преобразователи (ПП), в отличие от вибрационных или электромашинных преобразователей, считаются статическими устройствами, так как в них отсутствуют движущиеся механические части, поэтому они долговечны, надежны в работе, имеют более высокий коэффициент полезного действия (КПД) в связи с отсутствием механических и добавочных потерь. Кроме того, ПП отличаются лучшими массогабаритными показателями и помехоустойчивостью.

Преобразователи напряжения на небольшую мощность (до 500 Вт) при питании от источников с низким напряжением (14–27 В) преимущественно выполняются на транзисторах, работающих в режиме переключений. Преобразователи, питающиеся от источников с повышенным напряжением (50–100 В и выше), на большие мощности рационально выполнять на тиристорах.

## **1.1. Основные схемы транзисторных преобразователей напряжения и их выбор**

Условно все преобразователи напряжения (ПН) можно подразделить на два типа: преобразователи с самовозбуждением (автогенераторы) и усилители мощности.

В результате неэффективного применения транзисторов и сравнительно большой величины потерь мощности в них преобразователи с самовозбуждением используются в источниках электропитания малой и средней мощности. В настоящее время продолжаются разработки полупроводниковых материалов с хорошими свойствами для эффективной и надежной работы в таких устройствах, как частотные преобразователи.

На мощности от 50 до 1000 Вт нашли широкое распространение усилители мощности, содержащие маломощный задающий генератор и выходной (силовой) каскад. Регулировка и стабилизация частоты напряжения переменного тока в этих преобразователях осуществляются без значительных расходов электроэнергии в задающем генераторе.

### *Автогенераторы*

Трансформатор с положительной магнитной обратной связью релаксационного однотоктного генератора полупроводникового преобразователя с самовозбуждением работает с постоянным подмагничиванием. Магнитопровод трансформатора, как правило, выполняется с диамагнитным зазором или из магнитного материала с линейной характеристикой намагничивания.

Однотоктные преобразователи могут наиболее эффективно использоваться в маломощных (до 2 Вт) преобразователях, так как в них величина КПД, возможно, будет выше, чем в двухтактных преобразователях.

Основой двухтактных преобразователей являются двухтактные блокинг-генераторы. Они широко распространены и имеют различные схемные решения.

Часто применяемые схемы автогенераторов показаны на рис. 1.1.

На схемах видно, что подключение полюса (положительного или отрицательного) источника питания к середине первичной обмотки. На схемах рис. 1.1 (а, б) показано подключение с общим эмиттером, а на схемах рис. 1.1 (в) – с общим коллектором. В случае общего коллектора есть возможность размещения транзисторов без электриче-

ской изоляции на общем теплоотводе (радиаторе), что дает возможность повысить коэффициент усиления транзистора по мощности. Для ограничения тока базы транзистора и стабилизации переходного процесса в схемах рис. 1.1 имеется общее (базовое) дополнительное сопротивление в цепи баз.

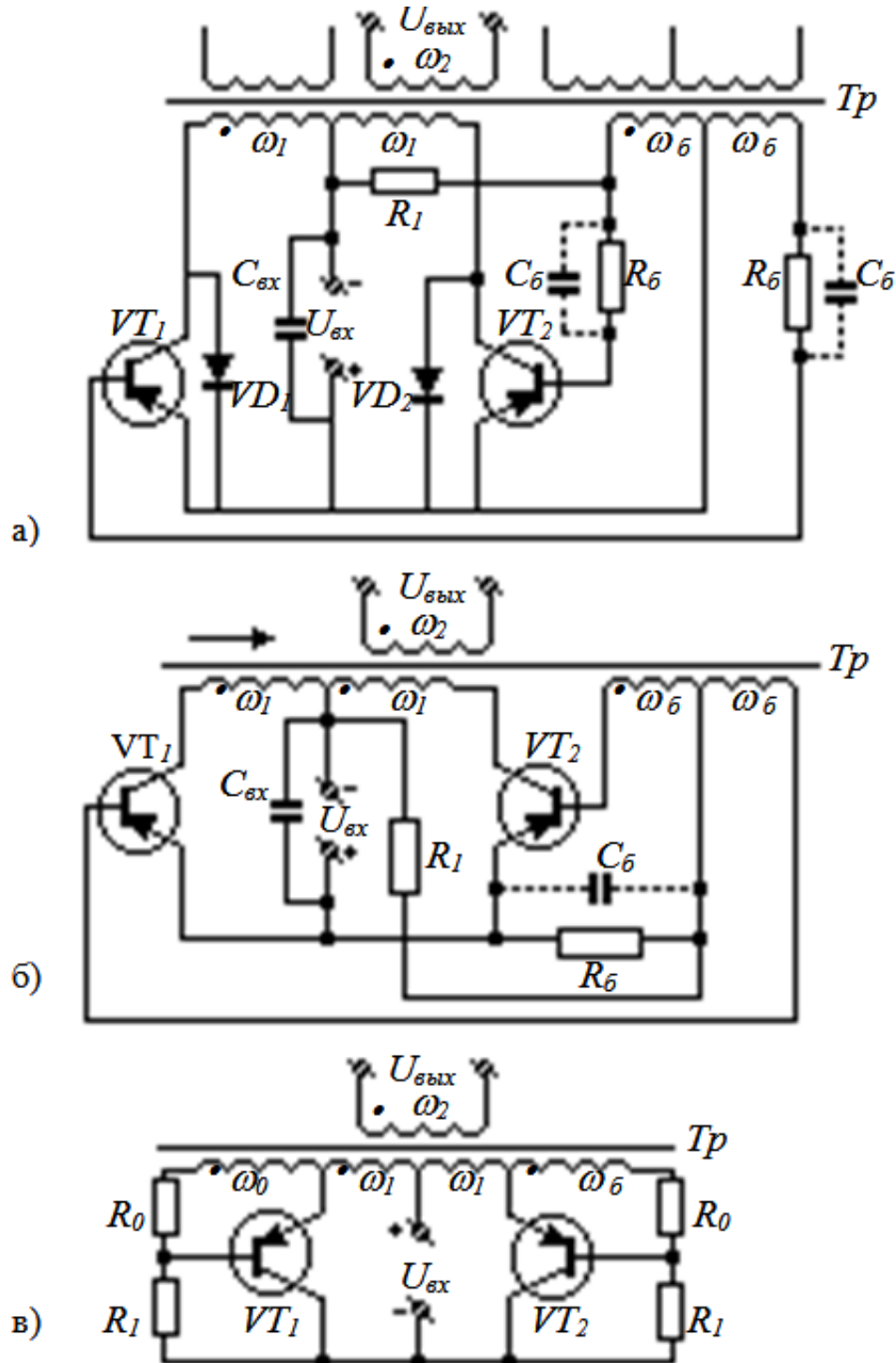


Рис. 1.1. Схемы двухтактных преобразователей напряжения с самовозбуждением с выводом средней точки коллекторной обмотки

Частота выходного напряжения преобразователей, схемы которых приведены на рис. 1.1, определяется параметрами насыщающегося силового трансформатора и напряжением питания [1]:

$$f = \frac{U_{\text{вх}} \cdot 10^4}{4 \cdot \omega_1 \cdot B_s \cdot Q_{\text{см}} \cdot k_c}.$$

На выходе преобразователя формируются прямоугольные импульсы разной полярности со скважностью, равной 2.

Если в преобразователе используется RC-цепь (рис. 1.2), то силовые трансформаторы в схеме работают без захода в режим насыщения материала магнитопровода. При этом времязадающая цепь  $R_y C_y$  формирует частоту переменного напряжения и определяется постоянной времени. В схеме рис. 1.2 трансформатор имеет дополнительную обмотку управления  $\omega_y$ . Наводимая в ней ЭДС  $U_y$  суммируется с напряжением базовых обмоток и через сопротивление  $R_y$  заряжает конденсатор  $C_y$ . Со временем напряжение на конденсаторе превысит сумму напряжений обеих базовых обмоток, в результате чего к базе закрытого транзистора будет приложено отпирающее напряжение. Это вызовет переключение транзисторов преобразователя и смену полярности выходного напряжения.

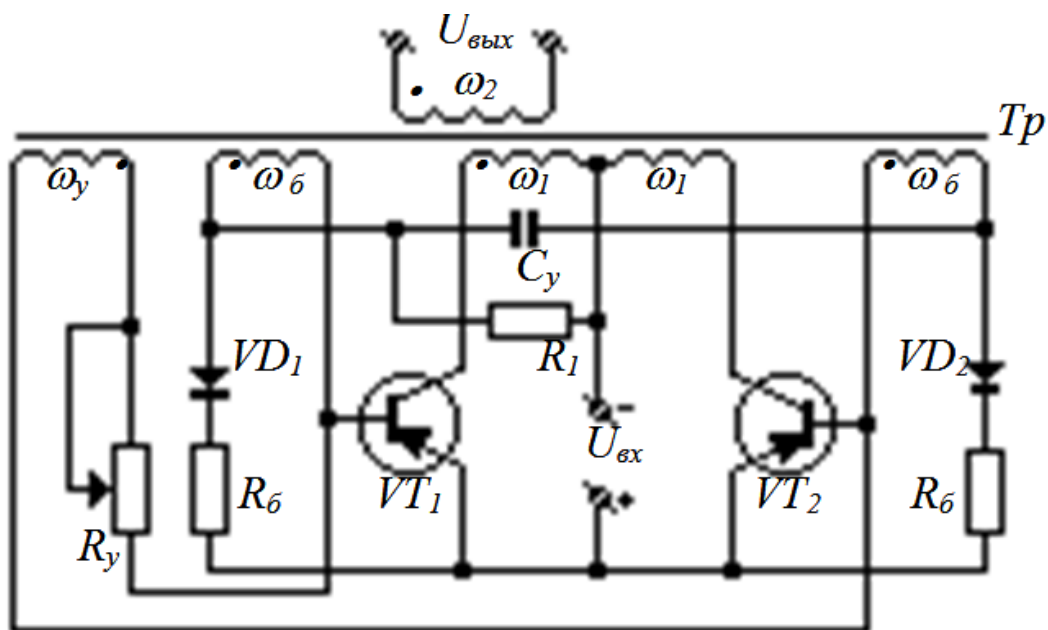


Рис. 1.2. Схема автогенератора с времязадающей RC-цепью

Постоянную времени цепи заряда конденсатора  $C_y$  определяет период колебаний выходного напряжения [1]:

$$T = 2R_y C_y \ln \left( \frac{U_y + 4U_{\delta y}}{U_y} \right),$$

где  $R_y$  – сопротивление в цепи обмотки управления;

$C_y$  – емкость конденсатора времязадающей цепи.

Можно принять  $U_y = 2,3U_{\delta y}$ , тогда частота выходного напряжения переменного тока

$$f = \frac{1}{2R_y C_y}. \quad (1.1)$$

Схема рис. 1.2 позволяет регулировать частоту выходного напряжения в широких пределах с помощью изменения сопротивления  $R_y$ . В результате регулирования амплитуда импульсов выходного напряжения остается постоянной, а частота выходного напряжения незначительно зависит от изменения напряжения питания (т.е. изменение на  $\pm 20\%$  напряжения питания вызывает изменение выходного напряжения не более  $1\%$  в диапазоне от 800 Гц до 1.5 кГц).

Схемы, в которых трансформатор ПН выполнен с отводом от середины коллекторной обмотки, имеют удвоенное напряжение источника питания на коллекторе транзистора (не учитывая коммутационных перенапряжений). Поэтому они применяются при низких напряжениях источника питания ( $U_{\text{вх}} \leq 25\text{--}30\text{ В}$ ).

Преимуществом мостовых автогенераторов (рис. 1.3) является возможность работать от источника более высокого напряжения в связи с тем, что в них напряжение между эмиттером и коллектором запертого транзистора ниже напряжения источника питания. На рис. 1.3 видно, что транзисторы  $VT_1 - VT_4$  образуют мост. В одной его диагонали включен источник питания с напряжением  $U_{\text{вх}}$ , а к другой подключена первичная обмотка  $\omega_1$  трансформатора преобразователя. Обмотка обратной связи подключена к базовым выводам транзисторов через дополнительные сопротивления  $R_{\delta}$ .



В момент подачи питающего напряжения сопротивление  $R_1$  в схеме рис. 1.3, а служит для обеспечения надежного запуска автогенератора. В схеме на рис. 1.3, б для этой цели подключен делитель напряжения  $R_1 - R_2 - R_6$ , а базовые обмотки транзисторов  $VT_3$  и  $VT_4$  объединены и имеют отвод от средней точки.

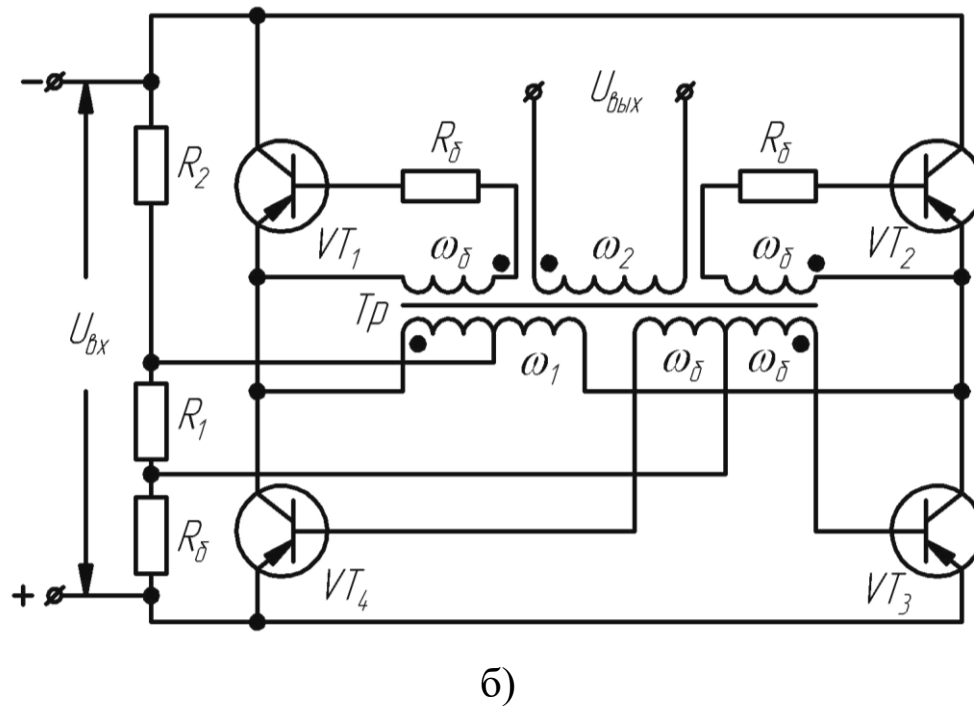
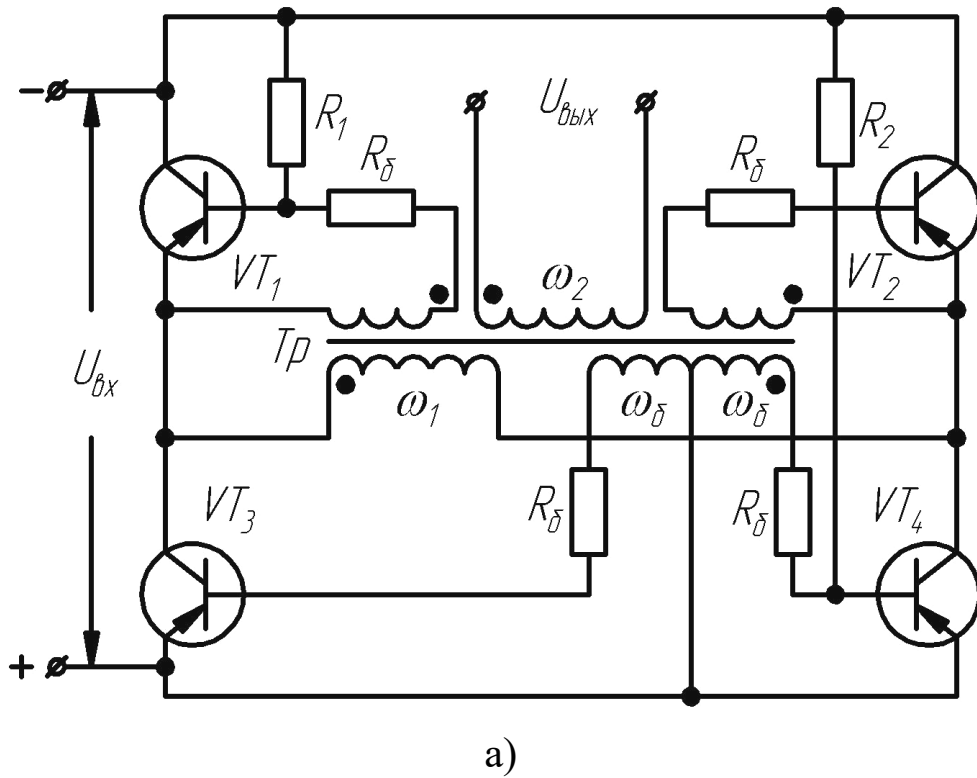
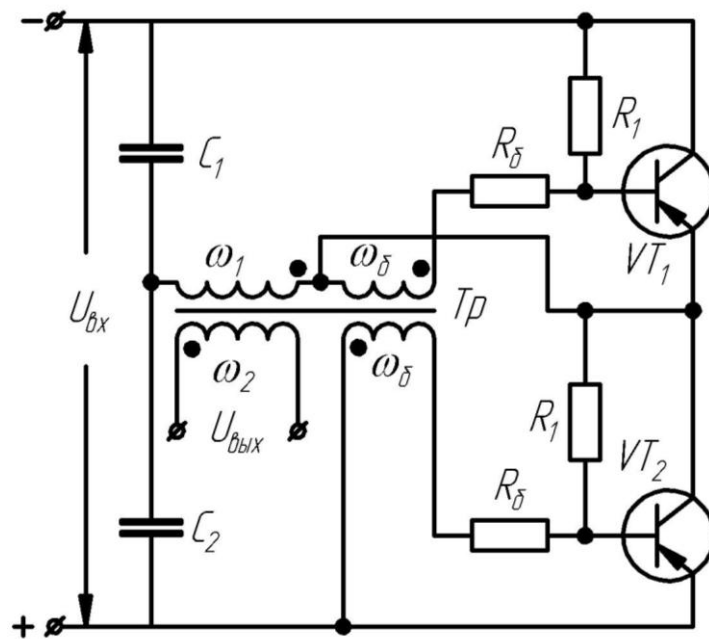
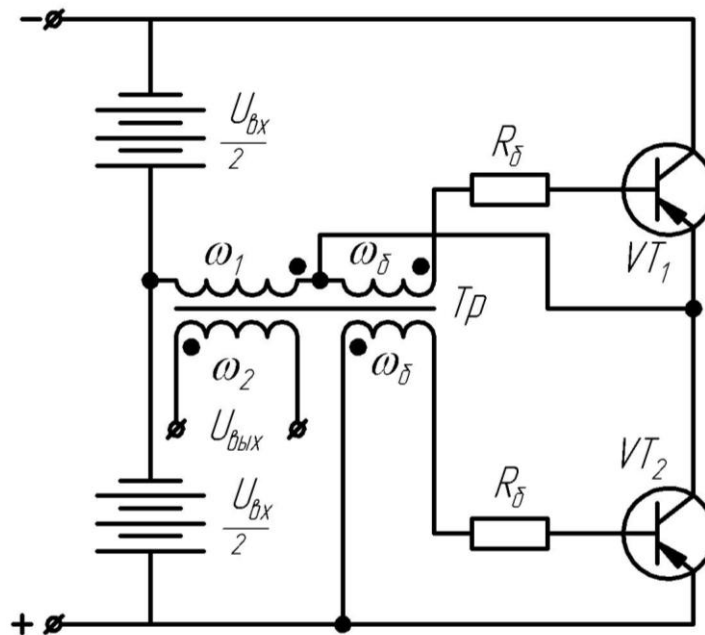


Рис. 1.3. Мостовые автогенераторы



а)



б)

Рис. 1.4. Схемы полумостовых преобразователей напряжения с самовозбуждением

В связи с возможностью работать на напряжениях выше 30 В мостовые схемы являются перспективными при преобразовании средних и больших мощностей. Основным недостатком мостовых схем по сравнению со схемами на рис. 1.1 и 1.2 является большое количество транзисторов. Увеличение числа транзисторов сказывается

на увеличении потребляемой преобразователем мощности. Поэтому для решения некоторых технических задач применяются полумостовые преобразователи напряжения. Они реализуются на базе мостовой схемы заменой двух транзисторов смежных плеч моста емкостным делителем (рис. 1.4, а). Емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  выбираются по величине допустимого постоянного напряжения и допустимой переменной составляющей. В свою очередь, этим ограничивается преобразуемая мощность.

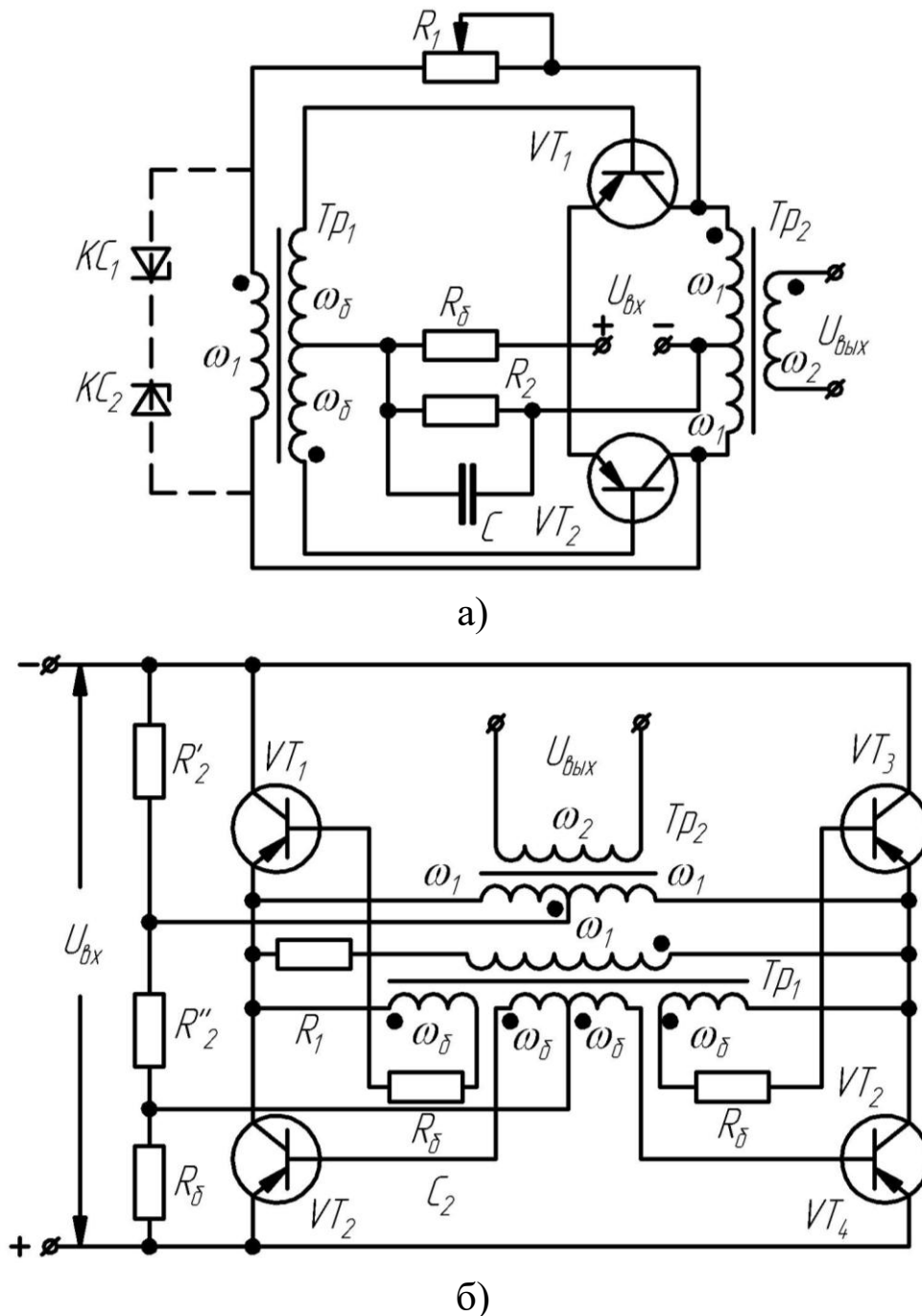


Рис. 1.5. Схемы автогенераторов с переключающим трансформатором

Емкость конденсаторов делителя определяется по формуле

$$C \geq \frac{I_{\text{вх}} \cdot T}{2U_{\text{вх}}}.$$

На рис. 1.4, б показана полумостовая схема без емкостного делителя. В таком случае необходимо осуществить питание от источника постоянного тока с отводом от середины.

На рис. 1.5 показана схема преобразователя с переключающим трансформатором, который работает без захода в режим насыщения материала магнитопровода. Переключение транзисторов в нем осуществляется по уровню насыщения маломощного трансформатора  $Tr_1$ .

Выходное напряжение преобразователя имеет ту же форму, что и в предыдущих схемах, а частота определяется по уравнению (1.1), в котором вместо  $U_{\text{вт}}$  необходимо поставить  $U_1$  – напряжение на первичной обмотке переключающего трансформатора.

Изменяя величину сопротивления  $R_1$  в цепи первичной обмотки маломощного переключающего трансформатора, можно регулировать частоту выходного напряжения в небольшом диапазоне.

Стабилитроны  $KC_1$  и  $KC_2$  на схеме рис. 1.5, а, подключенные параллельно обмотке трансформатора стабилизируют частоту выходного напряжения преобразователя. В результате потери мощности в транзисторах снижаются. Подобные преобразователи могут применяться при более высоких частотах преобразования и на мощности более 200 Вт в отличие от преобразователей с насыщенным выходным трансформатором.

### *Усилители мощности*

Усилители мощности (рис. 1.6) отличаются тем, что базовые обмотки управления расположены на магнитопроводе трансформатора  $Tr_1$  маломощного задающего генератора [1].

Наибольшее применение в источниках питания получили схемы усилителей мощности с отводом от середины первичной обмотки выходного трансформатора (рис. 1.6, а) и мостовая схема (рис. 1.6, б)

[1]. Полумостовые схемы используются значительно реже, так как они требуют применения либо источника питания с отводом от середины (рис. 1.6, в), либо установки двух конденсаторов значительной емкости (рис. 1.6, г) [1].

Усилители мощности (см. рис. 1.6, а) применяются при питании от напряжения  $U_{\text{вх}} \leq 25\text{--}30\text{ В}$ , а преобразователи (см. рис. 1.6, б) – при питании напряжением свыше 30 В. В усилителе мощности выходной трансформатор работает без захода в режим насыщения материала магнитопровода. Из-за несимметрии плеч схемы происходит подмагничивание магнитопровода постоянной составляющей результирующего тока первичной обмотки [1].

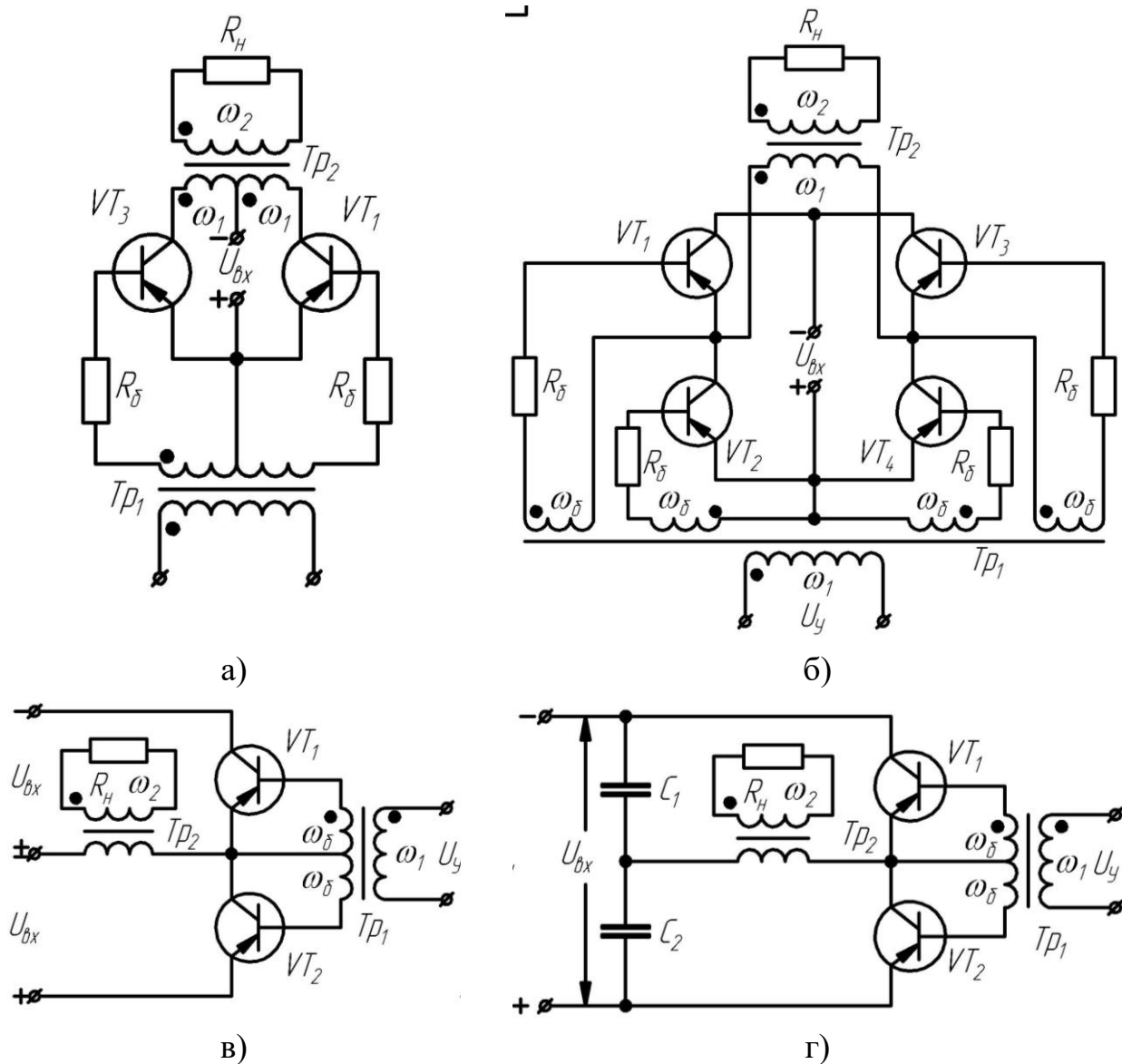


Рис. 1.6. Схемы усилителей мощности

Из-за такого подмагничивания происходит искажение петли гистерезиса и магнитопровод входит в режим насыщения. Искажение образуется во время переключения транзисторов вследствие применения материала трансформатора с прямоугольной петлей гистерезиса. Указанное явление сопровождается всплесками тока и существенным различием тепловых режимов работы смежных плеч. Применение материалов при изготовлении сердечников трансформаторов с непрямоугольной петлей гистерезиса (например сталь ХВП) и выполнение их разрезными позволит устранить указанное явление.

## **1.2. Особенности проектирования преобразователей напряжения и основные расчетные соотношения**

Основными этапами разработки преобразователей напряжения является:

- 1) выбор рациональной схемы преобразователя в соответствии с заданными условиями работы,
- 2) выбор типа и подбор по параметрам транзисторов,
- 3) расчет режимов работы транзисторов,
- 4) расчет и проектирование трансформатора – основной элемент преобразователя.

Как уже отмечалось выше, выбор транзисторов осуществляется по следующим параметрам: току коллектора, напряжению коллектор – эмиттер, коэффициенту усиления и граничной частоте.

Расчетные формулы статического режима транзисторов схожи для автогенераторов и усилителей мощности.

Ток коллектора открытого транзистора зависит от выходной мощности преобразователя и напряжения питания и определяется следующими соотношениями [1]:

для преобразователей со средней точкой

$$I_{\text{кс}} = \frac{I_2 U_2}{\gamma_{\text{in}} (U_{\text{вх}} - U_{\text{кн}})}; \quad (1.2, a)$$

для мостовой схемы

$$I_{\text{КС}} = \frac{I_2 U_2}{\gamma_{\text{in}} (U_{\text{вх}} - 2U_{\text{кн}})}; \quad (1.2, б)$$

для полумостовой схемы

$$I_{\text{КС}} = \frac{2 \cdot I_2 U_2}{\gamma_{\text{in}} (U_{\text{вх}} - 2U_{\text{кн}})}. \quad (1.2, в)$$

Максимальная величина силы тока коллектора в момент включения зависит от параметров схемы, режима работы транзисторов и инерционных свойств.

Для преобразователей с самовозбуждением и насыщающимся выходным трансформатором амплитудное значение силы тока коллектора определяется по формуле

$$I_{\text{к. макс}} = I_{\text{КС}} \cdot K_1 \cdot b_{\text{мин}} \frac{B_{\text{ст. макс}}}{B_{\text{ст. мин}}}, \quad (1.3)$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий влияние инерционных свойств транзистора и величины коллекторного напряжения на амплитудное значение тока коллектора.

Для мощных транзисторов (типа ГТ701А, КТ837 или зарубежных аналогов 2NУ74, 2N2659, 2N5891, AD130 и др.), имеющих толщину базовой области порядка 100 мкм [5],

$$K_1 \approx \frac{1}{(1 - 0,03\sqrt{U_{\text{вх}}})^2}.$$

Минимальное значение коэффициента насыщения  $b_{\text{мин}}$  определяется формулой

$$b_{\text{мин}} = \frac{I_{\text{б}} \cdot B_{\text{ст. мин}}}{I_{\text{КС}}}$$

и обычно выбирается равным  $b_{\text{мин}} = 1,3\text{--}1,5$ .

В уравнении (1.3) амплитуда тока коллектора в автогенераторах зависит от коэффициента усиления транзисторов по току.

В ПН с самовозбуждением для эффективного работы рекомендуется применять транзисторы с минимально возможным разбросом по  $B_{\text{ст}}$ .

Ток коллектора транзистора в усилителе мощности определяется по следующей формуле:

$$I_{к.макс} = K_2 I_{кс}, \quad (1.4)$$

где  $K_2$  – коэффициент, учитывает взаимное влияние транзисторов усилителя мощности друг на друга и принимается  $K_2 \approx 1,1–1,3$ .

Сравнивая формулы (1.3) и (1.4), можно сказать, что сила тока коллектора в автогенераторе может значительно превышать силу тока коллектора в усилителе мощности. В связи с тем, что соотношение  $V_{ст.макс} / V_{ст.мин}$  для различных типов транзисторов может колебаться в пределах  $2 \div 7$ , транзисторы в автогенераторах работают неэффективно по сравнению с усилителями мощности. Поэтому для преобразования мощностей свыше 100 Вт рекомендуется применять усилители мощности.

Параллельное включение транзисторов применяется в случаях, когда сила тока коллектора превышает предельно допустимое значение. Количество транзисторов для параллельного включения (работы) определяется по формуле

$$N = \frac{I_{к.макс} \cdot K_3}{I_{кд}},$$

где  $K_3 \approx 1,5–2$  – коэффициент запаса.

Для равномерного распределения тока между параллельно включенными транзисторами в эмиттерные или базовые цепи их могут включаться уравнивающие сопротивления. Эти транзисторы рекомендуется располагать на общем радиаторе с целью выравнивания их теплового режима [1].

В коллекторные или эмиттерные цепи параллельно включенным транзисторам включают быстродействующие предохранители, что повышает надежность работы ПН. В результате при выходе из строя транзисторов в разных плечах он остается в рабочем состоянии. Запас по току коллектора в таком случае обеспечивает надежную работу оставшихся исправных транзисторов ПН.

Величина напряжения во время коммутационных процессов на закрытом транзисторе не должна превышать предельно допустимого значения напряжения коллектор – эмиттер транзистора согласно тех-



ническим условиям. Величина перенапряжений зависит от индуктивности рассеяния первичной обмотки трансформатора и скорости изменения тока коллектора. Для уменьшения индуктивности параллельно выводам коллектора и эмиттера включаются диоды или стабилитроны (см. рис. 1.5, а).

Напряжение эмиттер – коллектор транзистора преобразователя рассчитывается по максимальному напряжению питания и принимается примерно равным [1]:

для преобразователей с выводом средней точки первичной обмотки выходного трансформатора

$$U_{\text{эк}} \approx 2,4U_{\text{вх. макс}}; \quad (1.5, а)$$

для мостового или полумостового преобразователя

$$U_{\text{эк}} \gg 1,2U_{\text{вх. макс}}. \quad (1.5, б)$$

Если рассчитанное значение напряжения на закрытом транзисторе превышает предельное допустимое значение, то транзисторы или преобразователи подключаются последовательно. В таком случае является обязательным одновременная подача напряжения возбуждения на транзисторы, что достигается расположением обмоток управления на одном трансформаторе.

Равномерное распределение напряжения на запертых транзисторах достигается включением параллельно им шунтирующих сопротивлений. Ток через них должен быть в 2–3 раза больше тока утечки коллектора при максимальной температуре корпуса транзистора.

Для защиты транзисторов от пробоя в результате динамических процессов переключения включают стабилитроны параллельно эмиттеру и коллектору или коллектору и базе.

При проектировании ПН стараются улучшить массогабаритные показатели. Это возможно за счет увеличения частоты переключения транзисторов. В результате повышения частоты переключения транзисторов увеличиваются потери в них и потребляемая мощность, вследствие чего наблюдается снижение КПД преобразователя и увеличение габаритов и веса радиаторов охлаждения. Поэтому рекомен-

дуются использовать высокочастотные транзисторы с меньшим сопротивлением насыщения.

На практике широкое распространение нашли мощные транзисторы П210, П214–П217 с частотами переключения не выше 1–3 кГц. Маломощные П26, 1Т403 применяются при частотах не выше 3–5 кГц. Преобразователи высоких частот выполняются на высокочастотных дрейфовых транзисторах типа П605, 2Т803 и др.

Указанные транзисторы применялись в военно-промышленном комплексе, поэтому к свойствам и характеристикам этих транзисторов предъявлялись особые требования. В настоящее время они не производятся, в связи с чем рекомендуется применять современные транзисторы, наиболее схожие по свойствам с транзисторами типа ГТ701А, КТ837 или зарубежными аналогами 2NУ74, 2N2659, 2N5891, AD130 и др.

Мощность, рассеиваемая транзистором в преобразователе напряжения, состоит из мощности потерь в режимах отсечки  $P_{отс}$  насыщения  $P_{нас}$  и в активной области работы транзистора  $P_{дин}$  [1]:

$$P_k = P_{отс} + P_{нас} + P_{дин}. \quad (1.6, a)$$

Потери мощности в режиме отсечки

$$P_{отс} = \frac{1}{2} \cdot I_{к0} \cdot U_{кэ}. \quad (1.6, б)$$

Потери мощности в режиме насыщения транзистора определяются по формуле

$$P_{нас} = \frac{1}{2} \cdot I_{кс} \cdot U_{кн}. \quad (1.6, в)$$

Динамические потери мощности в режиме переключения транзисторов зависят от частотных свойств используемых транзисторов и определяются из выражения

$$P_{дин} = U_{вх.макс} I_{кс} \cdot \tau_\beta \cdot f \cdot \gamma, \quad (1.6, г)$$

где  $\tau_\beta$  – время жизни неосновных носителей в базовой области транзистора;

$\gamma$  – коэффициент, зависящий от схемы преобразователя и режима работы транзисторов.

Величина  $\tau_\beta$  может быть вычислена по известной граничной частоте  $f_\beta$  в соответствии с формулой

$$\tau_\beta = \frac{1}{2\pi \cdot f_\beta}. \quad (1.7)$$

Для схемы автогенератора (см. рис. 1.1, а) значение  $\gamma$  определяется формулой [1]

$$\gamma \approx 1 + \frac{0,2}{K_1}, \quad (1.7, а)$$

а для схемы на рис. 1.1, б – формулой

$$\gamma \approx \frac{\pi}{b} \cdot \frac{0,83K_1 - 0,25}{K_1^2}. \quad (1.7, б)$$

Для УМ величина  $\gamma$  зависит от коэффициента насыщения (рис. 1.7) [1,4]

$$b = \frac{I_{\bar{6}} \cdot B_{CT}}{I_{КС}}. \quad (1.7, в)$$

На уменьшение динамических потерь мощности в транзисторах ПН влияет включение конденсаторов  $C_d$  параллельно базовым сопротивлениям  $R_5$ .

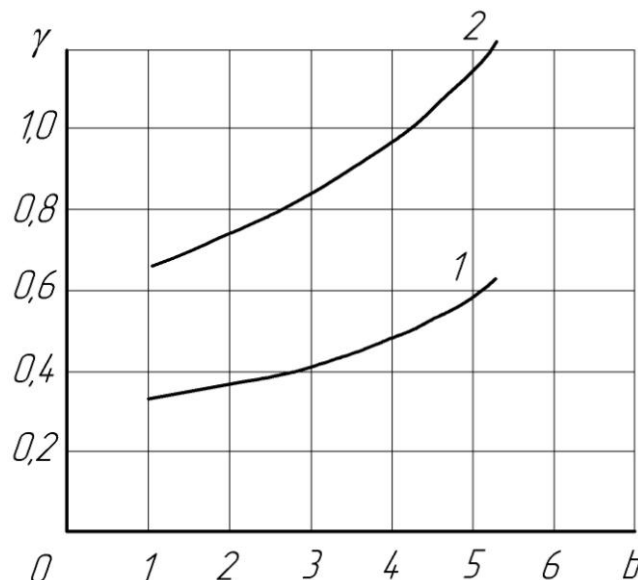


Рис. 1.7. Зависимость величины коэффициента  $\gamma$ , характеризующего величину динамических потерь в транзисторах усилителя мощности, от коэффициента насыщения транзистора:

1 – для мостового усилителя мощности;

2 – для усилителя мощности с выводом от середины первичной обмотки

Величина емкости конденсатора для симметричного преобразователя (см. рис. 1.1, *a*) находится по формуле

$$C_o \leq \frac{T}{2R_o}.$$

Коэффициент  $b$  характеризует избыточную величину тока базы, при которой достигается полное насыщение транзистора.

Минимальное значение  $b$  определяется исходя из надежного насыщения транзисторов при наихудших условиях эксплуатации для преобразователей, работающих в широком диапазоне изменения напряжения питания и температуры окружающей среды. Наихудшими условиями эксплуатации являются: минимальное напряжение питания, максимальная нагрузка, минимальная температура окружающей среды при разбросе параметров транзисторов ПН.

Минимальная величина тока базы, при которой обеспечивается надежный режим насыщения транзисторов, определяется как

$$I_{б.мин} = \frac{I_{кс} \cdot b_{мин}}{B_{ст.мин}}.$$

При расчете динамических потерь мощности в транзисторах преобразователя необходимо учитывать максимальное значение коэффициента насыщения  $b_{макс}$ , которое может превосходить  $b_{мин}$  в несколько раз [1]:

$$b_{макс} = \frac{I_{б.макс} \cdot B_{ст.макс}}{I_{кс.макс}}.$$

При проектировании и расчете ПН необходимо выбирать значения параметров транзисторов в соответствии с полученными расчетными значениями тока коллектора и напряжения на коллекторе по справочным данным.

К трансформатору преобразователя предъявляются следующие основные требования:

- 1) трансформатор должен работать либо в зоне насыщения материала сердечника, либо нет. Зависит от типа ПН;
- 2) должен иметь малые потери в магнитопроводах и обмотках;

- 3) должен обладать небольшой величиной тока холостого хода;
- 4) должен характеризоваться малой индуктивностью рассеяния.

Указанные требования достигаются выбором марки стали и толщины ленты магнитопровода сердечника в соответствии с рабочей частотой. Оптимальные конструкция трансформатора и размещение обмоток позволяют уменьшить потери и улучшить его охлаждение.

Для выбора магнитного материала сердечника можно воспользоваться специальными справочными таблицами и графиками, учитывающими свойства материалов, определяемые петлей гистерезиса (рис. 1.8) и статическими характеристиками на постоянном токе. В зависимости от формы петли гистерезиса (см. рис. 1.8) магнитные материалы можно разделить на три основные группы.

К первой группе относятся магнитные материалы с высокой прямоугольностью петли гистерезиса (кривая 1), для которых  $B_1/B_s = 0,85-0,9$ , это пермаллоевые сплавы 34НКМП, 79НМ, 50НП и магний-марганцевые ферриты с такими же характеристиками.

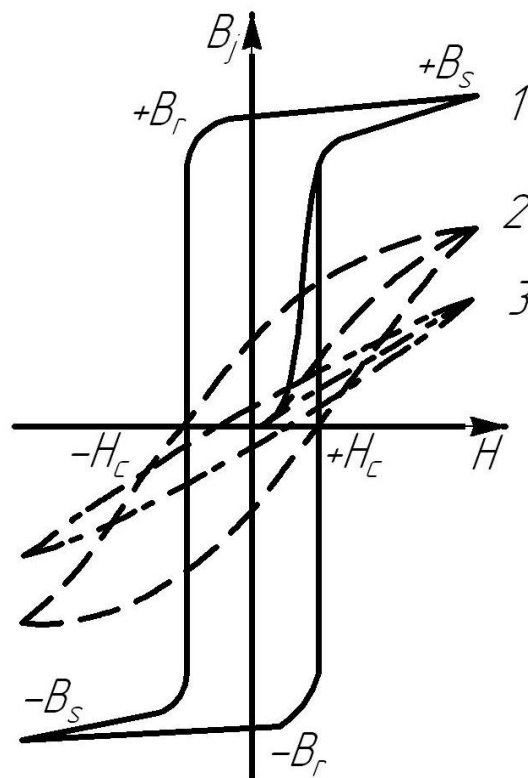


Рис. 1.8. Форма петли гистерезиса ферромагнитных материалов

Магнитные материалы этой группы применяются для изготовления тороидальных магнитопроводов трансформаторов автогенераторов и переключающих трансформаторов в двухтрансформаторных схемах. Они работают с заходом в область насыщения материала магнитопровода.

Вторая группа магнитных материалов характеризуется сравнительно большой магнитной проницаемостью, но имеет меньшую прямоугольность петли гистерезиса (кривая 2). К ней относятся электротехнические стали Э306-Э380 (ХВП), которые применяются в силовых трансформаторах усилителей мощности и автогенераторов при низких частотах преобразования.

К третьей группе относятся магнитные материалы с пологой петлей гистерезиса и линейной кривой намагничивания (кривая 3). Характерным для них является малое значение магнитной проницаемости, которая почти не зависит от величины индукции. Такие магнитные материалы находят применение в резонансных LC-контурах ПН [1].

На практике магнитопровод трансформатора ПН работает в режиме перемагничивания напряжением прямоугольной формы повышенной частоты. Поэтому при выборе магнитного материала необходимо учитывать частотные характеристики, а именно удельные потери.

Частотные характеристики магнитных материалов, значения напряженности магнитного поля в диапазоне частот, наиболее часто применяемых в трансформаторах ПН, приведены в табл. 1.1. Используя данные таблицы, можно определить ток холостого хода трансформатора по формуле

$$I_{xx} = \frac{H \cdot I_{cp}}{\omega_1},$$

где  $I_{cp}$  – средняя длина магнитной силовой линии.

Наилучшими будут магнитные материалы с минимальными удельными потерями и максимальной проницаемостью на данной частоте.

Таблица 1.1

**Частотные характеристики материалов при питании напряжением****прямоугольной формы  $P_{уд}\left(\frac{6m}{\kappa z}\right)$  и  $H\left(\frac{a}{m}\right)$** 

$f, \text{кГц}$	$B_T, \text{Тл}$	Марка материала и толщина ленты, мм				
		Э350	33НК	34НКМП	34НК	40НКМ
		0,1	0,05	0,1	0,05	0,1
1,0	0,5	7/30	1,8/9,5	2,3/12	2,7/15	5,8/24
	0,6	11/34	2,9/12	3,6/13	3,9/16	8/25
	1,0	24,6/47	7,2	7,2/17	7/17	15,3/2
	1,2	35/57	10	10/19	9,1/19	19/33
	1,4	50/80	—	13/25	11,5/2	23/58
1,6	0,5	14/35	—	4,5	4,8	11,3
	0,6	23/41	—	7	7	16
	1,0	48/55	—	14	13,3	31
	1,2	68/65	—	19	17,3	39
	1,4	98/90	—	25	22	47
2,4	0,5	25,5/40	5	7,4/16	8,5/20	20,5/3
	0,6	40/47	8/14	11,5/19	12,5/2	29/36
	5	86/64	19	26/25	1	54/44
	1,2	118/77	26	35/30	30/24	69/56
	1,4	165/99	—	45/42	37/30	83/105
3,5	0,5	43/48	9	14/21	15/23	38/42
	0,6	70/56	15/15	21/23	22/24	54/45
	1,0	150/75	35	43/32	42/26	93/56
	1,2	200/89	50	60/40	54/28	17/67
	1,4	280/110	—	75/56	68/48	43/120

**Частотные характеристики материалов при питании напряжением****прямоугольной формы (продолжение)  $P_{уд}\left(\frac{вт}{кз}\right)$  и  $H\left(\frac{а}{т}\right)$** 

<b>Марка материала и толщина ленты, мм</b>						
40НК	50НП	50НП	68Н	79НМ	79НМ	79Н
0,05	0,05	0,02	0,05	0,1	0,05	0,02
3,1/13 4,5/15 8,5/20 11/26 14	6/28 8,4/29 15/30 19/32 23/37	3,4/14 4,4/15 — — —	2,5/1 3,6/1 7,1/1 — — —	1,2/5,8 2,1/8 — — —	0,9/4 1,4/9 — — — —	1/7 1,4 — — — —
6,1/15 9 16/22 20,5/2 25,5	— — — —	— — — —	5/14 7,5/1 14,7/22 —	2,5/8 4,5/11 — — —	1,6/5 2,7/9 — — — —	1,6/8 2,6 — — — —
10/17 14,5/2 28/25 36,5/3 45	17/32 24/33 43/34 54/37 65/45	9,6/17 13,5/1 — — —	9,5/1 14/18 28/25 — —	5,2/10 9,4/13 — — —	2,9/6 4,8/10 — — — —	2,7/8 4,3 — — — —
16/20 24/23 45/28 58/35 72	27/35 37/36 70/37 89/41 107/5	— — — — —	16/17 23,5/20 47/29 — —	11/14 20/18 — — —	5,2/7 8,6/11 — — — —	4,4/9 7 — — — —



$f$ , кГц	ВГ, ТЛ	Марка материала и толщина ленты, мм				
		Э350	33НКМС	34НКМП	34НКМП	40НКМП
		0,1	0,05	0,1	0,05	0,1
5,0	0,5	75/56	15	25/24	23/26	67/475
	0,65	120/68	24/18	38/28	33/27,5	93/52
	1,0	260/96	57	79/40	66/29	160/68
	1,2	355/113	80	105/50	86/33	202/89
	1,4	480/135	—	135/85	107/53	243/165
7,5	0,5	133/70	26	46/28	40/30	100/56
	0,65	215/85	43/21	65/34	58/33	140/62
	1,0	460	103	133/48	118/36	255/84
	1,2	620	143	180/60	152/41	320/103
	1,4	820	—	230/100	190/64	390/190
10	0,5	205/83	42	68/34	61/33	145/63
	0,65	430/98	68/23	103/39	90/36	200/71
	1,0	650	160	220/54	173/44	400/94
	1,2	880	225	295/66,5	225/54	500/125
	1,4	—	—	380/103	280/74	600/250
15	0,5	390/100	74	132/42	113/39	260/78
	0,65	610/117	120/25	205/48	165/42	360/88
	1,0	—	280	400/66	220/50	690/124
	1,2	—	400	550/76	425/59	860/155
	1,4	—	—	700/110	540/86	—
20	0,5	600/117	147/33	212/48	155/43	490/85
	0,65	135	240	330/55	230/48	540/98
	1,0	—	580	650/75	460/581	1000/137
	1,2	—	800	900/86	600/66	—

Марка материала и толщина ленты, мм						
40НКМП	50НП	60НП	68НМП	79НМ	79НМ	79НМ
0,05	0,05	0,02	0,05	0,1	0,05	0,02
29/23,5	42/36,5	21,5/21	29/23	20/18	10,5/8	6,6/9
42/26	59/38	30/22	42/25	36/27	16/14	11
79/31	120/41	—	84/38	—	—	—
100/39	150/44	—	—	—	—	—
125	180/58	—	—	—	—	—
50/27	67/40	41/25	50/28	41/27	20/10	12/10
72/29	94/41	58/27	73/32	74/40	33/18	20
134/35	205/43	—	147/55	—	—	—
173/44	260/48	—	—	—	—	—
213	310/60	—	—	—	—	—
84/30	100/42,5	56/29	86/35	90/34	32/13	18/12
120/32	140/44	78/32	130/40	160/53	51/20	38
225/37	287/50	—	260/69	—	—	—
200/46	260/56	—	—	—	—	—
200/37	142/45	—	152/39	175/50	63/17	35/16
375/41	195/46	—	235/47	320/75	100/25	60
485/54	470/54	—	470/84	—	—	—
600/85	600/62	—	—	—	—	—
240	720/100	—	—	—	—	—
350/48	190/48	—	235/50	305/68	100/20	53/22
630/54	260/52	—	363/63	500/10	150/30	80
800/69	720/63	—	720/115	—	—	—
—	930/78	—	—	—	—	—
Примечания:						
Для каждого материала при данной частоте $f$ и индукции $B_T$ в таблице приведены над чертой значения удельных потерь, а под чертой – напряженность магнитного поля. Например, для материала 34НКМП толщиной 0,1 мм при частоте $f = 2,4$ кГц и индукции $B=0,5$ Тл находим из таблицы $P_{уд}=7,4$ Вт/кг, а $H=16$ а/м.						

Как видно из табл. 1.1, для ряда магнитных материалов существует оптимальная толщина ленты, при которой удельные потери ока-

зываются минимальными. Например, для тороидальных трансформаторов из пермаллоя 79НМ минимальные потери на частотах до 5 кГц получаются при толщине ленты 0,05 мм. Это объясняется тем, что с уменьшением толщины магнитного материала наряду с уменьшением потерь на вихревые токи растут потери на гистерезис. Поэтому можно выбрать некоторые оптимальные толщины магнитных материалов, указанные в табл. 1.2.

Таблица 1.2

**Рекомендуемые толщины (мм) магнитных материалов  
для трансформаторов преобразователей на повышенные частоты**

Материал	Частота $f$ , кГц			
	1–2	2–6	6–10	10–20
34НКМП	0,1	0,05	0,05–0,02	0,02
40НКМП	0,1–0,05	0,05	0,05–0,02	—
50НП	0,1	0,05–0,02	0,02	—
68НМП	0,1–0,05	0,05	0,02	—
79НМ	0,1	0,1–0,05	0,05	0,02
33НКМС	0,1	0,05	0,05–0,02	0,02
Э350	0,1–0,05	—	—	—

Размеры магнитопровода трансформатора определяются по формуле

$$Q_{cm} \cdot Q_0 = \frac{P_{gab} \cdot 10^2}{2f \cdot B_m \cdot \zeta \cdot k_c \cdot k_m \cdot \gamma_{TP}}. \quad (1.8)$$

Габаритная мощность трансформатора, входящая в формулу (1.8), равна, по определению, полусумме габаритных мощностей первичных и вторичных обмоток трансформатора. Если выходная обмотка преобразователя нагружена на активное сопротивление или мостовой выпрямитель, то в соответствии с [1]

$$P_{gab} = 1,3 \cdot U_2 \cdot I_2. \quad (1.9, a)$$

Если нагрузкой ПН служит двухполупериодный выпрямитель со средней точкой, то

$$P_{gab} = 2,1 \cdot U_2 \cdot I_2. \quad (1.9, б)$$

Для мостовых преобразователей соответственно

$$P_{\text{заб}} = 1,1 \cdot U_2 \cdot I_2; \quad (1.10)$$

$$P_{\text{заб}} = 1,3 \cdot U_2 \cdot I_2, \quad (1.11)$$

где  $U_2$  – напряжение вторичной обмотки;

$I_2$  – действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора.

На характеристики ПН оказывает влияние конструкция трансформатора. При мощности преобразования до 1 кВт наиболее эффективными являются трансформаторы, выполненные на тороидальных магнитопроводах [1]. Небольшие габаритные размеры и низкие потери достигаются применением тонких ленточных высококачественных магнитных материалов, повышением плотности тока в обмотках и хорошим их охлаждением. Намотка коллекторной (расположенной первой на магнитопроводе) и базовой обмоток параллельными проводами и равномерное их размещение по периметру магнитопровода дают возможность снизить индуктивность рассеивания.

Основные параметры тороидальных сердечников нормализованного ряда приведены в табл. 1.3.

Недостатком тороидальных трансформаторов является плохое охлаждение сердечника и трудность намотки проводом большого сечения. Это ограничивает мощность тороидальных трансформаторов: на частотах 400 Гц – не выше 500 ВА, а на 1000 Гц – до 1 кВА.

Наряду с тороидальными сердечниками возможно также применение витых разрезных сердечников, особенно при достаточно больших мощностях преобразователя напряжения.

Таблица 1.3

**Основные параметры некоторых типов тороидальных сердечников  
нормализованного ряда для трансформаторов**

Тип торои- дального сердечника	Параметры тороидальных сердечников								
	Размеры, мм*				Площадь сечения магнито- провода $Q_{ст}$ , см <sup>2</sup>	Длина средней магнит- ной си- ловой линии, см	Площадь окна $Q_0$ , см <sup>2</sup>	Вес маг- нитопрот- вода, г	Произве- дение сечений $Q_{ст} Q_0$ , см <sup>4</sup>
	$d$	$a$	$b$	$D$					
ОЛ-12/14-3	12	1	3	14	0,03	4,1	1,13	0,96	0,034
ОЛ-14/17-3	14	1,5	3	17	0,045	4,86	1,54	1,71	0,069
ОЛ-16/20-3	16	2	3	20	0,06	5,65	2,0	2,65	0,121
ОЛ-18/23-4	18	2,5	4	23	0,1	6,45	2,55	5,0	0,25
ОЛ-20/25-5	20	2,5	5	25	0,125	7,1	3,14	6,9	0,39
ОЛ-20/25-6,5	20	2,5	6,5	25	0,162	7,1	3,14	9,1	0,51
ОЛ-20/28-5	20	4	5	28	0,2	7,55	3,14	11,6	0,63
ОЛ-22/30-5	22	4	5	30	0,2	8,2	3,82	12,7	0,765
ОЛ-22/30-6,5	22	4	6,5	30	0,26	8,2	3,82	16,5	0,99
ОЛ-25/35-5	25	5	5	35	0,25	9,42	4,9	18,3	1,23
ОЛ-25/35-6,5	25	5	6,5	35	0,325	9,42	4,9	23,8	1,6
ОЛ-25/40-5	25	7,5	5	40	0,375	10,2	4,9	27,6	1,84
ОЛ-25/40-6,5	25	7,5	6,5	40	0,49	10,2	4,9	36	2,4
ОЛ-28/40-8	28	6	8	40	0,48	10,7	6,1	40	2,95
ОЛ-28/40-10	28	6	10	40	0,6	10,7	6,1	50	3,7
ОЛ-32/45-8	32	6,5	8	45	0,52	12,1	8,0	48,8	4,15
ОЛ-32/50-8	32	9	8	50	0,72	12,9	8,0	58,5	5,7
ОЛ-36/56-10	36	10	10	56	1,0	14,4	10,2	112	10,2
ОЛ-40/56-16	40	8	16	56	1,28	15	12,5	150	16

$d$  – внутренний диаметр;

$D$  – наружный диаметр;

$b$  – ширина ленты;

### 1.3. Двухтактные преобразователи напряжения с самовозбуждением

Рассмотрим работу двухтактного ПН (см. рис. 1.1, б). Осциллограммы процессов в данной схеме приведены на рис. 1.9.

При включении источника питания в цепи делителя  $R_1 - R_5$  протекает ток, который создает на сопротивлении  $R_8$  напряжение смещения, приоткрывающее оба транзистора преобразователя.

Из-за разброса параметров транзисторов в момент запуска преобразователя токи коллекторов оказываются различными. Токи первичной обмотки трансформатора наводят во всех обмотках ЭДС. Затем напряжение положительной обратной связи в обмотках возбуждения лавинообразно открывает один из транзисторов и закрывает другой. В результате ток открытого транзистора можно определить по формуле

$$i_k = i_1 = i_2 n_2 + i_6 n_6 + i_m. \quad (1.12)$$

Изменение тока от нуля до значения  $I_k$  соответствует точке  $A$  (рис. 1.9, б), одновременно с этим падение напряжения на транзисторе  $U_{кн}$  незначительно. Индукция в сердечнике трансформатора ПН увеличивается от  $-B_s$  до  $+B_s$  (рис. 1.9, в, г). Перемещение точки на выходной характеристике транзистора (см. рис. 1.9, б) из положения  $A$  в положение  $D$  вызвано уменьшением магнитной проницаемости материала сердечника. В этот момент перестает выполняться условие насыщения транзистора

$$I_{кс} \leq I_6 B_{CT}. \quad (1.13)$$

Увеличение напряжения между эмиттером и коллектором открытого транзистора сопровождается уменьшением напряжения на первичной обмотке трансформатора ПН и на обмотках положительной обратной связи. В результате ток базы уменьшается, а падение напряжения на его коллекторе увеличивается. В связи с указанным ла-

винным процессом рабочая точка перемещается в положение отсечки (точка В на рис. 1.9, б).

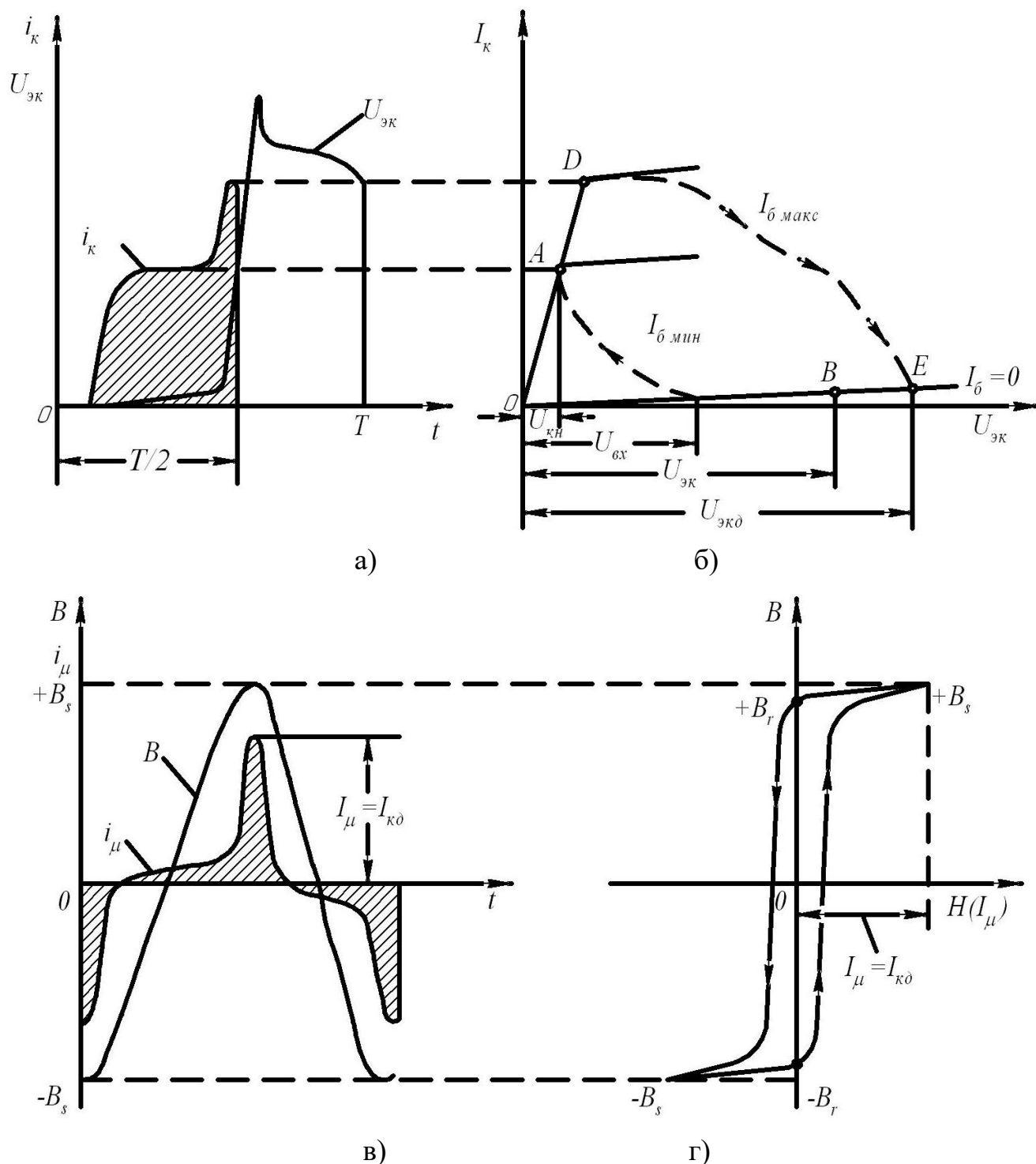


Рис. 1.9. Осциллограммы процессов в автогенераторе

Индукция в сердечнике трансформатора уменьшается от  $-B_s$  до  $+B_r$  (при  $H=0$ ), вызывая изменение полярности напряжений на обмотках трансформатора. В это время на базу закрытого транзистора подается отпирающее напряжение, а на базу открытого транзистора —

запирающее. Это приводит к переключению транзисторов ПН. Индукция в сердечнике трансформатора продолжает изменяться до значения  $-B_s$  (рис. 1.9, з) и процессы в схеме повторяются.

Ток базы открытого транзистора определяется по формуле

$$I_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}y} - U_{\bar{o}н}}{R_{\bar{o}}} \quad (1.14)$$

и обеспечивается соответствующим выбором напряжения базовой обмотки и дополнительного сопротивления в цепи базы транзистора:

$$R_{\bar{o}} = \frac{(U_{\bar{o}y} - U_{\bar{o}н})B_{ст.мин}}{I_{кс} \cdot b_{мин}}. \quad (1.15)$$

При расчете ПН следует задавать напряжение питания, выходную мощность, выходное напряжение, условия работы преобразователя.

Начинать проектирование ПН необходимо с выбора рациональной по условиям и режимам работы схемы. Если в схеме преобразователя на выходе должны присутствовать выпрямитель со сглаживающим фильтром, то сначала необходимо произвести расчет выпрямителя, определить величину напряжения вторичной обмотки трансформатора и действующее значение тока.

По формулам (1.3) и (1.5) рассчитываются величина силы тока коллектора и напряжение на коллекторе. Затем производится выбор транзисторов ПН по справочным данным каталогов [1, 2].

Для обеспечения надежного самовозбуждения автогенераторов в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды и нагрузки необходима достаточно сильная положительная обратная связь. Такая обратная связь в случае германиевых транзисторов обеспечивается выбором напряжения базовой обмотки порядка 2–3 В. При этом величина дополнительного сопротивления в цепи базы транзистора может быть рассчитана в соответствии с формулой (1.15) [1].

Иногда в делителе напряжения вместо сопротивления  $R_{\bar{o}}$  включается полупроводниковый диод в прямом направлении. Надежная работа преобразователя зависит от величины напряжения на



базовой обмотке. Оно должно быть для любых условий работы больше напряжения смещения, формируемого сопротивлением  $R_6$  и током делителя  $R_1$ – $R_6$ . В большинстве случаев для преобразователей на германиевых транзисторах напряжение смещения находится в пределах 0,5–1,0 В.

Величина сопротивления  $R_1$  делителя в этом случае может быть определена по формуле

$$R_1 = \frac{R_6 (U_{ex} - U_{6н})}{U_{R6}}. \quad (1.16)$$

Для надежного запуска преобразователя при максимальной нагрузке и при пониженной температуре окружающей среды сопротивление  $R_1$  может шунтироваться конденсатором емкостью от единиц до десятков микрофарад [1].

Аналогичным образом рассчитывается делитель напряжения для мостовых схем автогенераторов. На схеме (см. рис. 1.3, б) сопротивление  $R_6$  определяется по формуле (1.15), а остальные сопротивления рассчитываются по следующим формулам:

$$R_2 + R_3 = R_1 \frac{U_{ex} - U_{R1}}{U_{R6}}, \quad (1.17)$$

$$R_3 = 2R_1 \frac{U_{ex}}{U_{R6} \cdot B_{ст.мин}}. \quad (1.18)$$

Если частота преобразователя не задана, то с учетом сказанного выше можно ориентироваться при выборе на минимизацию веса и размеров ПН. Обычно преобразователи напряжения на мощных транзисторах работают в диапазоне частот от 400–500 до 1500–2500 Гц.

После расчета параметров и выбора транзисторов, а также определения режима их работы необходимо рассчитать трансформатор преобразователя. При расчете трансформатора выбираются материал и тип магнитопровода в соответствии с требованиями, предъявляемыми к проектируемой аппаратуре: КПД, массогабаритными характеристиками, стоимостью массового производства, состоянием технологии и т.п.

Электрический и конструктивный расчет трансформатора преобразователя напряжения производится по методике расчета маломощных силовых трансформаторов с учетом специфики работы его в схеме преобразователя.

После выбора типа и марки материала магнитопровода определяется типоразмер магнитопровода трансформатора (см. табл. 1.3) по величине произведения  $Q_{ст}Q_o$  (1.8).

Число витков первичной (коллекторной) обмотки трансформатора определяется с учетом (1.1) по формуле

$$\omega_1 = \frac{U_1 \cdot 10^1}{4 f B_s Q_{cm} k_c}, \quad (1.19)$$

где  $\omega_1$  – число витков половины первичной обмотки для трансформатора с выводом средней точки коллекторной обмотки или полное число витков первичной обмотки в случае мостовых или полумостовых преобразователей.

В зависимости от схемы преобразователя напряжение первичной обмотки трансформатора определяется по следующим формулам:

для ПН с выводом средней точки первичной обмотки трансформатора

$$U_1 = U_{\text{вх}} - U_{\text{кн}}; \quad (1.20, а)$$

для мостовых преобразователей

$$U_1 = U_{\text{вх}} - 2U_{\text{кн}}; \quad (1.20, б)$$

для полумостовых преобразователей

$$U_1 = 0,5(U_{\text{вх}} - U_{\text{кн}}). \quad (1.20, в)$$

В преобразователях с переключающим трансформатором величина напряжения на первичной обмотке переключающего трансформатора определяется по формулам:

$$\text{для схемы на рис. 1.5, а} \quad U_1 = 2(U_{\text{вх}} - U_{\text{кн}}) - U_{R1}; \quad (1.20, г)$$

$$\text{для схемы на рис. 1.5, б} \quad U_1 = U_{\text{вх}} - 2U_{\text{кн}} - U_{R1}. \quad (1.20, д)$$

Здесь  $U_{R1}$  – падение напряжения на сопротивлении  $R_1$ , включенном в цепь первичной обмотки переключающего трансформатора. Если первичная обмотка переключающего трансформатора подключена параллельно первичной обмотке выходного трансформатора преобразователя, как показано на рис. 1.5, а, то принимается обычно

$$U_{R1} = 0,5U_{\text{вх}}. \quad (1.21)$$

Расчет числа витков первичной обмотки выходного (ненасыщающегося) трансформатора в ПН с времязадающей  $RC$ -цепью или выходного трансформатора в преобразователе с переключающим трансформатором производится в соответствии с (1.19) при условии, что вместо  $B_s$  в формулу подставляется значение индукции  $B_m$ :

$$B_m = (0,7 - 0,8)B_s. \quad (1.22)$$

Число витков базовой обмотки определяется по формуле

$$\omega_o = \omega_1 \frac{U_{\text{вы}}}{U_1}. \quad (1.23)$$

Величина  $U_1$  рассчитывается по формулам (1.20) с учетом минимального напряжения питания  $U_{\text{вх.мин}}$ .

Число витков выходной обмотки

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{U_2}{U_1}. \quad (1.24)$$

Выбор сечения проводов обмоток трансформатора ПН производится согласно правилам устройства электроустановок и справочным таблицам по действующему значению токов соответствующих обмоток:

коллекторной

$$I_{\text{кэф}} = \frac{I_{\text{кс}}}{\sqrt{2}} \quad (1.25)$$

(для мостовых и полумостовых схем  $I_{\text{кэф}} = I_{\text{кс}}$ );

базовой

$$I_{\text{кбэф}} = \frac{I_{\text{б}}}{\sqrt{2}} = \frac{I_{\text{кс}} \cdot b}{\sqrt{2}B_{\text{ст.мин}}}. \quad (1.26)$$

Действующее значение тока вторичной обмотки зависит от характера нагрузки. При активной нагрузке преобразователя или при работе на выпрямитель, выполненный по мостовой схеме или схеме удвоения,

$$I_{2\text{эф}} = I_{2\text{макс}}, \quad (1.27, a)$$

а при двухтактном выпрямителе со средней точкой

$$I_{2\text{эф}} = \frac{I_{2\text{макс}}}{\sqrt{2}}. \quad (1.27, б)$$

Диаметры проводов обмоток трансформатора рассчитываются по формуле

$$d_i = 1,13 \sqrt{\frac{I_{i\text{э}}}{\delta}}. \quad (1.28)$$

По результатам электрического расчета ПН определяется тепловой режим работы полупроводникового прибора. Вычислив мощность потерь (1.6) и учтя температуру окружающей среды, условия охлаждения, можно рассчитать требуемую поверхность теплоотводящих радиаторов.

#### 1.4. Расчет полупроводниковых преобразователей напряжения

Исходные данные по вариантам для выполнения расчетов приведены в табл. 1.4. Вариант определяется по порядковому номеру из списка (ведомости) группы.

Таблица 1.4

Варианты исходных данных для расчета ПП напряжения

№ варианта	$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$f, \text{Гц}$
1	4±2	10	0,005	100
2	6±3	20	0,015	200
3	8±2	30	0,03	300
4	10±3	40	0,075	400
5	12±2	50	0,088	500
6	14±3	60	0,1	600
7	16±2	70	0,12	700
8	18±3	80	0,16	800
9	20±3	90	0,18	900
10	22±2	100	0,2	1000
11	24±3	110	0,215	1100
12	26±3	120	0,25	1200

№ варианта	$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$f, \text{Гц}$
13	$28 \pm 2$	130	0,35	1300
14	$30 \pm 3$	140	0,45	1400
15	$32 \pm 2$	150	0,55	1500
16	$34 \pm 3$	160	0,75	1600
17	$36 \pm 3$	170	0,85	1700
18	$38 \pm 3$	180	1,25	1800
19	$40 \pm 3$	190	2,5	1900
20	$42 \pm 3$	200	3	2000

### Задание № 1.4.1. Порядок расчета преобразователей с самовозбуждением

Порядок расчета преобразователей с самовозбуждением выполняется согласно уточненной и дополненной методике изложенной в [4].

#### *Исходные данные*

а) Величина входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ , по которой производится выбор и расчет схемы преобразователя. В задании определены отклонения напряжения питания, поэтому выбор транзисторов выполняем по максимальному значению напряжения питания  $U_{\text{вх.макс}}$ .

Зададимся для примера напряжением питания  $U_{\text{вх}}=14 \text{ В}$ , которое имеет отклонения в пределах от 12 до 17 В.

б) Рассмотрим случай, когда преобразователь работает на выпрямитель. Из предварительного расчета можно определить напряжение на выходе преобразователя  $U_2 = 100 \text{ В}$  и ток вторичной обмотки трансформатора  $I_2 = 0,2 \text{ А}$ . В нашем случае эти параметры заданы и принимаются по табл. 1.4 в соответствии с вариантом задания.

в) Частота преобразования  $f = 1000 \text{ Гц}$ .

г) Температура окружающей среды  $20 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Требуется выбрать схему преобразователя, тип транзисторов, рассчитать режим их работы и силовой трансформатор.

### Порядок расчета

1. Выбираем схему преобразователя напряжения исходя из величины напряжения питания  $U_{вх}$  и требуемой мощности. Если напряжение питания сравнительно низкое – до 20–25 В, а мощность мала – до 50–100 Вт, то рекомендуется выбрать схему автогенератора с выводом средней точки первичной обмотки трансформатора, так как в таких схемах число транзисторов вдвое меньше, чем в мостовых схемах преобразователей. В нашем примере выбираем двухтактную схему преобразователя напряжения (см. рис. 1.1, а).

2. Задаваясь величиной КПД преобразователя напряжения, определяем величину тока коллектора открытого транзистора  $I_{кс}$ . Если преобразователь работает на выпрямитель, то обычно  $\eta_{п} = 0,75–0,85$ , а при работе на активную нагрузку  $\eta_{п} = 0,85–0,95$ .

Следует отметить, что КПД преобразователя напряжения определяется многими факторами: величиной напряжения питания, частотой преобразования, выходной мощностью преобразователя, типом используемых транзисторов, качеством трансформатора и т.п. Поэтому при расчете величина  $\eta_{п}$  выбирается ориентировочно, а затем уточняется в процессе расчета.

Принимаем  $\eta_{п} = 0,75$  и вычисляем ток коллектора открытого транзистора. Полагая в (1.2, а)  $U_{кн}=0$ , получаем

$$I_{кс} = \frac{U_2 I_2}{\eta_{п} U_{вх}} = \frac{100 \cdot 0,2}{0,75 \cdot 14} = 1,9 \text{ А.}$$

Это значение тока коллектора открытого транзистора преобразователя может быть уточнено после выбора транзисторов с учетом падения напряжения на последних в режиме насыщения.

3. Определяем амплитуду напряжения между эмиттером и коллектором транзисторов преобразователя в соответствии с выражением (1.5, а):

$$U_{эк} = 2,4 \cdot U_{вх.макс} = 2,4 \cdot 17 = 41 \text{ В.}$$

4. По полученным значениям  $I_{кс}$  и  $U_{эк}$  выбираем транзистор типа КТ818. Транзисторы такого типа разбиваются на 4 группы по вели-

чине статического коэффициента усиления по току. В пределах каждой группы величина отношения  $B_{ст.макс}/B_{ст.мин}$  колеблется в диапазоне 1,65–1,75. Например, для транзисторов 3-й группы при температуре окружающей среды +20 °С  $B_{ст}=25–46$ .

При расчете преобразователя напряжения следует учитывать наихудшие параметры транзисторов (с учетом допустимого разброса и температурных уходов), с тем чтобы любые приборы выбранного типа обеспечивали надежную работу преобразователя.

5. Уточняем значение тока коллектора открытого транзистора преобразователя напряжения. Для выбранной схемы в соответствии с (1.2, а), учитывая, что при токе коллектора 2 А для транзистора КТ818  $U_{кн} = 0,5$  В, получаем

$$I_{кс} = \frac{U_2 I_2}{\eta_n (U_{ex} - U_{кн})} = \frac{100 \cdot 0,2}{0,75(14 - 0,5)} = 1,98 \text{ А.}$$

Такое уточнение величины тока коллектора открытого транзистора целесообразно проводить, когда напряжение  $U_{кн}$  превышает 10–15 % величины напряжения питания.

6. Проверяем максимальную величину тока коллектора транзистора преобразователя напряжения в момент переключения.

Приняв  $b_{мин} = 1,5$ ,  $K_1 = 1,4$ ,  $\frac{B_{ст.макс}}{B_{ст.мин}} = 1,7$ , получим в соответствии с (1.3):

$$I_{к.макс} = I_{кс} \cdot b_{мин} \cdot K_1 \frac{B_{ст.макс}}{B_{ст.мин}} = 1,98 \cdot 1,5 \cdot 1,4 \cdot 1,7 = 7 \text{ А.}$$

Для транзисторов КТ818  $I_{к.доп} = 9$  А, т.е.  $I_{к.макс} < I_{к.доп}$ .

7. По характеристикам магнитных материалов выбираем материал 34НКМП с толщиной ленты 0,1 мм. Для этого материала  $B_s = 1,47$  Тл. Магнитопровод трансформатора тороидальный.

8. Находим габаритную мощность трансформатора преобразователя согласно (1.9, а):

$$P_{габ} = 1,3 U_2 I_2 = 1,3 \cdot 100 \cdot 0,2 = 26 \text{ Вт.}$$

9. Задавшись значениями величин, входящих в выражение (1.8):

$$\eta_{mp} = 0,85; \delta = 3 \text{ А/мм}^2; \kappa_c = 0,8; \kappa_m = 0,3,$$

вычисляем произведение  $Q_{ст} \cdot Q_0$  для выбора типа магнитопровода:

$$Q_{ст} \cdot Q_0 = \frac{P_{заб} \cdot 10^2}{2 f B_s \eta_{mp} \delta \cdot k_c k_m} = \frac{26 \cdot 10^2}{2 \cdot 10^3 \cdot 1,47 \cdot 0,85 \cdot 3 \cdot 0,8 \cdot 0,3} = 1,44 \text{ см}^4.$$

По справочным данным табл. 1.3 ближайшим является магнитопровод ОЛ-25/35-5 с площадью поперечного сечения  $Q_{ст} = 0,25 \text{ см}^2$ .

10. Определяем число витков половины коллекторной обмотки трансформатора преобразователя. В соответствии с (1.19), (1.20, а) имеем

$$\omega_1 = \frac{(U_{вх} - U_{кн}) \cdot 10^4}{4 f \cdot B_0 Q_{ст} k_c} = \frac{(14 - 0,5) \cdot 10^4}{4 \cdot 10^3 \cdot 1,47 \cdot 0,25 \cdot 0,8} = 114 \text{ витков}.$$

11. Задавшись величиной напряжения обратной связи  $U_{бу} = 3 \text{ В}$ , вычисляем число витков базовой обмотки (1.23) с учетом минимального напряжения питания:

$$\omega_{\delta} = \frac{\omega_1 U_{бу}}{U_{вх.мин} - U_{кл}} = \frac{114 \cdot 3}{12 - 0,5} = 30 \text{ витков}.$$

12. Находим число витков вторичной обмотки (1.24):

$$\omega_2 = \frac{\omega_1 U_2}{U_{вх} - U_{кн}} = \frac{114 \cdot 100}{14 - 0,5} = 840 \text{ витков}.$$

13. Определяем действующие значения токов обмоток трансформатора:

$$\text{коллекторной (1.25)} \quad I_{кэф} = \frac{I_{кс}}{\sqrt{2}} = \frac{1,98}{\sqrt{2}} = 1,4 \text{ А};$$

базовой (1.26), принимая  $B_{ст.мин} = 25$ ,

$$I_{бэф} = \frac{I_{кэф} b_{мин}}{\sqrt{2} B_{ст.мин}} = \frac{1,4 \cdot 1,5}{1,4 \cdot 25} = 0,06 \text{ А}.$$

14. Вычисляем значения диаметров проводов обмоток трансформатора преобразователя (1.28):

$$\text{коллекторной} \quad d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{I_{кэф}}{\delta}} = 1,13 \sqrt{\frac{1,4}{3}} = 0,685 \text{ мм};$$



$$\text{базовой} \quad d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{I_{\text{бэф}}}{\delta}} = 1,13 \sqrt{\frac{0,06}{3}} = 0,14 \text{ мм};$$

$$\text{выходной} \quad d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{I_{2\text{эф}}}{\delta}} = 1,13 \sqrt{\frac{0,2}{3}} = 0,29 \text{ мм};$$

15. Определяем сопротивление дополнительного резистора в базовых цепях транзисторов преобразователя напряжения (1.15):

$$R_{\text{б}} = \frac{(U_{\text{бв}} - U_{\text{бн}}) B_{\text{ст.мин}}}{I_{\text{кс}} \cdot b_{\text{мин}}} = \frac{(3 - 0,4) 25}{1,98 \cdot 1,5} = 22 \text{ Ом.}$$

16. Задавшись величиной напряжения смещения от тока делителя на  $R_{\text{б}}$ , равной  $U_{R_{\text{б}}} = 0,3 \text{ В}$ , вычисляем величину сопротивления  $R_1$  делителя (1.16) при минимальном напряжении питания:

$$R_1 = R_{\text{б}} \frac{U_{\text{вх.мин}} - U_{\text{бн}}}{U_{R_{\text{б}}}} = 22 \frac{12 - 0,4}{0,3} = 850 \text{ Ом.}$$

Для обеспечения надежного запуска преобразователя рекомендуется шунтировать резистор  $R_1$  делителя конденсатором. Емкость такого конденсатора выбираем равной 1 мкФ.

17. Находим потери мощности в транзисторах преобразователя. Для транзисторов КТ818  $f_{\beta} = 5 \text{ кГц}$ .

$$\tau_{\beta} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{\beta}} = \frac{1}{6,28 \cdot 5 \cdot 10^3} = 32 \cdot 10^{-6} \text{ сек.}$$

$$\text{По формуле (1.7, а):} \quad \gamma = 1 + \frac{0,2}{K_1} = 1 + \frac{0,2}{1,4} = 1,14.$$

Среднее значение мощности потерь в транзисторе в соответствии с (1.6) при условии, что  $P_{\text{отс}} \approx 0$ , составляет величину

$$P_k = \frac{1}{2} I_{\text{кс}} U_{\text{кн}} + U_{\text{вх.макс}} I_{\text{кс}} \tau_{\beta} f \gamma = \frac{1}{2} 1,98 \cdot 0,5 + 17 \cdot 1,98 \cdot 32 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 \cdot 1,14 = 0,5 + 1,23 = 1,73 \text{ Вт}$$

По вычисленной рассеиваемой мощности с учетом заданных максимальной температуры окружающей среды и теплового сопротивления транзисторов рассчитывается необходимая поверхность теплоотводящего радиатора.

## **Задание № 1.4.2. Порядок расчета преобразователей напряжения с независимым возбуждением**

Когда есть необходимость преобразования энергии большой мощности при полном использовании полупроводниковых ключей, уменьшении влияния нагрузки на параметры ПН, снижении затрат энергии на стабилизацию или регулировку частоты, применяются ПН с независимым возбуждением (усилители мощности).

Схемы усилителей мощности, как правило, состоят из маломощного задающего генератора и мощного выходного каскада. Задающим генератором может служить одна из рассмотренных ранее схем ПН с самовозбуждением. Чаще всего при питании от источников с низким напряжением применяются схемы с выводом средней точки первичной обмотки трансформатора, а при повышенных напряжениях питания – мостовые преобразователи.

Базовые цепи транзисторов выходного каскада питаются от выходного трансформатора задающего генератора. При этом силовой трансформатор выходного каскада работает без захода в режим насыщения материала магнитопровода.

В мостовых и полумостовых выходных каскадах нагрузку можно включать непосредственно в диагональ моста без выходного трансформатора [1].

Ранее отмечалось, что включение параллельно выводам эмиттера и коллектора диодов в обратном направлении или стабилитронов в преобразователях с независимым возбуждением позволяет защитить транзисторы от перенапряжения.

В преобразователях с независимым возбуждением необходимо использовать специальную быстродействующую защиту для исключения возможности пробоя, транзисторов выходного каскада при перегрузках или коротких замыканиях в нагрузке. В преобразователях напряжения с самовозбуждением в аналогичных случаях происходит лишь срыв генерации, и после устранения перегрузки преобразователь напряжения остается работоспособным.

## ***Порядок расчета преобразователей напряжения с независимым возбуждением***

При проектировании преобразователей напряжения с независимым возбуждением задаются те же основные параметры преобразователя и условия его работы, как и в случае проектирования автогенераторов. Расчет начинают с выходного каскада, так как входные цепи такого устройства являются нагрузкой задающего генератора [4].

Рассмотрим порядок расчета преобразователя напряжения с независимым возбуждением на примере преобразователя, схема которого приведена на рис. 1.6, б.

*Исходные данные:*

а) Напряжение питания выходного каскада и задающего генератора одинаково и равно  $U_{\text{вх}}=27\pm 3$  В.

б) Ток вторичной обмотки трансформатора  $I_2=1$  А, нагрузка активная.

в) Напряжение вторичной обмотки  $U_2=200$  В.

г) Частота преобразования  $f=1200$  Гц. Требуется произвести электрический расчет преобразователя напряжения с независимым возбуждением.

*Порядок расчета*

Расчет начинается с определения режима работы и выбора транзисторов выходного каскада.

1. Ориентировочно определяем величину тока коллектора открытого транзистора в режиме насыщения, задавшись КПД выходного каскада  $\eta_n=0,9$ . Полагая в (1.26)  $U_{\text{кн}}=0$ , при  $U_{\text{вх мин}}=24$  В получим

$$I_{\text{кс}} = \frac{P_{\text{вых}}}{\eta_n \cdot U_{\text{вх мин}}} = \frac{200 \cdot 1}{0,9 \cdot 24} = 9,2 \text{ А.}$$

2. Находим амплитуду напряжения между эмиттером и коллектором транзистора (1.56):

$$U_{\text{эк}} = 1,2U_{\text{вх макс}} = 1,2 \cdot 24 = 29 \text{ В.}$$

3. Полученным данным расчета наиболее соответствует транзистор типа КТ818.

4. Проверяем максимальную величину тока коллектора транзистора выходного каскада в момент переключения. Для транзисторов КТ818 при расчетном значении тока коллектора  $I_{\text{КС}}=9,2$  А падение напряжения в режиме насыщения примерно равно  $U_{\text{КН}}=1$  В. В соответствии с (1.26)

$$I_{\text{КС}} = \frac{U_2 I_2}{\eta_n \cdot (U_{\text{вх.мин}} - U_{\text{КН}})} = \frac{200 \cdot 1}{0,9 \cdot (24 - 2)} = 10,1 \text{ А.}$$

Полагая величину  $K_2=1,2$ , согласно выражению (1.4) находим максимальное значение тока коллектора транзистора:

$$I_{\text{К.макс}} = I_{\text{КС}} \cdot K_2 = 10,1 \cdot 1,2 = 12,1 \text{ А.}$$

Для выбранного типа транзисторов КТ818  $I_{\text{К доп}}=9$  А.

Поскольку оказалось, что максимальное значение тока коллектора превышает предельно допустимое, в преобразователе необходимо использовать параллельное включение двух транзисторов в каждом плече мостового усилителя мощности. При этом ток через каждый транзистор в режиме насыщения окажется равным

$$I_{\text{КС1}} = \frac{I_{\text{К.макс}}}{N} = \frac{10,1}{2} = 5,05 \text{ А,}$$

а максимальное значение тока в момент переключения транзисторов  $I_{\text{К макс1}}=5,05 \cdot 1,2=6,05$  А и не превышает значения предельно допустимого тока коллектора транзистора.

5. Определяем суммарный ток базы транзисторов, принимая для транзисторов КТ818  $B_{\text{ст мин}}=25$  и  $b_{\text{мин}}=2$ .

$$I_{\text{б}} = \frac{NI_{\text{КС1}}b_{\text{мин}}}{B_{\text{ст.мин}}} = \frac{2 \cdot 5,05 \cdot 2}{25} = 0,81 \text{ А.}$$

Ток базы каждого транзистора составляет

$$I_{\text{б}} = \frac{I_{\text{б}}}{N} = \frac{0,81}{2} = 0,405 \text{ А.}$$

6. Находим величину напряжения на выходных обмотках трансформатора задающего генератора. Как и в автогенераторах, в базовые

цепи транзисторов усилителя мощности включаются дополнительные сопротивления для уменьшения влияния разброса параметров входной цепи транзисторов на режим их работы. Величина этого сопротивления  $R_6$  должна выбираться большей, чем величина входного сопротивления транзистора  $R_6 = (2-3)R_{вх}$ . Для транзисторов КТ818  $U_{бн}$  составляет примерно 0,5 В, при этом входное сопротивление транзистора оказывается равным

$$R_{вх} \approx \frac{U_{бн}}{I_{б}} = \frac{0,5}{0,405} = 1,23 \text{ Ом.}$$

Выбираем  $R_6 = 3 \text{ Ом}$ , тогда напряжение на выходных обмотках трансформатора задающего генератора составит

$$U_{бв} = U_{бн} + I_{б}R_6 = 0,5 + 0,405 \cdot 3 \approx 1,8 \text{ В.}$$

7. Электрический расчет трансформатора выходного каскада преобразователя с независимым возбуждением проводится по тем же уравнениям, что и для преобразователя с самовозбуждением, с той разницей, что вместо индукции насыщения магнитного материала сердечника в соответствующие уравнения подставляется величина индукции (0,7–0,8)  $B_s$  при заданной частоте 1200 Гц.

8. Расчет усилителя мощности заканчивается проверкой теплового режима транзисторов и расчетом необходимой поверхности теплоотводящих радиаторов. Для этого, пользуясь выражениями (1.6, а), (1.6, в), (1.6, г) и кривыми на рис. 1.7, определяют потери мощности в транзисторах выходного каскада.

9. Последовательность расчета задающего генератора преобразователя напряжения остается такой же, как и для преобразователей напряжения с самовозбуждением. Выходная мощность этого каскада определяется по расчетным значениям тока базы транзисторов выходного каскада и напряжением на выходных обмотках его трансформатора:

$$P_{вых} = 2I_{б}U_{бв} = 2 \cdot 0,81 \cdot 1,8 = 2,94 \text{ ВВ}$$

## 1.5. Способы стабилизации частоты и выходного напряжения преобразователей

На практике в большинстве случаев требуются специальные меры для поддержания частоты и амплитуды выходного напряжения на заданном уровне. Это связано с изменением амплитуды и частоты выходного напряжения преобразователя в результате изменения напряжения питания и нагрузки. Поэтому в преобразователях используются различные способы стабилизации выходного напряжения и частоты (рис. 1.10).

В схемах (рис. 1.10, *а*, *б*) стабилизируется напряжение на входе преобразователя. Для поддержания выходного напряжения преобразователя с высокой точностью в стабилизаторе напряжения постоянного тока регулирующий элемент может работать в двух режимах: линейном или ключевом.

Линейный режим работы позволяет уменьшить уровень пульсаций на выходе ПН, но КПД стабилизатора низкий и находится в пределах 0,5–0,7. Ключевой режим дает возможность получить значительно более высокий КПД, но при этом необходимо дополнительное подключение сглаживающих фильтров на входе и выходе регулирующего элемента, что сказывается на увеличении массогабаритных показателей ПН.

Для улучшения массогабаритных показателей можно повышать частоту коммутаций регулирующего элемента стабилизатора.

В схемах (см. рис. 1.10, *а*, *б*) стабилизации напряжения напряжение на выходе ПН меньше напряжения питания, в схеме (см. рис. 1.10, *б*) выходное напряжение стабильно, но величина его может превышать максимальное значение напряжения питания (входное напряжение  $U_{вх}$ ).

Указанный эффект реализуется с помощью сравнительно небольшого регулируемого вольтодобавочного преобразователя постоянного напряжения, выходное напряжение которого суммируется с напряжением питания. Его часто реализуют по функциональной схе-

ме, показанной на рис. 1.10, а, включая на выходе выпрямитель со сглаживающим фильтром.

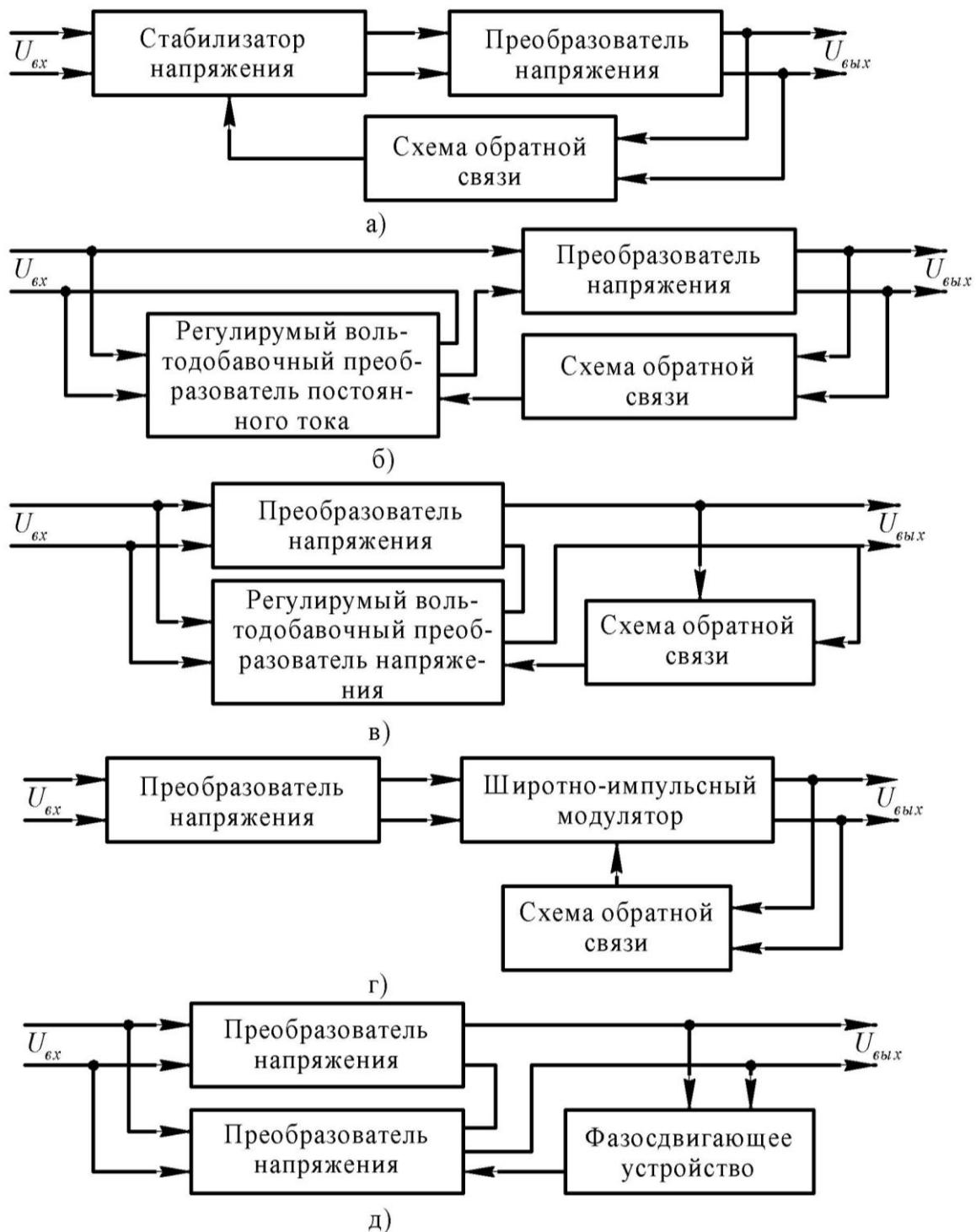


Рис. 1.10. Структурные схемы стабилизированных ПН

Преобразователи, выполненные по рассматриваемым схемам (см. рис. 1.10, а, б), имеют выходное напряжение в виде неискаженных импульсов прямоугольной формы, а значит, для получения несколь-

ких уровней стабилизированных напряжений с малым уровнем пульсаций их применяют для работы на выпрямитель. Как правило, такие преобразователи выполняют на мощности до 500 Вт.

В функциональной схеме (рис. 1.10, в) выход регулируемого вольтодобавочного ПН включен последовательно с выходом основного преобразователя; таким образом, они работают в фазе, а их выходные напряжения суммируются. В результате схема вольтодобавочного преобразователя упрощается по сравнению с рассмотренной схемой (см. рис. 1.10, б) из-за отсутствия необходимости в выпрямителе и сглаживающем фильтре на выходе. Поэтому вольтодобавочный преобразователь реализуется по схеме рис. 1.10, а.

Стабилизированные преобразователи на большие мощности и с высоким КПД порядка 0,7–0,8 могут выполняться по функциональной схеме (рис. 1.10, з) с включенным на выходе широтно-импульсным модулятором. Его функции могут выполнять магнитный усилитель или тиристорный регулятор, где стабилизированное выходное напряжение формируется путем изменения длительности прямоугольных двухполярных импульсов. По функциональной схеме (см. рис. 1.10, з) могут выполняться регулируемые вольтодобавочные преобразователи, используемые в схемах на рис. 1.10, б, в.

Возможно совмещение функций преобразования и стабилизации в одном стабилизированном ПН с широтно-импульсной стабилизацией выходного напряжения (рис. 1.10, д), который состоит из ведущего и ведомого преобразователей. Выходное напряжение стабилизируется путем изменения фазы выходного напряжения ведомого преобразователя относительно выходного напряжения ведущего. Форма выходного напряжения представлена на рис. 1.11. Если оба преобразователя выполнены идентичными, то форма выходного напряжения будет выглядеть так, как показано на рис. 1.11, а, если нет – то как на рис. 1.11, б.

На функциональной схеме (см. рис. 1.10, д) для стабилизации выходного напряжения по среднему или эффективному значению применено фазосдвигающее устройство.



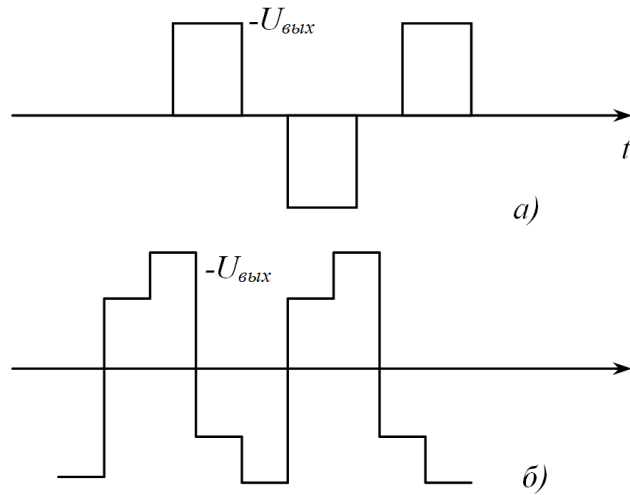


Рис. 1.11. Форма кривой напряжения на выходе стабилизированного преобразователя (см. рис. 1.10, д)

Для обеспечения стабилизации выходного напряжения и по среднему, и по эффективному значению необходимо выбирать коэффициенты трансформации выходных трансформаторов преобразователей из условия [1]

$$\frac{n_1}{n_2} = 1,1 \frac{U_{\text{вх.макс}} + U_{\text{вх.мин}}}{U_{\text{вх.макс}} - U_{\text{вх.мин}}}.$$

Преобразователи напряжения, выполненные по схеме на рис. 1.10, д, при изменении напряжения питания на +10 % имеют практическую стабильность эффективного значения выходного напряжения по отношению к среднему значению не хуже  $\pm 0,3$  %.

Нестабильность частоты преобразователя по схеме двухтактного ПН с насыщающимся трансформатором, у которого выходное напряжение прямо пропорционально величине напряжения питания, связано с различающимися параметрами трансформаторов и протекающими тепловыми процессами, в связи с чем диапазон изменения частоты в первом случае может составлять  $\pm 15$  % и, соответственно, по тепловым причинам – порядка  $\pm 2$  %.

Для устранения указанных причин и, как следствие, повышения точности и поддержания частоты выходного напряжения применяются либо стабилизация напряжения питания, либо включаемые в схему времязадающие  $LC$ - или  $RC$ -цепочки.

Для повышения точности стабилизации могут применяться задающие *LC*-генераторы или генераторы с кварцевой стабилизацией частоты.

*LC*-генератор [1] обеспечивает относительное изменение частоты в пределах

$$\frac{\Delta f_z}{f_z} = 5(10^{-5} + 10^{-4}) \frac{\Delta T}{^{\circ}C} + 1 \cdot 10^{-3},$$

где  $\Delta f$  – изменение частоты генератора.

Предел колебаний частоты *LC*-генератора ориентировочно составляет порядка 0,06–0,1 % при изменении температуры окружающей среды в пределах от -50 до +50 °С. Для контура применяются слюдяные конденсаторы с малым температурным коэффициентом емкости (ТКЕ) и емкостью в пределах 0,1–1,0 мкФ.

Для повышения добротности индуктивность контура рекомендуется выбирать на тороидальных магнитопроводах из магнитного материала с линейной характеристикой намагничивания.

Некоторые схемы *LC*-генераторов приведены на рис. 1.12, *а*, *б*. В указанных схемах выходное напряжение *LC*-генератора усиливается, преобразуется в прямоугольное и подается на вход ПН в виде сигнала синхронизации. Сигнал обеспечивает переключение транзисторов до момента насыщения материала магнитопровода.

Частота выходного напряжения *LC*-генератора выбираться больше, чем частота собственных колебаний ПН.

Часто применяемые схемы подачи сигнала синхронизации на ПН показаны на рис. 1.13. Кварцевые генераторы обеспечивают более высокую точность частоты:

$$\frac{\Delta f_{зк}}{f_{зк}} = 5(10^{-6} + 10^{-5}) \frac{\Delta T}{^{\circ}C} + 1 \cdot 10^{-4}.$$

Изменение температуры окружающей среды в пределах от -50 до +50 °С влияет на колебания частоты кварцевого генератора в пределах 0,001–0,01 %.

Основные схемы кварцевых генераторов приведены на рис. 1.12, в, г. Они обладают следующими недостатками:

1. Большая инерционность, т.е. колебания стабилизируются в течение 0,5–3,0 сек. после подачи напряжения питания. Повысить быстродействие ПН стабилизированного кварцевым генератором можно путем последовательного включения кварцевого и  $LC$ -генераторов.

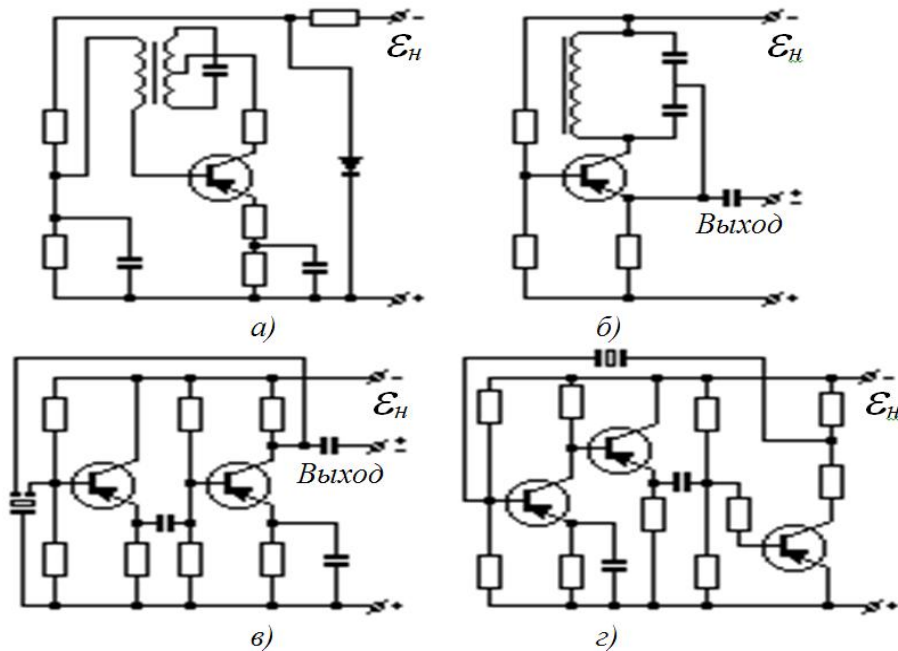


Рис. 1.12. Схемы кварцевых и  $LC$ -генераторов

2. Кварцевые генераторы маломощны, а форма выходного напряжения близка к синусоиде. Поэтому для управления ПН сигнал, снимаемый с выхода кварцевого генератора, необходимо усиливать и формировать в напряжение прямоугольной формы выходного трансформатора задающего генератора. Далее это напряжение может подаваться:

а) последовательно с напряжением положительной обратной связи в базы транзисторов ПН;

б) параллельно базовым выводам транзисторов (рис. 1.13, б);

в) на отдельную обмотку двухстержневого трансформатора ПН (рис. 1.13, в). В этом случае для стабилизации частоты преобразования необходима малая мощность задающего генератора, т.е. на выходные мощности от 100 до 1500 Вт необходима мощность сигнала синхронизации порядка 0,06–1,2 Вт.

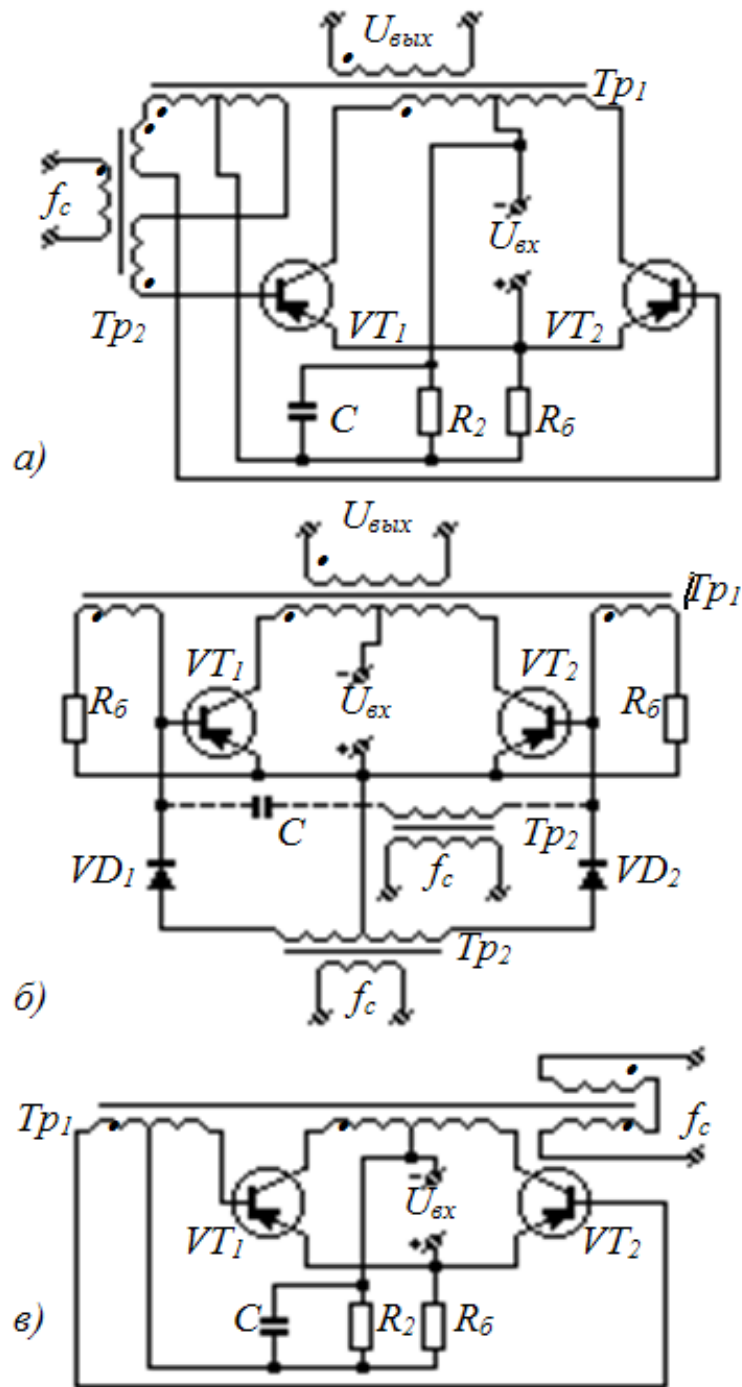


Рис. 1.13. Способы стабилизации частоты ПН

### Контрольные вопросы к первому разделу «Полупроводниковые преобразователи напряжения»

1. Разновидности и назначение преобразователей напряжения.
2. Принцип работы и область применения преобразователей с самовозбуждением (автогенераторы).
3. Принцип работы и область применения преобразователей в качестве усилителей мощности.

4. Каким образом работает силовой трансформатор и чем определяется частота переменного напряжения в преобразователях с времязадающей RC-цепью?
5. По каким причинам мостовые автогенераторы могут работать от источника питания с большим напряжением?
6. Недостатки мостовых автогенераторов по сравнению с другими схемами преобразователей.
7. Чем отличаются рассмотренные схемы усилителей мощности от схем автогенераторов?
8. Какие схемы нашли наибольшее применение в источниках питания?
9. В каком режиме должен работать выходной трансформатор усилителя мощности?
10. Что необходимо применять в усилителях мощности для устранения явления разности тепловых режимов работы в транзисторах смежных плеч?
11. По каким параметрам производится выбор транзисторов преобразователя напряжения?
12. От чего зависит ток коллектора открытого транзистора в преобразователе напряжения?
13. От чего зависит амплитуда тока коллектора в автогенераторах?
14. Какие транзисторы рекомендуется использовать для обеспечения одинаковых режимов работы в преобразователях напряжения с самовозбуждением?
15. Какие преобразователи используют для преобразования мощностей свыше 50–100 Вт?
16. Какое включение транзисторов применяют, когда амплитуда тока коллектора превышает предельно допустимое значение? Пояснить ответ.
17. Назначение уравнивающих сопротивлений и место их включения.
18. Для чего и в каких цепях преобразователя напряжения включаются быстродействующие предохранители?
19. От чего зависит амплитуда всплесков тока и напряжения и какие элементы включаются параллельно выводам коллектора и эмиттера транзистора для ее уменьшения? Пояснить ответ.
20. По какому параметру рассчитывается напряжение эмиттер – коллектор транзистора преобразователя?
21. Чем достигается равномерное распределение напряжения на запертых транзисторах? Пояснить ответ.
22. Что предпринимают для уменьшения веса и габаритных размеров преобразователей напряжения?

23. Почему в преобразователях напряжения повышенной частоты рекомендуется применять высокочастотные транзисторы с малым сопротивлением насыщения?

24. На какие характеристики преобразователя напряжения оказывает влияние трансформатор?

25. Для чего необходима сильная положительная обратная связь и чем она обеспечивается в автогенераторах с самовозбуждением?

26. В каких случаях применяются преобразователи напряжения с независимым возбуждением (усилители мощности)?

27. Недостатком преобразователей с независимым возбуждением.

28. Назначение вольтодобавочного преобразователя с включенным на выходе выпрямителем со сглаживающим фильтром.

29. Чем можно повысить точность частоты выходного напряжения преобразователя?

30. Для какой цели применяются в преобразователях напряжения задающие  $LC$ -генераторы или кварцевые генераторы?

## 2. СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

### 2.1. Назначение и принципы работы стабилизаторов напряжения

Стабилизаторы постоянного напряжения предназначены для стабилизации выходного напряжения на нагрузке при колебаниях сетевого напряжения и изменении силы тока нагрузки. Их подключают между выпрямителем с фильтром и нагрузкой (потребителем).

Стабилизаторы разделяют на параметрические и компенсационные.

Основой параметрических стабилизаторов является элемент с нелинейной характеристикой, например такой, как полупроводниковый стабилитрон, у которого напряжение на участке характеристики, относящемся к обратимому электрическому пробое, почти постоянно при сильном изменении обратного тока через элемент [2].

Схема параметрического стабилизатора приведена на рис. 2.1.

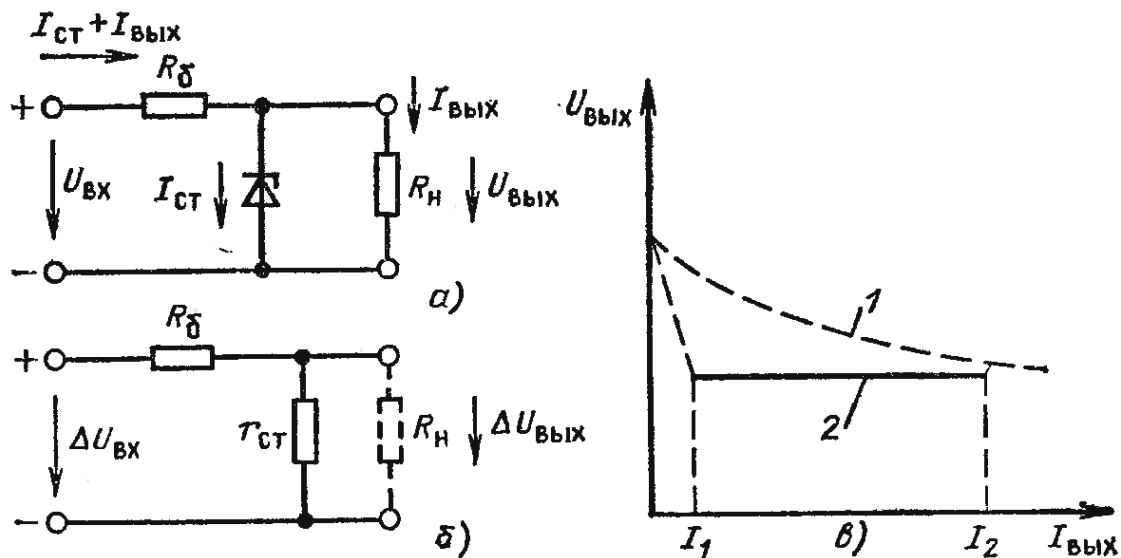


Рис. 2.1. Параметрический стабилизатор (а), его схема замещения для приращений (б) и внешняя характеристика выпрямителя со стабилизатором (кривая 2) и без стабилизатора (кривая 1) (в)

Как правило, коэффициент стабилизации  $K_{СТ}$  для параметрических стабилизаторов равен отношению приращений входного и выходного напряжений. Его значение не превышает 20–40, а величина  $R_{ВЫХ}$  лежит в пределах от нескольких ом до нескольких сот ом.

Если показатели качества параметрических стабилизаторов не удовлетворяют требованиям, то применяют компенсационные стабилизаторы. На рис. 2.2 приведена одна из простейших схем компенсационных стабилизаторов, в котором нагрузка подключена к источнику входного напряжения через регулирующий нелинейный элемент – транзистор  $V$ , на базу которого через операционный усилитель (ОУ) подается сигнал обратной связи (ОС). На вход ОУ поступают напряжения с высокоомного резистивного делителя  $U_{\text{вых}} R_2 / (R_1 + R_2) = U_{\text{вых}} \gamma$  и эталонное (опорное) напряжение  $U_0$  [2].

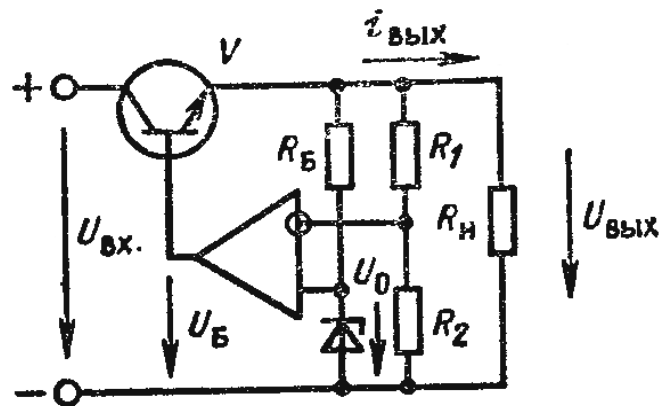


Рис. 2.2. Простейшая схема компенсационного стабилизатора с ОУ

Работает стабилизатор следующим образом. При увеличении напряжения на входе стабилизатора  $U_{\text{вх}}$  растет и выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ . При этом на инвертирующий вход ОУ подается положительное приращение напряжения  $\Delta U_{\text{вых}} \gamma$ , а на выходе ОУ возникает отрицательное приращение напряжения  $\Delta U_{\text{б}}$ . В свою очередь, к управляющему эмиттерному переходу транзистора  $V$  приложена разность базового и эмиттерного напряжений  $U_{\text{б}} - U_{\text{э}}$ . В результате возникает приращение напряжения базы – эмиттера  $\Delta U_{\text{бэ}} = \Delta U_{\text{б}} - \Delta U_{\text{вых}} < 0$  и, как следствие, ток транзистора  $V$  и напряжение  $U_{\text{вых}}$  снижаются почти до первоначального значения. Аналогичные процессы происходят при увеличении или уменьшении сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}}$ , т.е. для регулирования  $U_{\text{вых}}$  возникнет  $\Delta U_{\text{бэ}}$  соответствующего знака и изменится ток транзистора  $I_{\text{бэ}}$  [2].



В стабилизаторе работа контура ОС поддерживает равенство нулю разности  $U_0 - \gamma U_{\text{вых}}$ , поэтому  $U_{\text{вых}} = U_0 / \gamma$ . Коэффициент усиления ОУ влияет на повышение точности выполнения этого равенства, на увеличение коэффициента стабилизации  $K_{\text{ст}}$  (он может достигать  $10^3$  и выше) и на уменьшение  $R_{\text{вых}}$  стабилизатора ( $R_{\text{вых}} = 10^{-2} \div 10^{-3}$  Ом) [1,2].

Схема параметрического стабилизатора на полупроводниковом стабилитроне (см. рис. 2.2) используется для создания опорного напряжения в компенсационном стабилизаторе. Стабильность  $U_0$  очень высока, так как в процессе работы режим работы стабилитрона практически не изменяется и ток через него стабилен [1, 2].

На рис. 2.1, б показана внешняя характеристика источника питания со стабилизатором, ее рабочий участок ограничен значениями тока  $I_1 < I_{\text{вых}} < I_2$ .

### **Задание № 2.1.1. Расчет транзисторного стабилизатора напряжения**

В результате расчета необходимо определить типы транзисторов и стабилитрона, величины параметров всех деталей, входящих в схему стабилизатора и обеспечивающих заданный режим его работы, необходимую величину входного напряжения, коэффициент стабилизации схемы по напряжению и КПД стабилизатора.

Исходные данные для расчета стабилизатора приведены в табл. 2.1:

- номинальное выходное напряжение стабилизатора  $U_{\text{вых}}$  с плавной регулировкой в пределах  $U_{\text{вых}}$ ;
- номинальный ток нагрузки  $I_{\text{вых}}$ ;
- допустимое отклонение напряжение на входе стабилизатора от номинального значения в сторону увеличения ( $\Delta U_{\text{вх}}^+$ ) и в сторону уменьшения ( $\Delta U_{\text{вх}}^-$ ):  $\Delta U_{\text{вх}}^+ = \Delta U_{\text{вх}}^-$ ,
- допустимое отклонение выходного напряжения от номинального:  $\Delta U_{\text{вых}}^+ = \Delta U_{\text{вых}}^-$ .

## Исходные данные для расчета стабилизатора

№ варианта	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$I_{\text{вых}}, \text{А}$	$\Delta U_{\text{ex}}^+, \%$	$\Delta U_{\text{ex}}^-, \%$
1	4±0,8	0,1	20	0,4
2	6±1	0,1	18	0,3
3	8±1,6	0,2	16	0,4
4	10±0,8	0,3	14	0,3
5	12±2	0,4	12	0,2
6	14±2,4	0,6	10	0,2
7	16±2,6	0,8	8	0,1
8	18±2,8	1,0	6	0,1
9	20±3,2	1,2	4	0,1
10	18±2,8	0,7	10	0,3
11	16±2,7	1,6	20	0,3
12	14±2,2	0,4	18	0,3
13	12±2,2	1	16	0,2
14	10±1,8	0,8	12	0,1
15	8±1,6	0,5	10	0,3
16	6±1,2	0,2	8	0,2
17	4±1	0,2	6	0,1
18	20±3,4	1,6	20	0,4
19	18±2,8	1,4	18	0,4
20	16±2,5	1,2	16	0,3

## Пример расчета транзисторного стабилизатора напряжения

Схема транзисторного стабилизатора напряжения изображена на рис. 2.3 [3].

Исходные данные для расчета стабилизатора:

– номинальное выходное напряжение стабилизатора  $U_{\text{вых}} = 12 \text{ В}$  с плавной регулировкой в пределах  $\pm 2 \text{ В}$ ;

– номинальный ток нагрузки  $I_{\text{вых}} = 0.2 \text{ А}$ ;

– допустимое отклонение напряжения на входе стабилизатора от номинального значения в сторону увеличения ( $\Delta U_{\text{ex}}^+$ ) и в сторону уменьшения ( $\Delta U_{\text{ex}}^-$ ):  $\Delta U_{\text{ex}}^+ = \Delta U_{\text{ex}}^- = 10 \%$ ;

- допустимое отклонение выходного напряжения от номинального:  $\Delta U_{\text{вых}}^+ = \Delta U_{\text{вых}}^- = 0,2 \%$ .

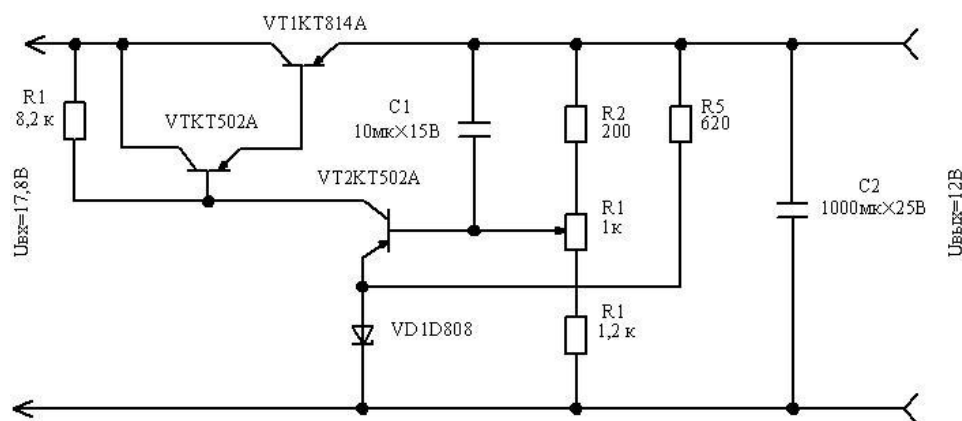


Рис. 2.3. Схема транзисторного стабилизатора напряжения

Порядок расчета.

1. Определим требуемое значение коэффициента стабилизации:

$$K_{\text{ст}(u)\text{треб}} = (\Delta U_{\text{вх}}^+ + \Delta U_{\text{вх}}^-) / (\Delta U_{\text{вых}}^+ + \Delta U_{\text{вых}}^-) = (10 + 10) / (0,2 + 0,2) = 50 .$$

2. Находим величину минимального напряжения на входе стабилизатора:

$$U_{\text{вх.мин}} = U_{\text{вых}} + U_{\text{к.э1.мин}} + \Delta U_{\text{вых}} , \quad (2.1)$$

где  $U_{\text{к.э1.мин}}$  – минимально допустимое напряжение между эмиттером и коллектором регулирующего транзистора, при котором работа еще происходит на линейном участке выходной характеристики  $I_{\text{к}} = f(U_{\text{к.э}})$  при  $I_{\text{с}} = \text{const}$  ;

$\Delta U_{\text{вых}}$  – отклонение напряжения на выходе стабилизатора от номинального.

Напряжение  $U_{\text{к.э1.мин}}$  для большинства транзисторов не превышает 1–3 В. При расчете  $U_{\text{к.э1.мин}}$  можно принять равным 2 В.

Величина напряжения  $\Delta U_{\text{вых}}$  для нашего примера определяется верхним пределом регулировки выходного напряжения, т.е. равна 2 В. Таким образом,

$$\Delta U_{\text{вых}} = 12 + 2 + 2 = 16 \text{ В} .$$

Номинальное и максимальное напряжения на входе стабилизатора с учетом допустимых отклонений входного напряжения  $\Delta U_{\text{вх}}^+ = \Delta U_{\text{вх}}^- = 10\%$ , соответственно равны

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вх.мин}} / (1 - (\Delta U_{\text{вх}}^- / 100)) = 16 / (1 - (10/100)) \approx 17,8 \text{ В}; \quad (2.2)$$

$$U_{\text{вх.макс}} = U_{\text{вх}} \cdot (1 + (\Delta U_{\text{вх}}^+ / 100)) = 17,8 \cdot (1 + (10/100)) \approx 19,6 \text{ В}. \quad (2.3)$$

3. Определим максимальное падение напряжения на участке эмиттер – коллектор регулирующего транзистора:

$$U_{\text{к.эл.макс}} = U_{\text{вх.макс}} + U_{\text{вых.мин}} = 19,6 - 10 = 9,6 \text{ В}. \quad (2.4)$$

4. Находим максимальную мощность, рассеиваемую на коллекторе регулирующего транзистора:

$$P_{\text{кл.макс}} = U_{\text{к.эл.макс}} \cdot I_{\text{вых.макс}}, \quad (2.5)$$

где  $I_{\text{вых.макс}}$  – максимальное значение тока нагрузки. Для нашего примера (при неизменном токе нагрузки)  $I_{\text{вых.макс}} = 0,2 \text{ А}$ .

Поэтому  $P_{\text{кл.макс}} = 9,6 \cdot 0,2 = 1,92 \text{ Вт}$ .

5. Выбираем тип регулирующего транзистора. При выборе необходимо выполнить условия:

$$I_{\text{к.эл.макс}} \approx I_{\text{вых}} \leq I_{\text{к.эл.макс.доп}}; \quad (2.6)$$

$$U_{\text{к.эл.макс}} \leq U_{\text{к.эл.макс.доп}}; \quad (2.7)$$

$$P_{\text{кл.макс}} \leq P_{\text{кл.макс.доп}}. \quad (2.8)$$

По справочнику [3, 5] выбираем транзистор  $T_1$  типа КТ814А с такими параметрами: статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером  $h_{2,1\text{э.мин}} = 40$ , максимально допустимое постоянное напряжение коллектор – эмиттер ( $I_{\text{б}} = 0$ )  $U_{\text{к.э.макс}} = 25 \text{ В}$ ; максимально допустимый постоянный ток коллектора  $I_{\text{к.макс}} = 1,5 \text{ А}$ ; максимально допустимая рассеиваемая постоянная мощность (с теплоотводом)  $P_{\text{к.макс}} = 10 \text{ Вт}$ .

Таким образом, для выбранного транзистора КТ814А условия (2.6)–(2.8) выполняются.

6. Выбираем тип согласующего транзистора  $T_2$ . Транзистор  $T_2$  предназначен для согласования большого выходного сопротивления

(порядка 10 кОм) усилителя постоянного тока, собранного на транзисторе  $T_3$ , с малым входным сопротивлением (порядка 10 Ом) регулирующего транзистора  $T_1$ . Кроме того, транзисторы  $T_1$  и  $T_2$ , образуя составной транзистор, имеют общий коэффициент усиления по току:

$$h_{2.1э.общ} = h_{2.1э1}(T_1) \cdot h_{2.1э1}(T_2), \quad (2.9)$$

где  $h_{2.1э1}(T_1)$  и  $h_{2.1э1}(T_2)$  – коэффициенты передачи тока транзисторов  $T_1$  и  $T_2$ .

Большой статический коэффициент передачи тока  $h_{2.1э.общ}$  позволяет значительно повысить коэффициент стабилизации схемы по напряжению.

$$I_{к2} \approx I_{э2} = I_{б1},$$

где  $I_{к2}$  и  $I_{э2}$  – токи коллектора и эмиттера транзистора  $T_2$ ;

$I_{б1}$  – ток базы транзистора  $T_1$ .

Учитывая, что

$$I_{б1} = I_{к1} / h_{2.1э}(T_1) \approx I_{вых} / h_{2.1э}(T_1) = 200 / 40 = 5 \text{ мА}, \quad (2.10)$$

получим  $I_{к2} \approx 5 \text{ мА}$ .

Кроме того,

$$U_{к.э2.макс} \approx U_{к.э1.макс} = 9,6 \text{ В}. \quad (2.11)$$

Таким образом, мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора  $T_2$ , составляет

$$P_{к2.макс} \approx U_{к.э2.макс} \cdot I_{к2} = 9,6 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 48 \text{ мВт}. \quad (2.12)$$

7. Выбираем транзистор  $T_2$  типа КТ502А с параметрами: статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером  $h_{2.1э.мин} = 40$ ; максимально допустимое постоянное напряжение коллектор – эмиттер  $U_{к.э2.максдоп} = 25 \text{ В}$ ; максимально допустимый ток коллектора  $I_{к.макс.доп} = 300 \text{ мА}$ , максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность коллектора  $P_{к2.макс.доп} = 500 \text{ мВт}$ .

Поскольку  $P_{к2.макс} = 48 \text{ мВт} \leq P_{к2.макс.доп} = 500 \text{ мВт}$ , транзистор  $T_2$  выбран правильно.

Выбираем тип кремниевого стабилитрона. В качестве источника опорного напряжения обычно используют стабилитрон, который должен иметь номинальное напряжение стабилизации

$$U_{\text{ст.ном}} \approx (0,6 - 0,7) \cdot U_{\text{вых}} = (0,6 - 0,7) \cdot 12 = (7,2 - 8,4) \text{ В.} \quad (2.13)$$

По справочнику [3, 5] выбираем стабилитрон типа Д808, у которого

$$U_{\text{ст.ном}} = 7,75 \text{ В}, \Delta U_{\text{ст}} = \pm 0,75 \text{ В.}$$

8. Находим коэффициент деления напряжения делителем  $R_2, R_3, R_4$ :

$$\alpha \approx U_{2\text{вых}} / U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}} / U_{\text{вых}} \approx 0,65 \text{ В.} \quad (2.14)$$

9. Выбираем тип управляющего (усилительного) транзистора  $T_3$ .

На транзисторе  $T_3$  собран усилитель, который должен реагировать на самые незначительные колебания выходного напряжения и усиливать их до величины, достаточной для управления регулирующим транзистором. Поэтому управляющий транзистор должен обеспечить достаточное усиление сигнала по напряжению. При выборе транзистора необходимо обратить внимание на величину коллекторного тока  $I_{\text{кз}}$ . Этот ток должен быть по возможности небольшим, но всегда превышать ток базы согласующего транзистора  $T_2$ . Обычно величина тока  $I_{\text{кз}}$  выбирается в пределах 0,5–2 мА. Требуемое значение коэффициента усиления по напряжению для управляющего транзистора можно найти по формуле [3]

$$K_{3(u)\text{трб}} = \Delta U_{\text{вх}} \cdot 100 / U_{\text{вых}} \cdot (\Delta U_{\text{вблх}}^+ + \Delta U_{\text{вблх}}^-) \cdot \alpha, \quad (2.15)$$

где  $\Delta U_{\text{вх}} = U_{\text{вх.макс}} - U_{\text{вх.мин}} = 19,6 - 16 = 3,6 \text{ В.}$

Подставляя в формулу (2.15) численные значения, получим:

$$K_{3(u)\text{трб}} = 3,6 \cdot 100 / 12 \cdot (0,2 + 0,2) \cdot 0,65 = 115.$$

Наиболее часто в качестве управляющих используются мало-мощные и средней мощности низкочастотные и среднечастотные транзисторы. Выбираем опять транзистор КТ502А. Определяем фактический коэффициент усиления каскада на этом транзисторе. Для этого можно воспользоваться формулой

$$K_{3(u)\text{расч}} = \Delta I_{\text{кз}} \cdot R_1 / \Delta U_{\text{б.эз}}, \quad (2.16)$$

где  $\Delta I_{к3} / \Delta U_{б.э3} = S_3$  – крутизна характеристики транзистора  $T_3$  (число, показывающее, на сколько миллиампер изменяется коллекторный ток при изменении напряжения между базой и эмиттером транзистора на один вольт);  $R_1$  – сопротивление нагрузки в цепи коллектора транзистора  $T_3$ .

Для транзисторов средней мощности диапазона средних частот, используемых в схемах стабилизаторов напряжения, значение крутизны лежит в пределах  $S_3 = (20 \div 40) \text{ мА/В}$ .

Принимаем

$$S_3 = 30 \text{ мА/В}.$$

Сопротивление  $R_1$  может быть найдено по формуле

$$R_1 = 0,5 \cdot U_{к.э1, \text{ мин}} \cdot h_{21э}(T_1) \cdot h_{21э}(T_2) / I_{\text{вых}} = 0,5 \cdot 2 \cdot 40 \cdot 40 / 0,2 = 8 \text{ кОм}$$

Принимаем  $R_1 = 8,2 \text{ кОм}$ .

Мощность, рассеиваемая на резисторе  $R_1$ , составляет

$$P_{R1} \approx (I_{к3})^2 R_1 = (2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 8,2 \cdot 10^3 \approx 33 \text{ мВт}. \quad (2.17)$$

В качестве резистора  $R_1$  можно использовать резистор типа МЛТ – 0,125. Таким образом,

$$K_{3(u) \text{ расч}} = 30 \cdot 10^{-3} \cdot 8,2 \cdot 10^3 = 246 > K_{3(u) \text{ трсб}} = 115.$$

Определим величину мощности, рассеиваемой на коллекторе транзистора  $T_3$ :

$$P_{к3, \text{ макс}} = U_{к3, \text{ макс}} I_{к3}. \quad (2.18)$$

Принимая

$$U_{к3, \text{ макс}} = U_{\text{вых}} + \Delta U_{\text{вых}} - U_{\text{оп}} = 12 + 2 - 7,5 = 6,25 \text{ В} \quad (2.19)$$

и  $I_{к3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ ,

получим

$$P_{к3, \text{ макс}} = 6,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,0125 \text{ ВВ} < P_{к3, \text{ макс, доп}} = 0,5 \text{ ВВ}.$$

Следовательно, транзистор выбран правильно.

10. Определим величины сопротивлений резисторов и емкости конденсаторов схемы. Сопротивление нагрузки в цепи коллектора транзистора  $T_3 = 8,2 \text{ кОм}$ . Найдем сопротивление выходного делите-

ля. Ток делителя  $I_d$  обычно выбирают на один-два порядка выше тока базы управляющего транзистора  $T_3$ . Ток базы транзистора  $T_3$  можно найти по формуле

$$I_{62} = I_{k3} / h_{2.13}(T_3) = 2 \cdot 10^{-3} / 40 = 0,05 \text{ мА}. \quad (2.20)$$

Выбирая ток делителя  $I_d = 5 \text{ мА}$ , найдем общее сопротивление делителя:

$$R_d = R_2 + R_3 + R_4 = U_{\text{вых}} / I_d = 2,4 \text{ кОм}. \quad (2.21)$$

В соответствии с заданием выходное напряжение стабилизатора должно регулироваться в пределах  $\pm 2 \text{ В}$ . Учитывая также, что напряжение стабилизации стабилитрона Д808 может меняться в пределах 7–8,5 В, определим сопротивление нижнего плеча делителя для критических значений  $U_{\text{оп}}$  и  $U_{\text{вых}}$ :

$$(R_{d.n})_{\text{мин}} = R_d \cdot U_{\text{оп.мин}} / U_{\text{вых}} + \Delta U_{\text{вых}} = R_4 = 2,4 \cdot 10^3 \cdot 7 / 12 + 2 = 1,2 \text{ кОм}; \quad (2.22)$$

$$(R_{d.n})_{\text{макс}} = R_d \cdot U_{\text{оп.макс}} / U_{\text{вых}} - \Delta U_{\text{вых}} = R_4 = 2,4 \cdot 10^3 \cdot 8,5 / 12 - 2 = 2 \text{ кОм}. \quad (2.23)$$

Величины сопротивлений  $R_2$  и  $R_3$  составляют:

$$\begin{aligned} R_3 &= (R_{d.n})_{\text{макс}} - (R_{d.n})_{\text{мин}} = 2 - 1,2 = 0,8 \text{ кОм}; \\ R_2 &= R_d - (R_{d.n})_{\text{макс}} = 2,4 - 2 = 0,4 \text{ кОм} = 400 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Полученные значения сопротивлений делителя соответствуют стандартным величинам, поэтому окончательно принимаем:  $R_2 = 390 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 820 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 1,2 \text{ кОм}$  (тип резисторов  $R_3$  и  $R_4$  – МЛТ–0,125, а  $R_2$  – СПЗ–4аМ).

Сопротивление  $R_5$  выбирается следующим образом. Поскольку

$$I_{62(T_3)} = I_{k(T_3)} / h_{2.13}(T_3) = 2 \cdot 10^{-3} / 40 = 0,05 \text{ мА},$$

воспользуемся расчетными данными [7]. Очевидно, что следует выбрать резистор с сопротивлением  $R_5 = 620 \text{ Ом}$ , тип резистора МЛТ–0,25.

Для увеличения быстродействия стабилизатора используется емкостная связь между выходом стабилизатора и входом усилителя, собранного на транзисторе  $T_3$ . С этой целью в схему стабилизатора включают конденсатор  $C_1$ . Величина емкости этого конденсатора выбирается порядка единиц – десятков микрофарад. Например, для рас-



считываемой схемы можно использовать электролитический конденсатор К50-6 емкостью 10 мкФ с рабочим напряжением 16 В.

Конденсатор  $C_2$  служит для повышения устойчивости стабилизатора и одновременно позволяет уменьшить выходное сопротивление схемы. Емкость конденсатора  $C_2$  выбирается порядка 1000–2000 мкФ. Для этого можно, например, использовать электролитический конденсатор К50-6 емкостью 1000 В с рабочим напряжением 25 В.

11. Находим коэффициент стабилизации стабилизатора по формуле

$$K_{ст(u)расч} = \alpha \cdot K_{з(u)расч} \cdot U_{вых} / U_{вх} = 0,65 \cdot 115 \cdot 12 / 17,8 \approx 50,3.$$

Таким образом, коэффициент стабилизации рассчитываемого стабилизатора больше требуемого, так как

$$K_{ст(u)расч} = 50,3 > K_{ст(u)треб} = 50.$$

12. КПД стабилизатора в номинальном режиме находится по формуле

$$\eta = U_{вых} \cdot I_{вых} / U_{вх} \cdot I_{вх}, \quad (2.25)$$

где  $I_{вх} = I_{вых} + I_{ст.макс} + I_{д} = 200 + 33 + 5 = 238 \text{ мА}$ .

Таким образом,

$$\eta = 12 \cdot 200 \cdot 10^{-3} / 17,8 \cdot 238 \cdot 10^{-3} \approx 0,567 (56,7\%).$$

Для нормального теплоотвода от транзистора  $T_1$  необходимо рассчитать ребристый радиатор. Пользуясь уже упоминавшейся формулой и зная, что коллектор транзистора  $T_1$  рассеивает мощность  $P_{кл} = 2 \text{ Вт}$ , определим суммарную площадь одних сторон всех пластин:

$$S = 40P = 40 \cdot 2 = 80 = 5 \cdot 4 \cdot 4 \text{ см}^2.$$

Таким образом, необходим радиатор с пятью ребрами и площадью одной стороны каждого ребра  $4 \cdot 4 = 16 \text{ см}^2$ .

### **Контрольные вопросы к второму разделу «Стабилизаторы напряжения»**

1. Назначение стабилизаторов постоянного напряжения и область применения.
2. Назначение и принцип работы параметрического стабилизатора напряжения.

3. Назначение и принцип работы компенсационного стабилизатора напряжения.
4. Назначение контура ОС в стабилизаторе напряжения.
5. Чем определяется коэффициент стабилизации схемы по напряжению?
6. Каким образом влияет коэффициент усиления ОУ на коэффициент стабилизации  $K_{ст}$ ?
7. Что используется в качестве источника опорного напряжения в компенсационном стабилизаторе и по каким причинам?
8. Почему стабильность  $U_0$  очень высока?
9. Каким должен быть ток  $I_{кз}$  относительно тока базы согласующего транзистора  $T_2$ ?
10. С какими характеристиками (по мощности и частоте) выбираются транзисторы для целей управления?
11. Что используется и подключается в схему стабилизатора для увеличения его быстродействия?

### 3. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ (ПЛК)

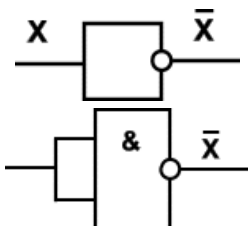
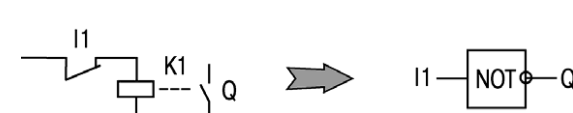
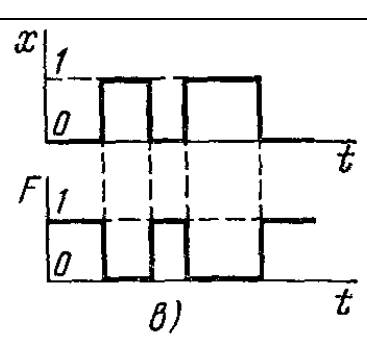
#### 3.1. Математические основы логической алгебры и программирования

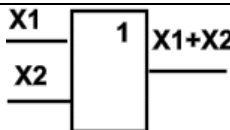
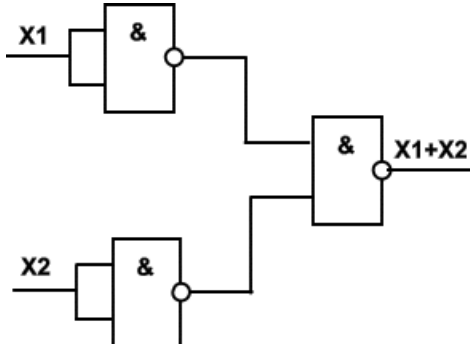
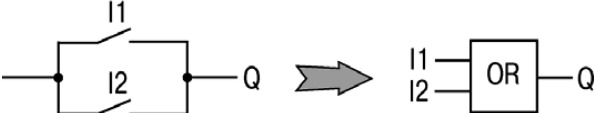
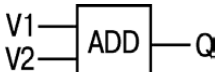
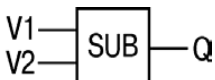
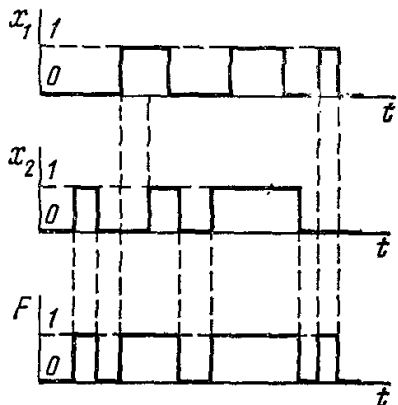
Математической основой цифровой электроники и программирования на ПЛК (программируемые логические контроллеры) или ПР (программируемое реле) является логическая алгебра Буля.

Логическая переменная может обозначать любую физическую величину. В алгебре Буля определены следующие логические операции (элементы) (табл. 3.1):

Таблица 3.1

Логические элементы

№ п/п	Выражение логическое	Таблица истинности	Условное графическое обозначение элемента						
1.	Элемент «НЕ»: Инверсия: $Y = \bar{X}$	<table><tr><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	X	Y	0	1	1	0	
	X	Y							
0	1								
1	0								
Схема контактного эквивалента элемента	Временная диаграмма								
									

2	<div>Выражение логическое</div> <div>Элемент «ИЛИ» Логическое сложение</div>	<div>Таблица истинности</div> <table><tr><td>X</td><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	X	X	Y	1	2		0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	<div>Условное графическое обозначение элемента</div> <div></div> <div>на основе правила Шеннона де Моргана</div> <div></div> <div></div> <div><math>V1 + V2 = Q \Rightarrow</math> </div> <div><math>V1 - V2 = Q \Rightarrow</math> </div>
	X	X	Y																		
	1	2																			
0	0	0																			
0	1	1																			
1	0	1																			
1	1	1																			
<div>Схема контактного эквивалента элемента</div>	<div>Временная диаграмма</div> <div></div>																				

3.	<b>Выражение логическое</b>	<b>Таблица истинности</b>	<b>Условное графическое обозначение элемента</b>															
	Элемент «И» логическое умножение или конъюнкция: $Y = X1 \cdot X2 = X1 \& X2$	<table><tr><td>X</td><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	X	X	Y	1	2		0	0	0	0	1	0	1	1	1	
	X	X	Y															
1	2																	
0	0	0																
0	1	0																
1	1	1																
<b>Схема контактного эквивалента элемента</b>	<b>Временная диаграмма</b>																	
4.	<b>Выражение логическое</b>	<b>Таблица истинности</b>	<b>Условное графическое обозначение элемента</b>															
	Элемент «И-НЕ»	<table><tr><td>X</td><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	X	X	Y	1	2		0	0	1	0	1	1	1	1	0	
X	X	Y																
1	2																	
0	0	1																
0	1	1																
1	1	0																

5.	Выражение логическое	Таблица истинности	Условное графическое обозначение элемента																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Элемент «ИЛИ-НЕ»	<table><tr><td>X</td><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td></td></tr></table>	X	X	Y	1	2		0	0	1	0	1	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
X	X	Y																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
0	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		<table><tr><td>x1</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td></tr><tr><td></td></tr></table>	x1	1	0		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		1		0		
x1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					

	<b>Выражение логическое</b>	<b>Таблица истинности</b>	<b>Условное графическое обозначение элемента</b>																																				
7.	<b>«исключающее ИЛИ-НЕ»</b> $Y = \overline{X1 + X2} = \overline{X1} * \overline{X2} + X1 * X2$ элемент равнозначности	<table><tr><td>X</td><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	X	X	Y	1	2		0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1																			
X	X	Y																																					
1	2																																						
0	0	1																																					
0	1	0																																					
1	0	0																																					
1	1	1																																					
8.	<b>Мажоритарный логический элемент или схема голосования.</b> $Y = 1$ – когда на входе единиц больше, чем нулей	<table><tr><td>X</td><td>X</td><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	X	X	X	Y	1	2	3		0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	
X	X	X	Y																																				
1	2	3																																					
0	0	0	0																																				
0	0	1	0																																				
0	1	0	0																																				
1	0	0	0																																				
1	0	1	1																																				
1	1	0	1																																				
1	1	1	1																																				
	Основные тождества алгебры Буля																																						
9.	<b>Выражение логическое</b> Разомкнутый контакт эквивалентен логическому 0, замкнутый – 1 $X * 0 = 0$	<b>Условное графическое обозначение элемента</b> 																																					
10.	<b>Выражение логическое</b> $X * 1 = X$	<b>Условное графическое обозначение элемента</b> 																																					

	Выражение логическое	Условное графическое обозначение элемента
11.	$X + 0 = X$	

Таблица истинности ставит в соответствие определенной комбинации входных переменных заданное значение логической функции.

Логические элементы «И-НЕ» и «ИЛИ-НЕ» являются универсальными, или базовыми элементами. С их помощью можно реализовать любой другой более сложный логический элемент или устройство (в том числе триггеры, счетчики, дешифраторы и др.) (рис. 3.1) [1].

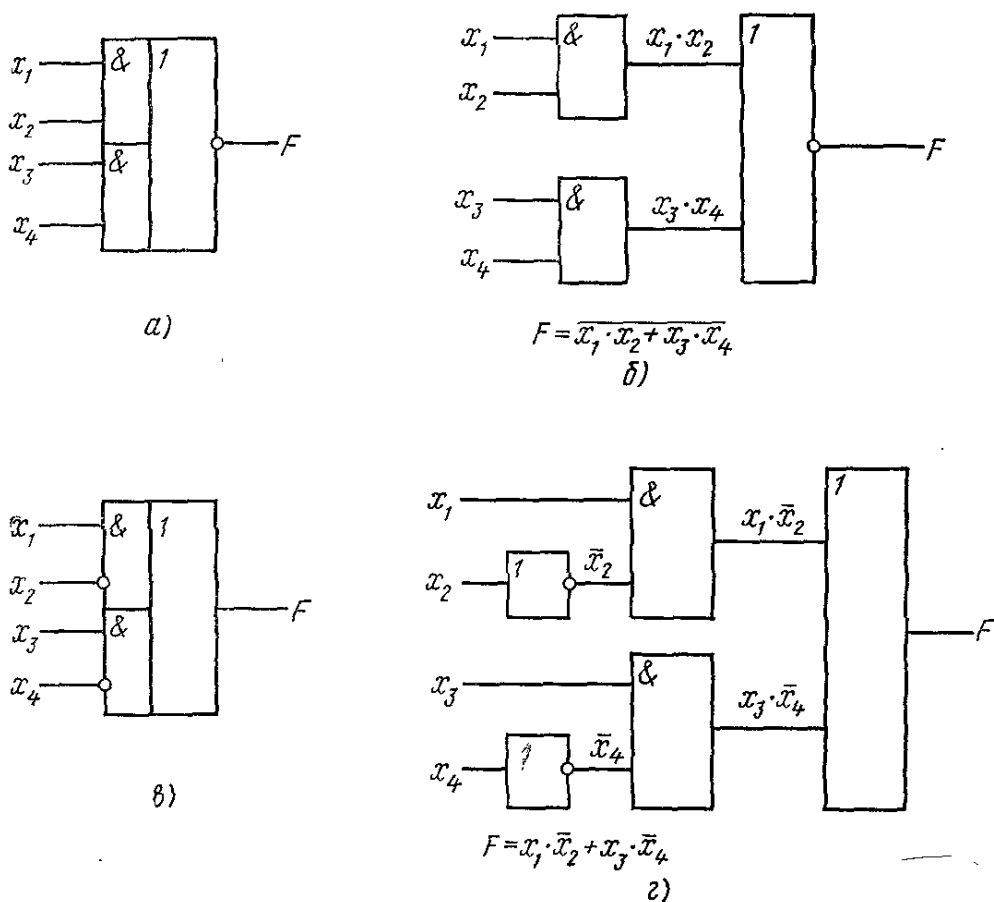


Рис. 3.1. Схемы логического элемента 2И-ИЛИ-НЕ (а) и его функциональный элемент (б), схема логического элемента 2И-ИЛИ (в) и его функциональный элемент (г)



### Законы, аксиомы, тождества и теоремы алгебры логики

В алгебре логики любая переменная может иметь состояние логического «0» или логической «1». В алгебре логики в случае одной переменной  $x$  действуют следующие правила (аксиомы):

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| 1) $X + 0 = X$ ,                                       | 6) $X \cdot 0 = 0$ ,             |
| 2) $X + 1 = 1$ ,                                       | 7) $X \cdot 1 = X$ ,             |
| 3) $X + X = X$ ,                                       | 8) $X \cdot X = X$ ,             |
| 4) $X + \bar{X} = 1$ ,                                 | 9) $X \cdot \bar{X} = 0$ ,       |
| 5) $(\bar{X}) = \bar{X}$ ,                             | 10) $(\overline{\bar{X}}) = X$ , |
| 11) $X1 \cdot (X2 + X3) = X1 \cdot X2 + X1 \cdot X3$ , |                                  |
| 12) $X1 + X1 \cdot X2 = X1$ ,                          |                                  |
| 13) $X1 + \bar{X1} \cdot X2 = X1 + X2$ ,               |                                  |
| 14) $\overline{X1 + X2} = \bar{X1} \cdot \bar{X2}$     |                                  |

Переместительный закон (закон коммутативности):

- 1)  $x + y = y + x$ ,
- 2)  $x \cdot y = y \cdot x$ .

Сочетательный закон (закон ассоциативности):

- 1)  $x + y + z = (x + y) + z = x + (y + z)$ ,
- 2)  $x \cdot y \cdot z = (x \cdot y) \cdot z = x \cdot (y \cdot z)$ .

Распределительный закон (закон дистрибутивности):

$$x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z.$$

Для преобразований полезными являются тождества:

- 1)  $x\bar{y} + x\bar{y} = x$ , 1)  $x(\bar{x} + y) = xy$ ,
- 2)  $x + xy = x$ , 2)  $(x + y)(x + z) = x + yz$ ,
- 3)  $x(x + y) = x$ , 3)  $x\bar{y} + y = x + y$ .

Теоремы де Моргана:

$$\overline{x + y + z} = \bar{x} \cdot \bar{y} \cdot \bar{z},$$

т.е. инверсия суммы переменных есть произведение их инверсий

$$\overline{x \cdot y \cdot z} = \bar{x} + \bar{y} + \bar{z},$$

т.е. инверсия произведения переменных есть сумма их инверсий.

Запись логической функции в виде суммы произведений переменных называют дизъюнктивной нормальной формой (ДНФ):

$$x + \bar{y}z + x\bar{y}z + \bar{x}yz,$$

а запись функции в виде произведения сумм – конъюнктивной нормальной формой (КНФ):

$$x(x + y)(y + z)(\bar{x} + y + z).$$

Инверсия любой функции, записанной в дизъюнктивной (конъюнктивной) нормальной форме, дает замену записи на конъюнктивную (дизъюнктивную) нормальную форму. Например инверсия функции

$$F = x + \bar{y}z + x\bar{y}z$$

имеет вид

$$\bar{F} = \bar{x}(y + \bar{z})(\bar{x} + y + \bar{z}).$$

Логическую функцию, заданную любым аналитическим выражением, можно преобразовать к ДНФ или КНФ, пользуясь правилами алгебры логики.

### Способы расчета логических схем

1. **Первый способ:** с помощью таблицы истинности.

Например, табл. 3.2 «Таблица истинности» следующего вида:

Таблица 3.2

Таблица истинности

X1	X2	X3	Y
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

## 2. Второй способ: временные диаграммы.

Например, временная диаграмма, характеризующая алгоритмы работы элементов логической схемы, показана на рис. 3.2:

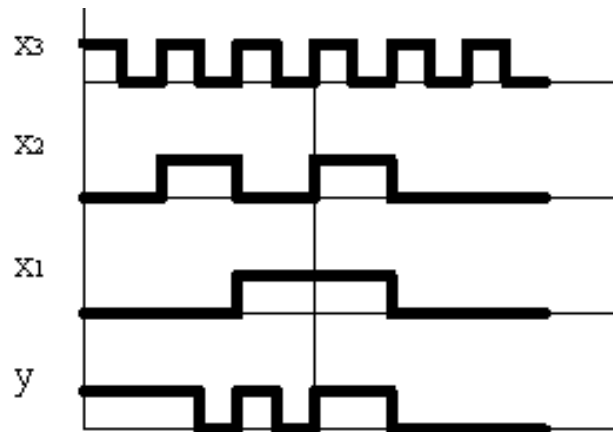


Рис. 3.2. Временная диаграмма логической схемы

## 3. Третий способ: с помощью логического выражения.

$$Y = \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 X_2 X_3$$

4. Четвёртый способ: минимизация логической функции с помощью карты Карно (рис. 3.3). Она представляет собой графическое изображение значений всех возможных комбинаций переменных.

		$xy$			
		$00$	$01$	$11$	$10$
$zv$	$00$				
	$01$				
	$11$				
	$10$				

Рис. 3.3. Карта Карно

Любой алгоритм работы логической схемы (электрической принципиальной) можно представить таблицей истинности (табл. 3.3) например вида:

Таблица 3.3

№ комбинации	x	y	z	F
1	0	0	0	0
2	0	0	1	1
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	1	0	0	0
6	1	0	1	0
7	1	1	0	1
8	1	1	1	1

Представление логической функции в виде суммы минтермов определяет ее совершенную дизъюнктивную нормальную форму (СДНФ), т.е. в данном случае

$$F = \overline{x}y\overline{z} + xy\overline{z} + xyz.$$

Минтермами называют комбинации переменных, при которых функция истина. В нашем случае

$$F = 1; \overline{x}y\overline{z} = 1; xy\overline{z} = 1; xyz = 1.$$

Функция, определяемая таблицей истинности, может быть представлена не только ее единичными, но и нулевыми значениями ( $F = 0$  или  $\overline{F} = 1$ ), тогда

$$\overline{F} = \overline{x}y\overline{z} + \overline{x}y\overline{z} + \overline{x}yz + x\overline{y}\overline{z} + x\overline{y}z.$$

Воспользовавшись законом инверсии, приходим к записи функции в совершенной конъюнктивной нормальной форме (СКНФ):

$$\overline{F} = (x + y + z)(x + \overline{y} + z)(x + \overline{y} + \overline{z})(\overline{x} + y + z)(\overline{x} + y + \overline{z}).$$

Каждый сомножитель состоит из суммы переменных, для которых функция обращается в ноль в соответствии с таблицей истинности. Такие суммы называют конституентами нуля, или макстермами, а произведение макстермов определяет СКНФ-функции [2, 4].

Далее полученную функцию как важную операцию при синтезе логической схемы необходимо минимизировать, т.е. упростить форму, что позволяет реализовать схему с наименьшим числом элементов и повысить надежность работы логической программы ПЛК.

Выявлять и устранять избыточность в записи функции можно путем ее преобразования с использованием аксиом, законов, тождеств и теорем алгебры логики.

Для минимизации функции с числом переменных до пяти-шести наиболее удобным является метод карт Карно.

Процесс минимизации на примере четырех переменных  $x, y, z, u$  функции, заданной следующим логическим выражением:

$$F = yzu + \bar{x}yu + \bar{y}zu + \bar{x}yz + x\bar{z}u + \bar{y}\bar{z}\bar{u} + \bar{y}z\bar{u}.$$

С помощью простейших преобразований представим эту функцию в виде

$$\begin{aligned} F &= yzu(x + \bar{x}) + \bar{x}yu(z + \bar{z}) + \bar{y}zu(x + \bar{x}) + \bar{x}yz(u + \bar{u}) + \\ &\quad + x\bar{z}u(y + \bar{y}) + \bar{y}\bar{z}\bar{u}(x + \bar{x}) + \bar{y}z\bar{u}(x + \bar{x}) = \\ &= xyzu + \bar{x}yzu + \bar{x}yzu + \bar{x}\bar{y}zu + x\bar{y}zu + \bar{x}\bar{y}zu + \bar{x}\bar{y}zu + \\ &\quad + \bar{x}yz\bar{u} + xy\bar{z}\bar{u} + x\bar{y}\bar{z}\bar{u} + x\bar{y}\bar{z}\bar{u} + \bar{x}\bar{y}\bar{z}\bar{u} + x\bar{y}\bar{z}\bar{u} \end{aligned}$$

После исключения повторяющихся членов функция выражается в СДНФ:

$$\begin{aligned} F &= xyzu + \bar{x}yzu + \bar{x}yzu + \bar{x}\bar{y}zu + x\bar{y}zu + \bar{x}\bar{y}zu + \bar{x}yz\bar{u} + \\ &\quad + xy\bar{z}\bar{u} + x\bar{y}\bar{z}\bar{u} + \bar{x}\bar{y}\bar{z}\bar{u} + x\bar{y}\bar{z}\bar{u} + \bar{x}\bar{y}\bar{z}\bar{u} \end{aligned}$$

		$xy$			
		$00$	$01$	$11$	$10$
$zu$	$00$	1			1
	$01$	1	1	1	1
	$11$	1	1	1	1
	$10$		1		

Рис. 3.4. Карта Карно

Карта Карно (рис. 3.4) позволяет минимизировать функцию КНФ по нулевым значениям минермов, находящихся в пустых клетках

карты рис. 3.4 и определяющих нулевое значение функции, т.е. ее инверсное значение  $\bar{F}$ . Порядок проведения минимизации сохраняется прежним. Минимизируя контуры, охватывающие соседние клетки с нулевым значением минтернов рассматриваемой функции, показаны на рис. 3.4 пунктиром [2, 4]. Из карты Карно находим:

$$F = \overline{xyz\bar{u}} + \overline{y\bar{z}u} + \overline{xz\bar{u}} + \overline{xu\bar{y}}.$$

Воспользовавшись инверсным преобразованием, находим минимальную функцию, выраженную в КНФ, равносильную ДНФ:

$$F = (x + y + \bar{z} + u)(\bar{y} + z + u)(\bar{x} + \bar{z} + u)(\bar{x} + \bar{y} + u).$$

Реализация функции в ДНФ требует преимущественного использования логических элементов И (И-НЕ), а в КНФ – логических элементов ИЛИ (ИЛИ-НЕ).

При использовании элементов И (И-НЕ) логическую функцию целесообразно представить в виде произведения переменных, а при использовании логических элементов ИЛИ (ИЛИ-НЕ) – в виде суммы переменных [1]. Задача решается правилом двойной инверсии и теоремой де Моргана. Для рассматриваемой функции соответственно имеем:

$$F = \overline{\overline{\bar{x}} \overline{y} \overline{z} \overline{\bar{y}} \overline{\bar{z}} \overline{\bar{u}}},$$

$$F = \overline{x + y + \bar{z} + u + \bar{y} + z + u + \bar{x} + z + u + \bar{x} + \bar{y} + u},$$

нахождение логической функции и последующую минимизацию применяют при проектировании логических схем программирования комбинационного типа.

На основе проведенных операций получили функцию, выраженную в ДНФ:

$$F = \overbrace{\overbrace{\bar{x}y}^1 z}^2 + \bar{y}\bar{z} + u.$$

На основе полученной функции строим логическую схему (алгоритм управления выходом реле или ПЛК  $F$ ) (рис. 3.5).

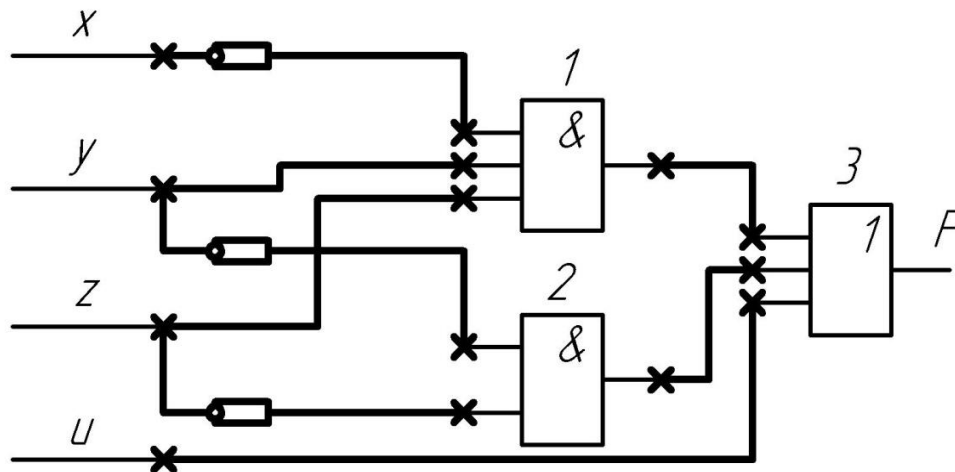


Рис. 3.5. Логическая схема

С учетом особенностей среды программирования, например для OWEN Logic, логическая схема будет выглядеть следующим образом (рис. 3.6):

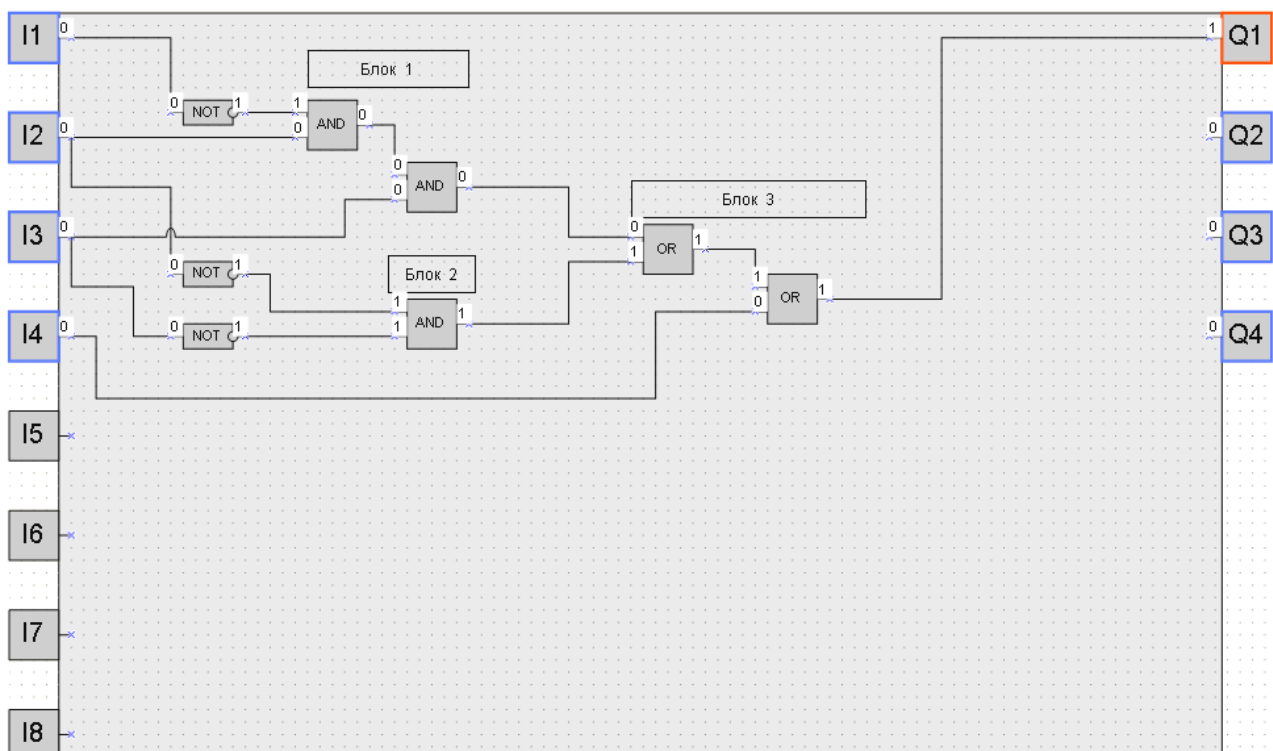


Рис. 3.6. Программа в OWEN Logic

Например, для ONI PLR Studio (рис. 3.7):

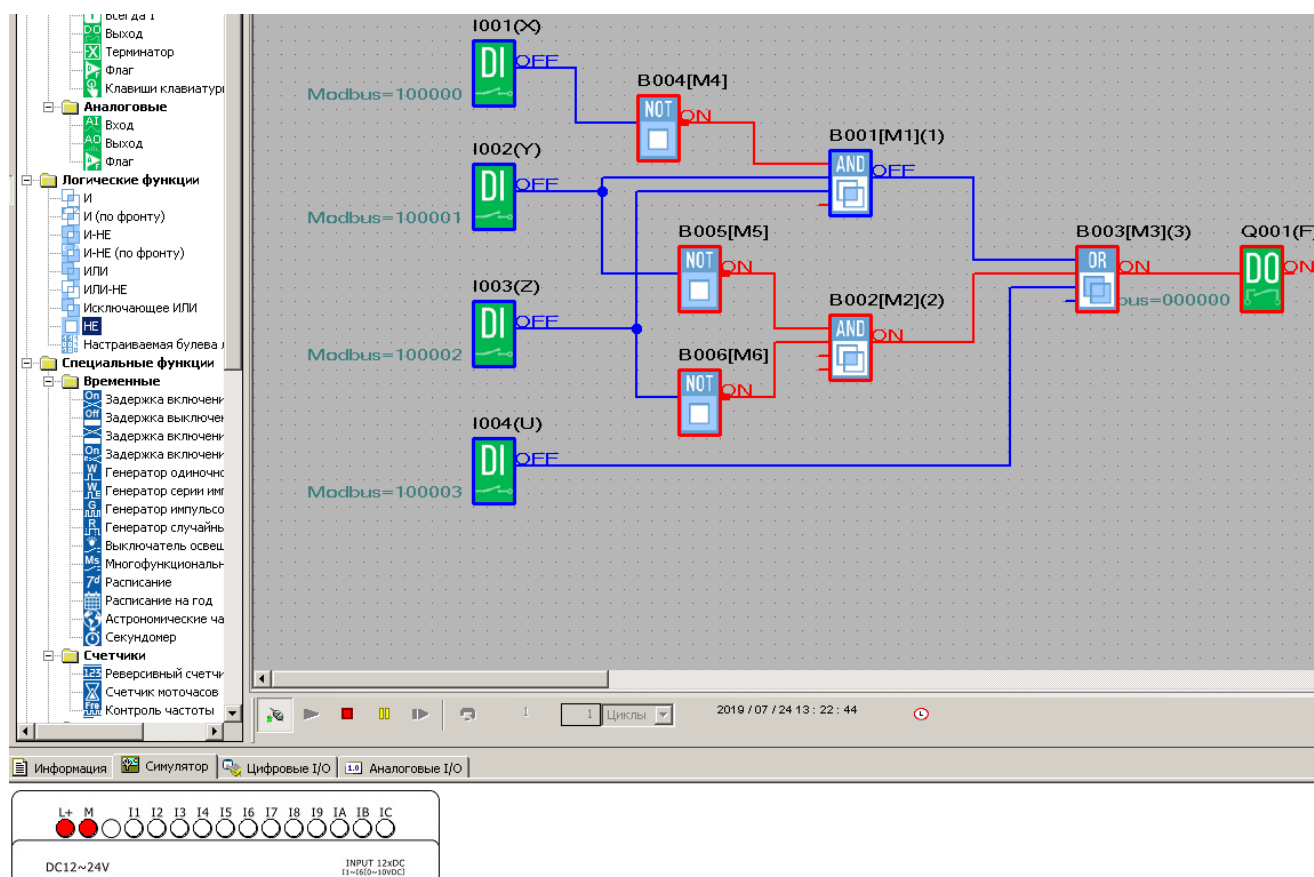


Рис. 3.7. Программа в ONI PLR Studio

Эта особенность связана с отличиями в наименовании блоков и их функциональных возможностях.

Таким образом, составляя логические функции и строя по ним логические схемы, можно реализовать практически любой алгоритм на программируемом реле или ПЛК.

Другим подходом к решению задачи программирования является решение задачи «в лоб», т.е. путем анализа входных и выходных переменных с помощью вербальных конструкций, отражением которых может быть либо False, либо True. Другими словами, подход предполагает перебор всех возможных вариантов, т.е. операций. Но если объем данных большой, это слишком дорогое удовольствие, поэтому разработаны приемы сокращения перебора, которые описаны выше. Все возможные воздействия на результат, а также взаимосвязи результата с работой смежных алгоритмов одной системы управления необходимо просчитывать и хранить в уме.



Такой подход к решению задачи программирования подходит при соблюдении следующих условий:

1. Число анализируемых входов и выходов программируемого реле – не более 8.

2. Решение задачи автоматизации объекта путем разработки алгоритма выполняет квалифицированный специалист (наличие базовых знаний и опыта разработки алгоритмов).

Основным недостатком метода является отсутствие единого упорядоченного подхода к разработке программы по алгоритму, а следовательно, значительное увеличение времени при появлении новых алгоритмов для реализации. Программа, вероятнее, будет избыточна и, возможно, будут упущены взаимосвязанные переменные.

Метод показывает хорошие результаты только на простых или однотипных алгоритмах.

### **3.2. Работа с программой OWEN Logic и разработка программы для реле OWEN**

Среда программирования OWEN Logic предназначена для реализации алгоритмов работы оборудования в электромеханических системах автоматизации процессов. Основой таких систем являются программируемые реле или ПЛК. Реле являются универсальными устройствами, способными управлять автоматическими, автоматизированными и полуавтоматизированными системами в реальном режиме времени с функциями защиты и контроля технологических параметров. При использовании ПЛК или ПР требуется меньше переключающих устройств для решения ряда задач малой автоматизации, что снижает затраты на проектирование и изготовление систем, а также повышает их надежность.

В связи с реализованной в среде функцией симуляции при отсутствии связи с реле одновременно можно работать только с одним проектом. Таким образом, отладку проекта и проведение испытаний алгоритма можно проводить в отсутствие подключенного к компью-

теру оборудования (ПР). Это дает убедительное представление о работоспособности алгоритма и предотвращает возможность повреждения реального оборудования.

Рекомендуемая последовательность операций при разработке проекта в среде OWEN Logic:

- 1) установка среды программирования OWEN Logic на ПК;
- 2) запуск среды программирования;
- 3) создание нового проекта (для конкретной модели ПР/ПЛК) или открытие существующего проекта для редактирования;
- 4) сохранение проекта на жестком диске ПР/ПЛК;
- 5) отладка проекта в режиме симуляции;
- 6) загрузка проекта в ПР/ПЛК.

Среда разработки проектов OWEN Logic является русскоязычной и оснащена справочной системой на русском языке с примерами.

### **3.3. Практические примеры выполнения индивидуальных заданий**

#### **Пример № 1 к заданию № 3.3.1**

По таблице истинности четырех переменных (I1, I2, I3, I4):

- 1) составить и упростить логическую схему;
  - 2) составить карту Карно;
  - 3) начертить логическую схему, реализующую данную логическую функцию;
  - 4) написать программу в среде OWEN Logic;
  - 5) написать программу в среде ONI PLR Studio.
- Схему строить на элементах «И-НЕ».

#### **Выполнение задания**

##### **1. Составим по таблице логическую функцию и упростим ее**

На основе аксиом выведены теоремы, содержащие основные законы АЛ.

Воспользуемся конъюнктивной нормальной формой записи функции (запись по «по полям», т.е. функция составляется по значениям  $F=\langle 0 \rangle$ ) с учетом вышепредставленных законов АЛ, позволяющих сократить и упростить полученную функцию:

$$\begin{aligned}
 Q &= (I_1 + \bar{I}_2 + I_3 + I_4)(I_1 + \bar{I}_2 + I_3 + \bar{I}_4)(I_1 + I_2 + \bar{I}_3 + I_4)(\bar{I}_1 + I_2 + \bar{I}_3 + \bar{I}_4) \times \\
 &\quad \times (\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + I_3 + I_4)(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 + I_4) = (I_1 + \bar{I}_2 + I_3)(I_1 + I_2 + \bar{I}_3) \times \\
 &\quad \times (\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + I_3 + I_4)(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 + I_4) = (I_1 I_2 + I_1 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 I_3 + I_2 I_3) \times \\
 &\quad \times (\bar{I}_1 + \bar{I}_1 I_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_1 I_4 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_2 + \bar{I}_2 I_3 + \bar{I}_3 I_4 + \bar{I}_1 \bar{I}_3 + \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_3 I_4 + \bar{I}_1 I_4 + \\
 &\quad + \bar{I}_2 I_4 + I_3 I_4) = (I_1 I_2 + I_1 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 I_3 + I_2 I_3)(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + I_3 I_4 + \bar{I}_3 \bar{I}_4) = \\
 &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 I_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 I_3 + I_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 I_3 + I_1 I_2 I_3 I_4 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 I_3 I_4 + \\
 &+ \bar{I}_1 I_3 I_4 + I_2 I_3 I_4 + I_1 I_2 \bar{I}_3 \bar{I}_4 + I_1 I_3 \bar{I}_4 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 \bar{I}_4 + \bar{I}_2 \bar{I}_3 \bar{I}_4 = \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_1 I_3 + \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \\
 &\quad + \bar{I}_1 \bar{I}_2 I_3 + I_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 I_3 + I_2 I_3 I_4 + \bar{I}_1 I_3 I_4 = \\
 &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_1 I_3 + \bar{I}_2 \bar{I}_3 + I_2 I_3 I_4 + \bar{I}_1 I_3 I_4
 \end{aligned}$$

Функция, составленная по значениям  $F=\langle 1 \rangle$ , будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
 Q &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 \bar{I}_4 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 I_4 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 I_3 \bar{I}_4 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 I_3 I_4 + \bar{I}_1 I_2 \bar{I}_3 \bar{I}_4 + \\
 &\quad + \bar{I}_1 I_2 \bar{I}_3 I_4 + I_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 \bar{I}_4 + I_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 I_4 + I_1 \bar{I}_2 I_3 \bar{I}_4 + I_1 \bar{I}_2 I_3 I_4
 \end{aligned}$$

По виду функции можно сказать, что во втором случае она значительно сложнее для заданных комбинаций переменных, следовательно, проводим преобразования функции полученной в первом варианте, т.е. для  $F=\langle 0 \rangle$ .

## 2. Составим карту Карно

$I_1 I_2$ $I_3 I_4$	00	01	11	10
00	1	0	1	1
01	1	0	0	1
11	1	1	1	0
10	1	1	0	0

Проверка по таблице истинности подтвердила правильность данной функции.

## 3. Реализуем функцию на логических элементах «И-НЕ» или «ИЛИ-НЕ»

Для этого преобразуем функцию из суммы в инверсию произведения и получаем логическую схему (рис. 3.8). Реализация программы в среде OWEN Logic для одного управляющего воздействия на исполнительный элемент схемы (выход  $Q1$ ) показана на рис. 3.9. Для среды разработки ONI PLR Studio (выход  $Q001$ ) (рис. 3.10).

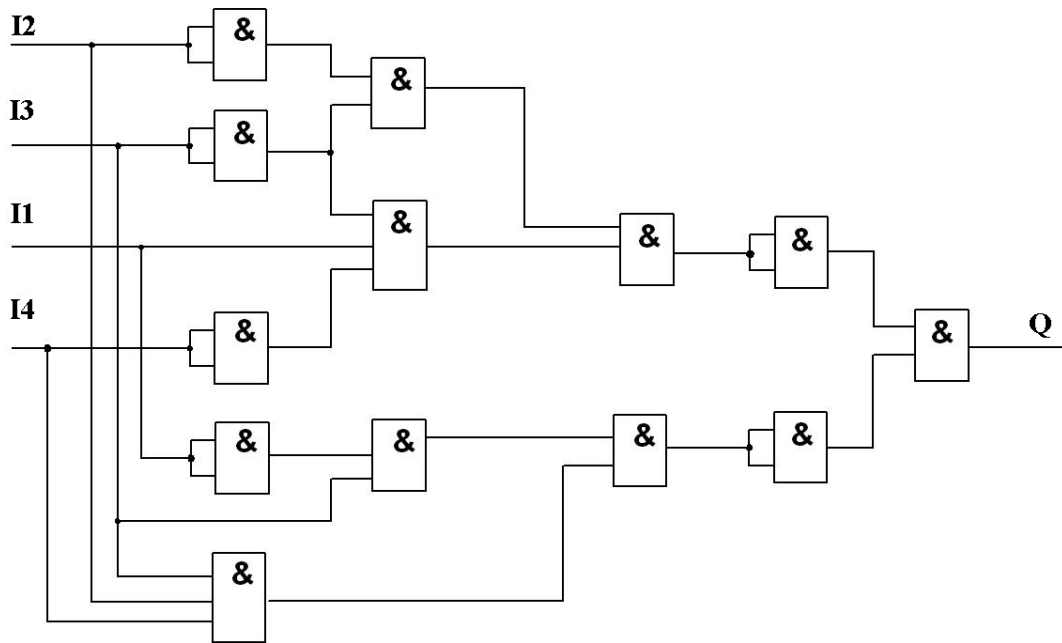


Рис. 3.8. Логическая схема

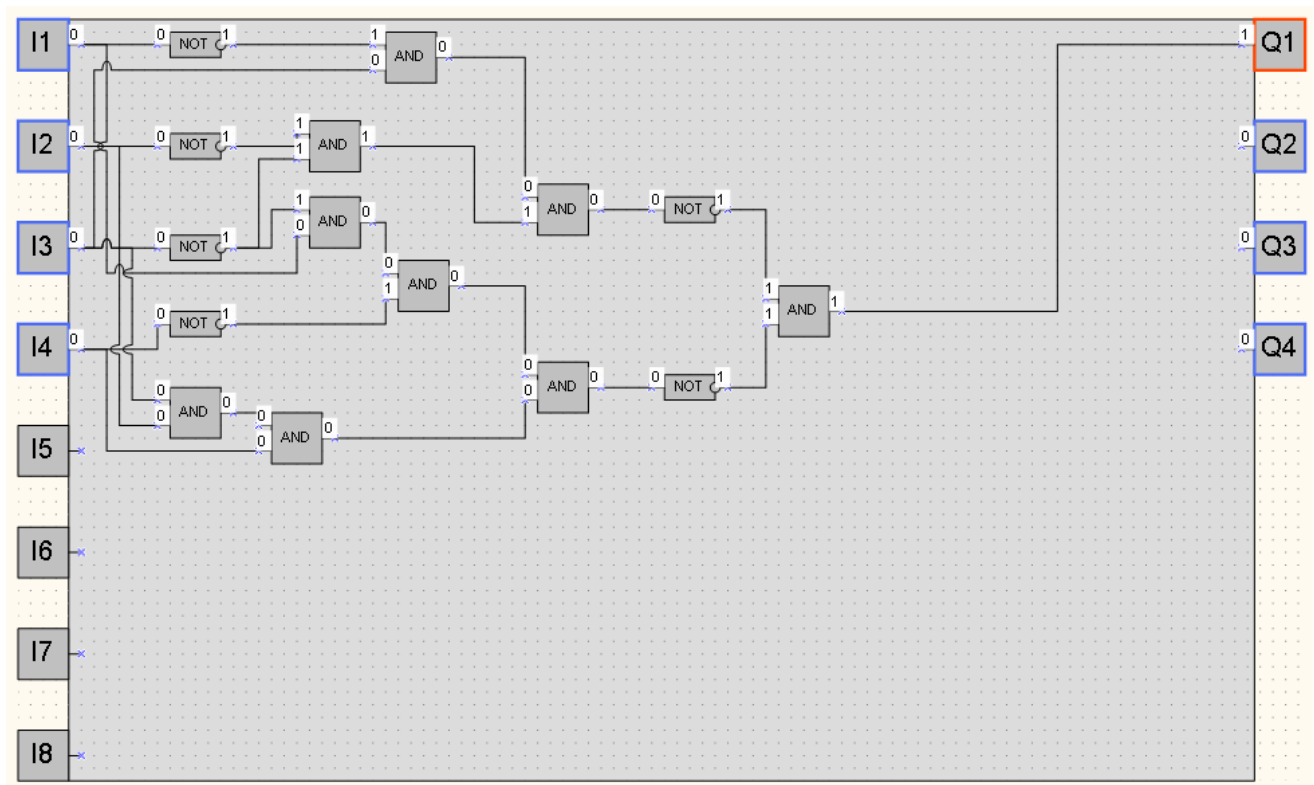


Рис. 3.9. Программа в OWEN Logic

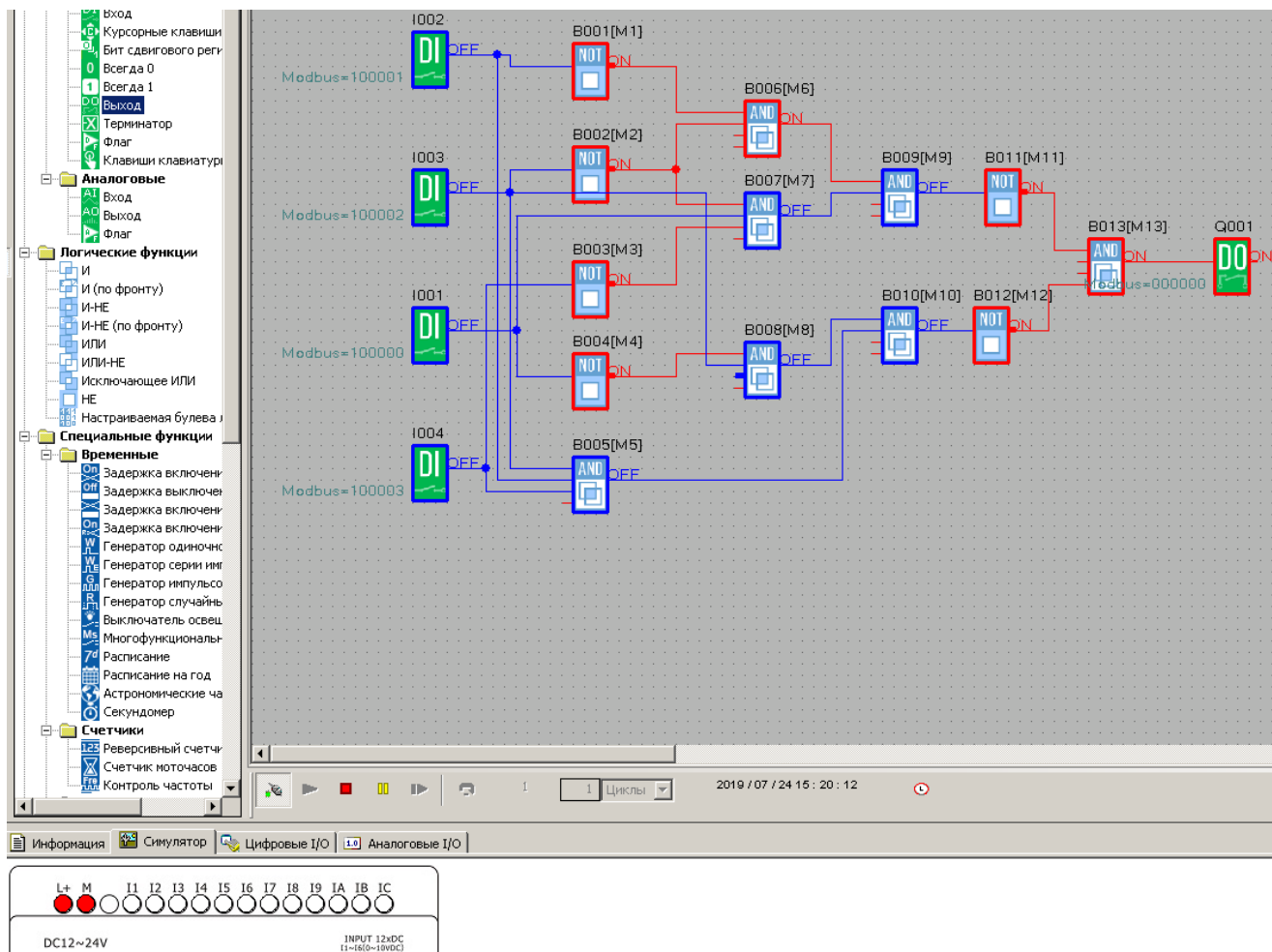


Рис. 3.10. Программа в ONI PLR Studio

### Пример № 2 к заданию № 3.3.2

Для данного логического выражения:

- составить таблицу истинности;
- реализовать функцию на логических элементах «И-НЕ»;
- написать программу в среде OWEN Logic.

#### Выполнение задания

Дана логическая функция

$$Q = I1 I2 \bar{I3} + \bar{I1} I2 \bar{I3}.$$

- Составляем таблицу истинности (табл. 3.4):

Таблица 3.4

I1	I2	I3	Q
1	1	0	1
0	1	0	1

б) Реализуем данную функцию на логических элементах «И-НЕ» (рис. 3.11) в программе OWEN Logic (рис. 3.12).

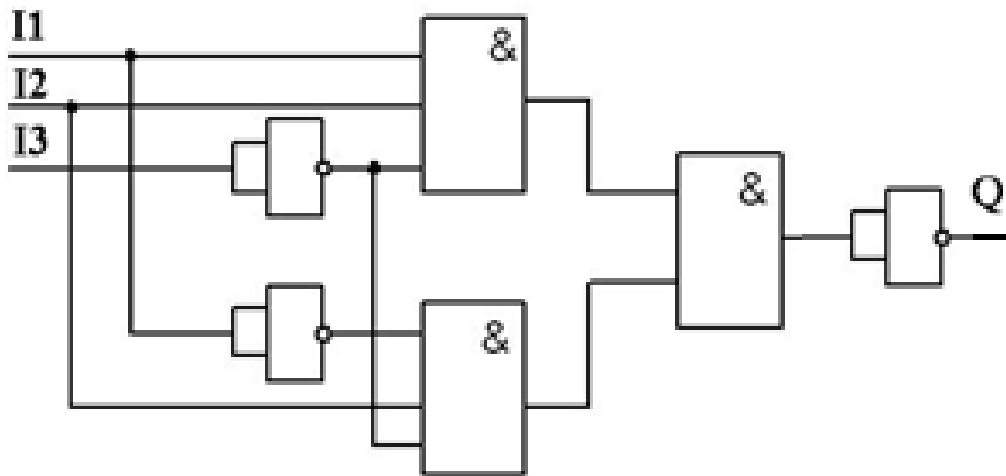


Рис. 3.11. Логическая схема

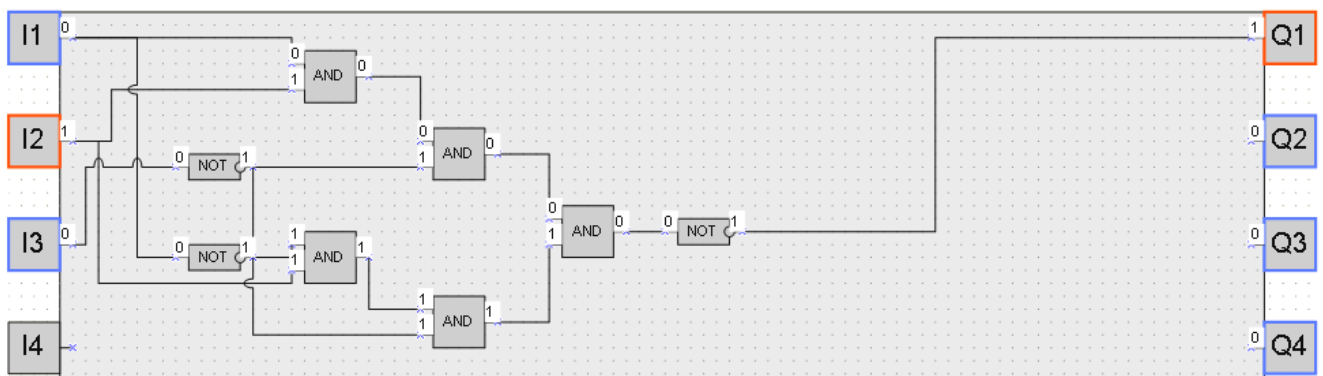


Рис. 3.12. Программа в OWEN Logic

### Задание № 3.3.1. Построить схему на элементах «И-НЕ» и написать программу для ПЛК в OWEN Logic

По таблице истинности (табл. 3.5) четырех переменных:

1. Составить и упростить логическую схему.
2. Составить карту Карно.
3. Начертить логическую схему, реализующую данную логическую функцию. Схему строить на элементах «И-НЕ».
4. Написать программу для ПЛК в OWEN Logic.

Таблица 3.5

№ Варианта				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	B	C	D	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1
1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1
1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1
1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1
1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0
1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0

## Пример № 3 к заданию № 3.3.1

Таблица 3.6

A	B	C	D	F
0	0	0	0	1
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	0	1	1	0
1	1	0	0	1
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	1

**Составим по таблице (табл. 3.6) логическую функцию и упростим ее.**

Воспользуемся конъюнктивной нормальной формой записи функции (запись по «по полям») с учетом следующих законов АЛ:

На основе аксиом выведены теоремы, содержащие основные законы АЛ, необходимые для выполнения задания.

1. Закон нулевого множества:

$$0 \vee x = x;$$

$$0 \& x = 0;$$

$$0 \& x_1 \& x_2 \& \dots \& x_n \& \dots = 0.$$

2. Закон универсального множества:

$$1 \& x = x;$$

$$1 \vee x = 1;$$

$$1 \vee x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_n \vee \dots = 1.$$

3. Закон повторения:

$$x \& x = x;$$

$$x \vee x = x.$$

4. Законы дополнительности:

а) исключенного третьего

$$x \vee \bar{x} = 1;$$

б) логическое противоречие

$$x \& \bar{x} = 0.$$

5. Коммутативный (переместительный) закон:

$$x \& y = y \& x;$$

$$x \vee y = y \vee x.$$

6. Ассоциативный (сочетательный) закон:

$$x \& (y \& z) = (x \& y) \& z = x \& y \& z;$$

$$x \vee (y \vee z) = (x \vee y) \vee z = x \vee y \vee z.$$

7. Дистрибутивный (распределительный) закон:

$$x \& (y \vee z) = x \& y \vee x \& z;$$

$$x \vee y \& z = (x \vee y) \& (x \vee z).$$

8. Законы поглощения:

$$x \& (x \vee y) = x;$$



$$x \vee x \& y = x.$$

$$x \& (x \vee y) = x \& y;$$

$$x \vee x \& y = x \vee y.$$

9. Законы склеивания:

а) полного

$$x \& y \vee x \& y = x;$$

$$(x \vee y) \& (x \vee y) = x.$$

б) неполного

$$x \& y \vee x \& y = x \vee x \& y \vee x \& y;$$

$$(x \vee y) \& (x \vee y) = x \& (x \vee y) \& (x \vee y).$$

10. Законы инверсии (теоремы де Моргана):

$$x_1 \& x_2 \& \dots \& x_n = x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_n;$$

$$x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_n = x_1 \& x_2 \& \dots \& x_n.$$

11. Теоремы разложения (декомпозиции ЛФ):

$$f(x, y, \dots, z) = x \& f(1, y, \dots, z) \vee x \& f(0, y, \dots, z);$$

$$f(x, y, \dots, z) = (x \vee f(0, y, \dots, z)) \& (x \vee f(1, y, \dots, z)).$$

12. Следствия из теорем разложения:

$$x \& f(x, y, \dots, z) = x \& f(1, y, \dots, z);$$

$$x \vee f(x, y, \dots, z) = x \vee f(0, y, \dots, z);$$

$$x \& f(x, y, \dots, z) = x \& f(0, y, \dots, z);$$

$$x \vee f(x, y, \dots, z) = x \vee f(1, y, \dots, z).$$

13. Теорема Шеннона (обобщение теорем де Моргана):

$$f(x, y, \dots, z, \&, \vee) = f(x, y, \dots, z, \vee, \&).$$

Данная теорема утверждает, что инверсия любой функции в АЛ получается путем замены каждой переменной ее инверсией и одновременно взаимной заменой символов конъюнкции и дизъюнкции.

Справедливость любого закона АЛ можно доказать разными методами. Законы (1-5) доказываются путем прямой подстановки вместо переменной значений 0 и 1. Ряд законов доказывается методом перебора всех возможных значений переменных, для которых проверяется справедливость закона. Для доказательства закона достаточно показать тождественность выражений, образующих левую и правую стороны доказываемого соотношения при всех наборах переменных,

принимающих значения 0 или 1. Общий формальный метод доказательства законов АЛ состоит в том, что справедливость каждого закона доказывается на основе аксиом и ранее доказанных законов. Доказательство заключается в приведении обеих частей выражения к одному виду с помощью последовательных преобразований. Для доказательства законов инверсии следует воспользоваться методом математической индукции.

Далее на основании указанных выше законов производится упрощение логической функции:

$$\begin{aligned}
 F &= (A + \bar{B} + C + D)(A + \bar{B} + C + \bar{D})(A + B + \bar{C} + D)(\bar{A} + B + \bar{C} + \bar{D}) \times \\
 &\quad \times (\bar{A} + \bar{B} + C + D)(\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + D) = (A + \bar{B} + C)(A + B + \bar{C}) \times \\
 &\quad \times (\bar{A} + \bar{B} + C + D)(\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + D) = (AB + A\bar{C} + \bar{A}\bar{B} + \bar{B}\bar{C} + \bar{A}C + BC) \times \\
 &\quad \times (\bar{A} + \bar{A}C + \bar{A}\bar{B} + \bar{A}\bar{D} + \bar{A}\bar{B} + \bar{B} + \bar{B}C + \bar{B}\bar{D} + \bar{A}C + \bar{B}\bar{C} + \bar{C}\bar{D} + \bar{A}D + \\
 &\quad + \bar{B}D + CD) = (AB + A\bar{C} + \bar{A}\bar{B} + \bar{B}\bar{C} + \bar{A}C + BC)(\bar{A} + \bar{B} + CD + \bar{C}\bar{D}) = \\
 &\quad = \bar{A}\bar{B} + \bar{A}\bar{B}\bar{C} + \bar{A}C + \bar{A}\bar{B}C + \bar{A}\bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{B} + \bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{B}C + ABCD + \bar{A}\bar{B}CD + \\
 &\quad + \bar{A}CD + BCD + \bar{A}B\bar{C}\bar{D} + \bar{A}C\bar{D} + \bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D} + \bar{B}\bar{C}\bar{D} = \bar{A}\bar{B} + \bar{A}C + \bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{B}C + \\
 &\quad + \bar{A}\bar{B}C + \bar{A}\bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{B}C + BCD + \bar{A}C\bar{D} + \bar{A}\bar{C}\bar{D} = \bar{A}\bar{B} + \bar{A}C + \bar{B}\bar{C} + BCD + \bar{A}\bar{C}\bar{D}
 \end{aligned}$$

## 2. Составим карту Карно

AB CD	00	01	11	10
00	1	0	1	1
01	1	0	0	1
11	1	1	1	0
10	1	1	0	0

Проверка по таблице истинности подтвердила правильность данной функции.

## 3. Реализуем функцию на логических элементах «И-НЕ»

Для этого преобразуем функцию из суммы в инверсию произведения и строим логическую схему (рис. 3.13).

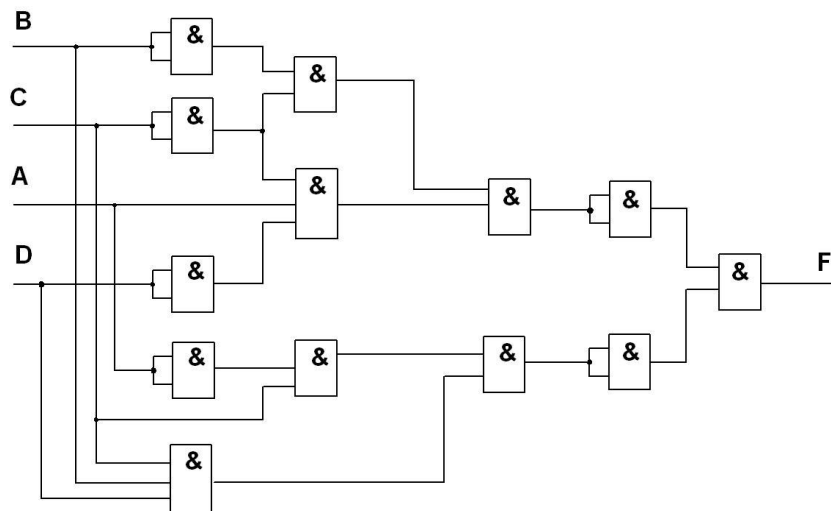


Рис. 3.13. Логическая схема

**4. Реализуем программу для ПЛК в среде OWEN Logic (рис. 3.14)**

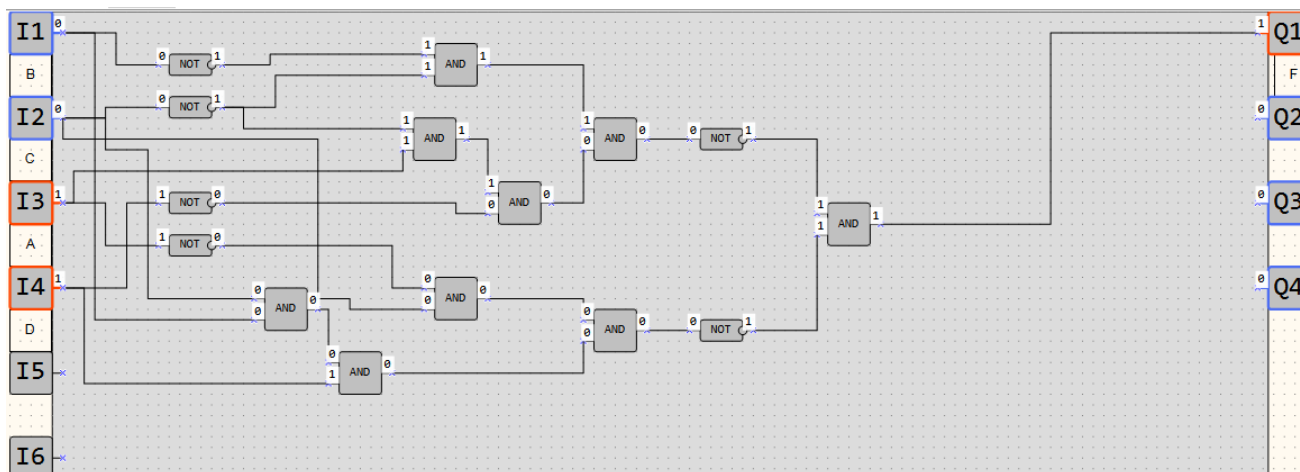


Рис. 3.14. Программа для ПЛК в среде OWEN Logic

**Задание № 3.3.2. Для данного логического выражения построить схему на элементах «И-НЕ» и написать программу для ПЛК в OWEN Logic**

Для данного логического выражения (табл. 3.7):

- составить таблицу истинности;
- реализовать функцию на логических элементах «И-НЕ»;
- написать программу для ПЛК в OWEN Logic.

Таблица 3.7

№ вар.	Логическая функция
1	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3$
2	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 + X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 X_2 \bar{X}_3$
3	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 + \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3$
4	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 X_2 \bar{X}_3$
5	$Y = X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 X_3$
6	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 X_3$
7	$Y = X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 X_2 X_3$
8	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 X_2 \bar{X}_3$
9	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 X_3$
10	$Y = X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 X_2$
11	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_3$
12	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_3$
13	$Y = X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_2 X_3$
14	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2$
15	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 X_2 X_3$
16	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3$
17	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3$
18	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 + X_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_2 \bar{X}_3$
19	$Y = X_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 X_2 + \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_2 X_3$
20	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 + X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3$

### Пример № 4 к заданию № 3.3.2

Дано: Логическая функция

$$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3.$$

а) Составляем таблицу истинности (табл. 3.8):

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y
1	1	0	1
0	1	0	1
1	0	1	0
0	0	1	0

б) Реализуем данную функцию на логических элементах «И-НЕ» (рис. 3.15);

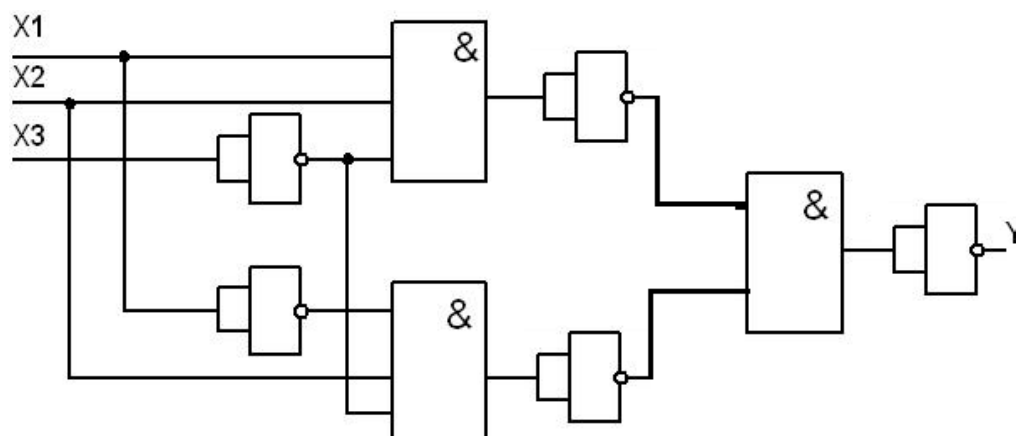


Рис. 3.15. Логическая схема

в) Полученную схему программируем в системе OWEN Logic (рис. 3.16).

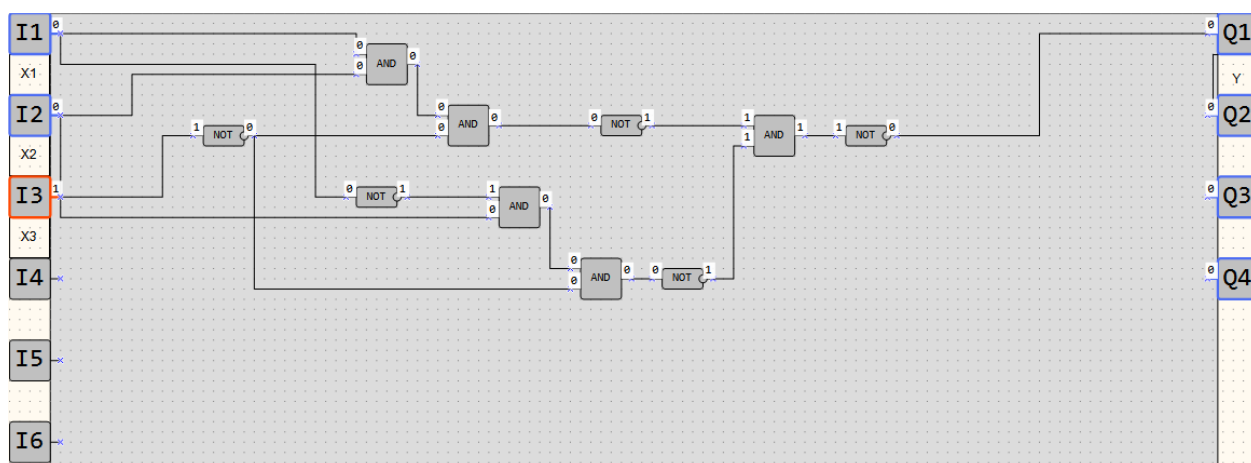


Рис. 3.16. Программа для ПЛК в среде OWEN Logic

### Задание № 3.3.3. Синтезировать реверсивный или нереверсивный счетчики

Функции, выполняемые счетчиками, используются в устройствах регистрации и цифровым представлением информации с высокой степенью точности, устройствах обработки информации и устройствах связи с электронными вычислительными машинами.

В электромеханических системах счетчики используются для определения угла поворота или перемещения исполнительного органа, скорости, частоты, времени, температуры и т.д.

Импульсы преобразуются в напряжения, число которых в соответствующем масштабе характеризует значение данного параметра. Эти импульсы подсчитываются счетчиками импульсов и выражаются в виде цифр.

По целевому назначению счетчики подразделяют на простые и реверсивные (рис. 3.20, а, б). Простые счетчики, в свою очередь, подразделяют на суммирующие (рис. 3.17, 3.19) и вычитающие (рис. 3.18) [1].

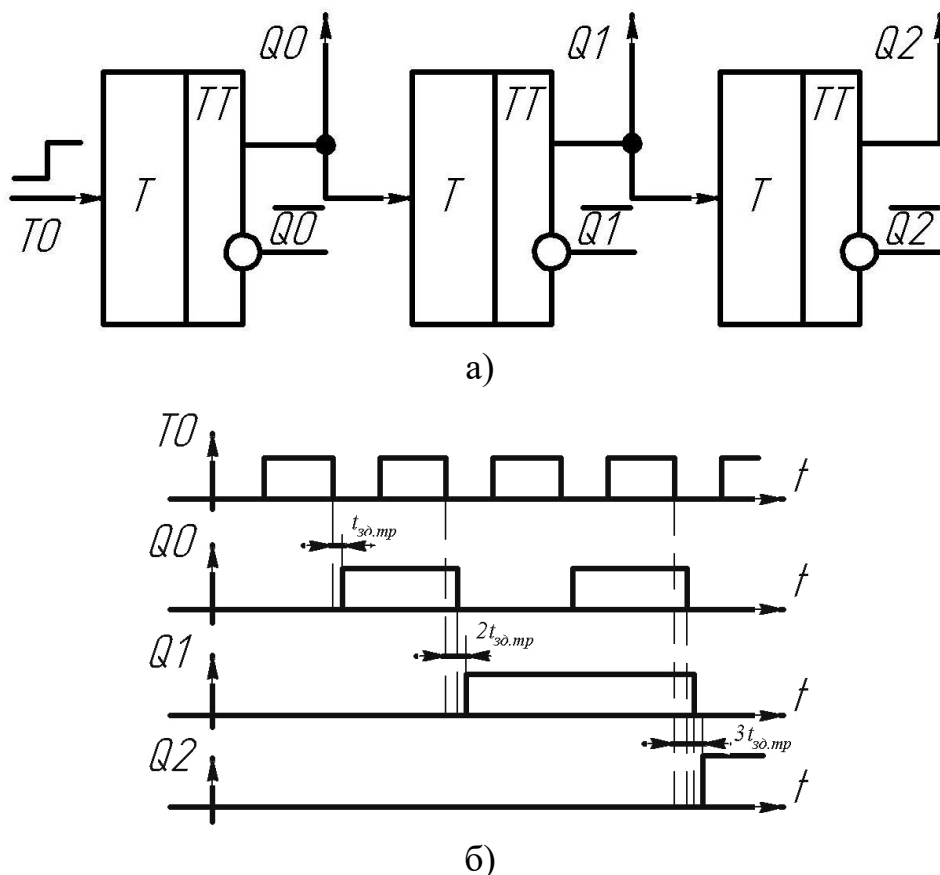


Рис. 3.17. Суммирующий счетчик с последовательным переносом:  
схема (а), диаграмма работы (б)

Частота следования сигналов (рис. 3.17, б) счета составляет  $F_{сч} \leq 1/(t_{сч} + t_{зд.мп})$ . Полное время счета:

$$T_{сч} \geq t_{сч} + m \cdot t_{зд.мп} + t_{опр},$$

где  $t_{сч}$  – длительность счетного импульса  $T0$ ;  $t_{зд.мп}$  – время переключения триггера;  $t_{опр}$  – длительность сигнала опроса;  $m$  – число разрядов.

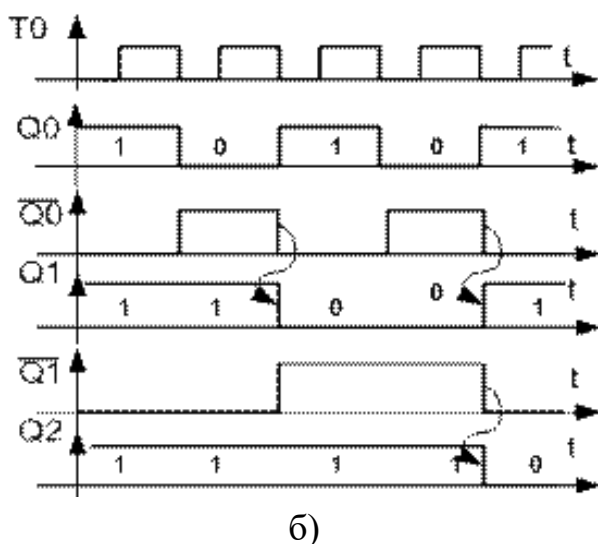
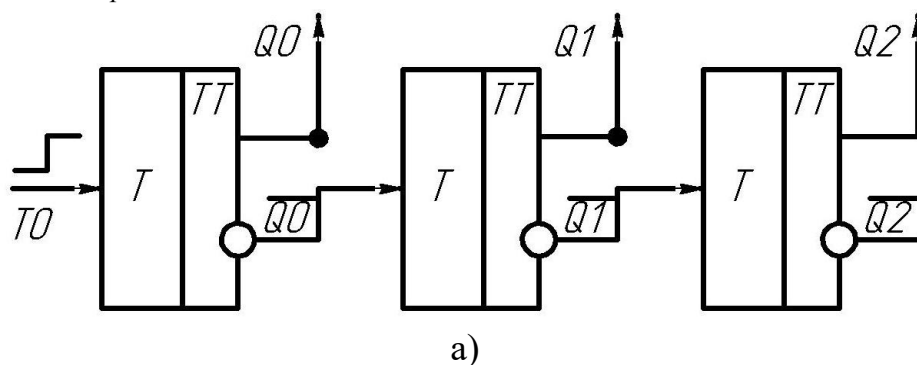


Рис. 3.18. Вычитающий счетчик с последовательным переносом:  
схема (а); диаграмма (б)

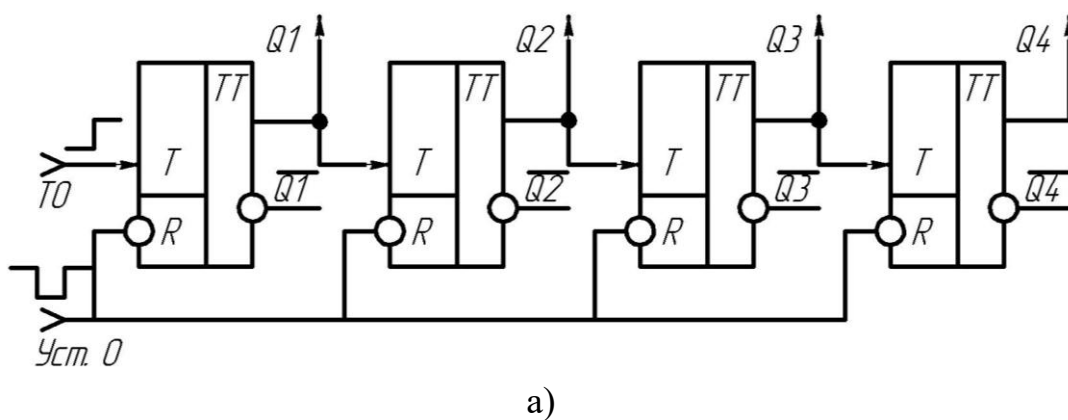
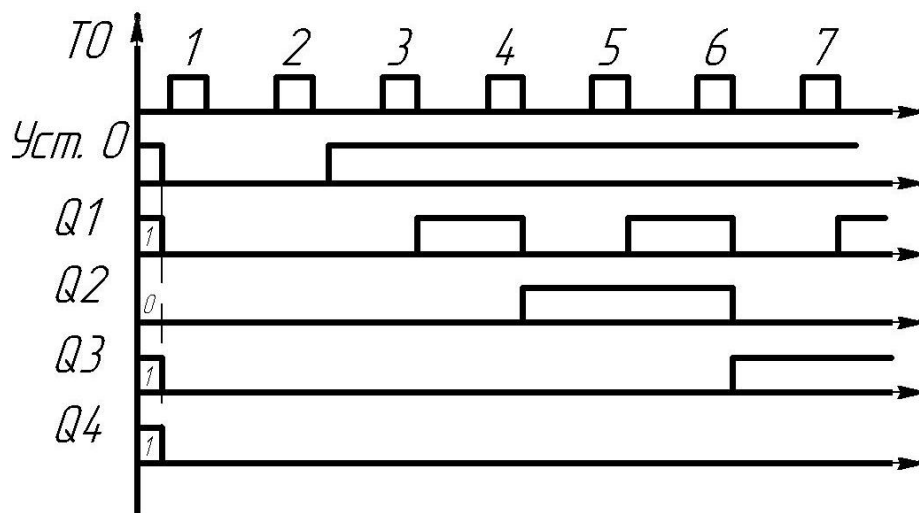
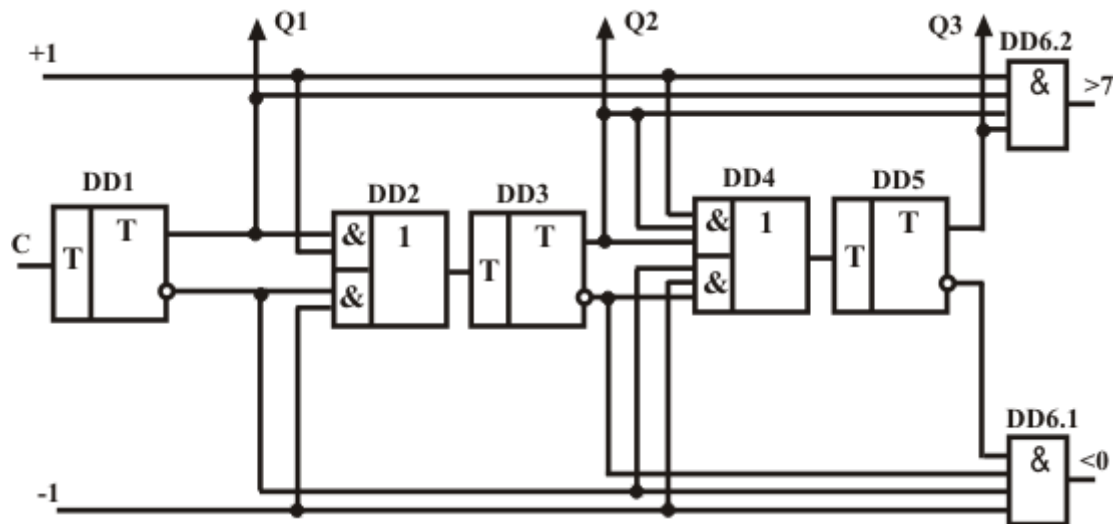


Рис. 3.19. (начало) Асинхронный суммирующий счетчик  
с предварительной установкой в нулевое состояние:  
схема (а); диаграмма (б)

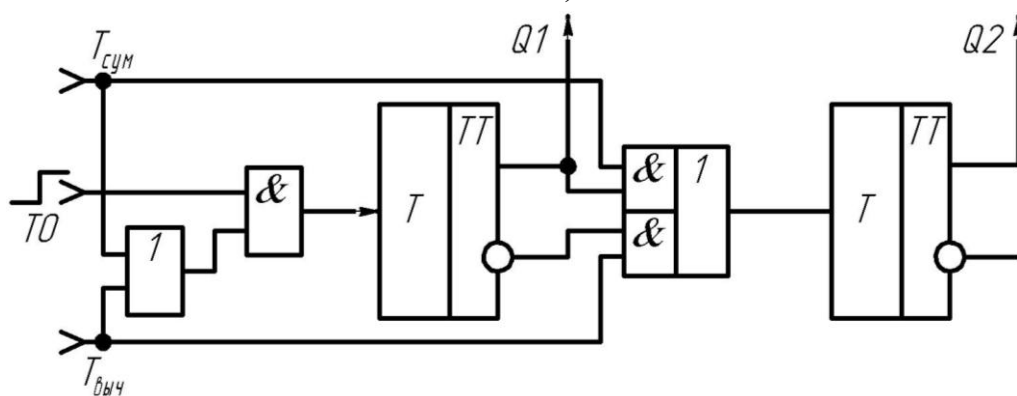


б)

Рис. 3.19. (окончание) Асинхронный суммирующий счетчик с предварительной установкой в нулевое состояние: схема (а); диаграмма (б)



а)



б)

Рис. 3.20. Схемы реверсивных счетчиков.  
Необходимо соблюдение условия  $T_{сум} \cdot T_{выч} = 0$



Основными показателями счетчиков являются модуль счета (коэффициент счета  $K$ ) и быстродействие.

Коэффициент счета определяет число импульсов, которое может быть сосчитано счетчиком.

Быстродействие счетчика характеризуется максимальной частотой следования счетных импульсов и связанным с ней временем.

Счетчики импульсов выполняются на основе триггеров.

Счет числа поступающих импульсов производится с использованием двоичной системы счисления.

Модуль счета двухразрядного, трехразрядного и четырехразрядного двоичных счетчиков равен соответственно 4, 8 и 16. Модуль счета двоичного счетчика находят из соотношения  $K_{сч} = 2^N$ , где  $N$  – число разрядов счетчика.

Иногда требуется получить счетчики с коэффициентом счета  $K_{сч} \neq 2^N$  ( $K_{сч} = 3, 10 \dots$  и др.). Существуют разнообразные способы получения подобных счетчиков [1]. Наибольшее распространение получил способ принудительной установки в состояние «0» всех разрядов двоичного счетчика и способ принудительного насчёта. По первому способу реализуются счетчики с естественным порядком счета, по второму – счетчики с принудительным насчётом [1]. Подробно способы рассмотрены в [1].

В нашем случае необходимо синтезировать счетчик по модулю указанному в табл. 3.9:

Таблица 3.9

№ вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
модуль	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№ вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
модуль	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

Для вариантов 3–10 синтезировать реверсивный счетчик, 11–20 нереверсивный.

### Пример №5 к заданию № 3.3.3

**Задание:** синтезировать нереверсивный двоично-десятичный счетчик по модулю десять.

Счетчик реализуем на двухтактных R-S-триггерах М-S-типа рис. 3.21.

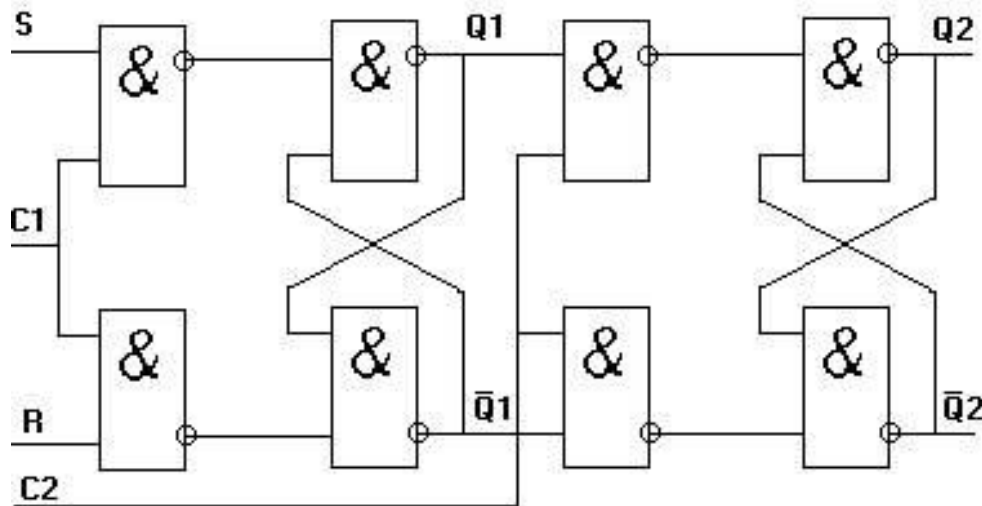


Рис. 3.21. Двухтактный R-S триггер М-S-типа

Получаем следующую схему (рис. 3.22).

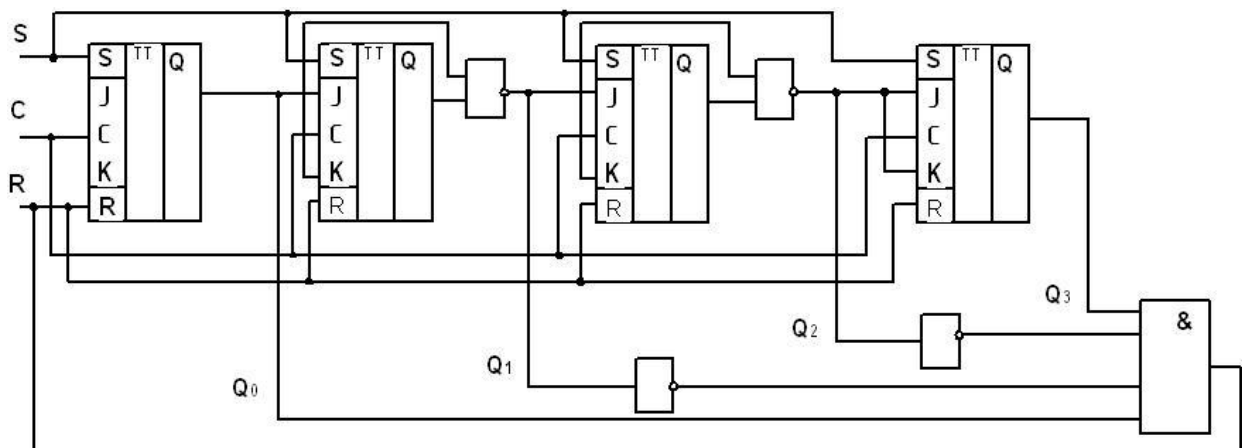


Рис. 3.22. Схема счетчика

Построим временные диаграммы (рис. 3.23).

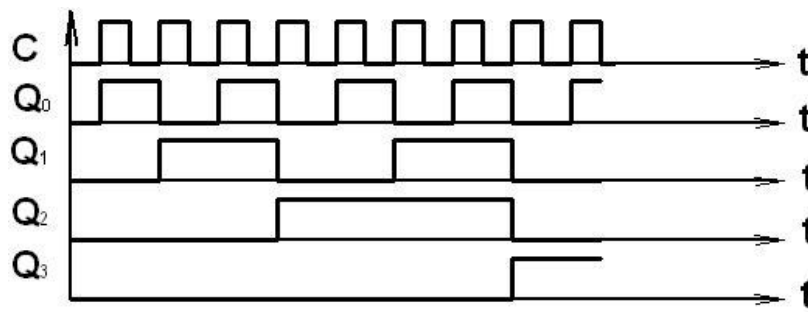


Рис. 3.23. Диаграмма работы счетчика

### Контрольные вопросы третьего раздела

#### «Программирование логических контроллеров (ПЛК)»

1. Три простейших базовых логических элемента.
2. Способы представления логического алгоритма.
3. Принципы логического программирования ПЛК.
4. Применение «Таблиц истинности» для решения практических задач логического программирования механотронных систем.
5. Разновидности и назначение счётчиков.
6. Принцип работы асинхронного суммирующего счетчика с предварительной установкой в нулевое состояние.
7. Принцип работы вычитающего счетчика с последовательным переносом.
8. Принцип работы суммирующего счетчика с последовательным переносом.
9. Принцип работы двухтактного R-S-триггера M-S-типа.
10. Принцип работы реверсивных счетчиков?
11. Что определяет параметр, называемый коэффициентом (модулем) счета?
12. На основе каких устройств выполняются счетчики?
13. Особенности работы и отличия счетчиков с естественным порядком счета и счетчиков с принудительным насчётом?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трудно решаемые проблемы, связанные с согласованием эксплуатационных параметров устройств управления с нагрузкой (например, электромеханические преобразователи), могут быть решены при комплексном подходе с привлечением математического моделирования и экспериментальных исследований в различных режимах работы оборудования. Вторая часть пособия будет посвящена вопросам математического и виртуального моделирования рассмотренных в пособии устройств.

Совершенствование полупроводниковых преобразователей напряжения позволит повысить качество процессов, протекающих в установившихся и переходных режимах работы устройств механотронных систем. С повышением качества переходных процессов и применяемых элементов повышается и надежность работы устройств, поэтому в пособии рассмотрены методики выбора элементной базы, обоснования и применения новых схемных решений, алгоритмов и устройств управления. В практической деятельности опыт проектирования и расчета рассмотренных устройств позволит будущим специалистам оптимально решать возникающие технические задачи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Додик С.Д., Гальперин Е.И. Источники электропитания на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчет. – М.: Советское радио, 1969. – 449 с.
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1982. – 496 с.
3. Родионов Ю.М. Справочник заводского радиоэлектроника / Ю.М. Родионов. – Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 1987. – 159 с.
4. Расчет и проектирование полупроводниковых приборов: пер. с англ. / Под ред. канд. техн. наук Г.Д. Глебова. – М.: Оборонгиз, 1963. – 532 с.
5. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: учебник для энергетических специальностей вузов / Под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
6. Герасимов В.Г. Электротехнический справочник. Т. 2: Электротехнические изделия и устройства [Электронный ресурс] / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. И.Н. Орлов). – 10-е изд., стереотип. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 518 с.
7. Косматов В.И., Андросенко В.В. Проектирование тиристорных преобразователей. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. – 113 с.
8. Справочник разработчика и конструктора РЭА. Элементная база. Кн. 2 / М.Ю. Масленков, Е.А. Соболев, Г.А. Соколов и др. – М., 1993. – 300 с.
9. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е, 1982. – 392 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие .....</b>	<b>3</b>
<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Полупроводниковые преобразователи напряжения.....</b>	<b>6</b>
1.1. Основные схемы транзисторных преобразователей напряжения и их выбор.....	6
1.2. Особенности проектирования преобразователей напряжения и основные расчетные соотношения .....	16
1.3. Двухтактные преобразователи напряжения с самовозбуждением.....	32
1.4. Расчет полупроводниковых преобразователей напряжения. ....	38
Задание № 1.4.1. Порядок расчета преобразователей с самовозбуждением. ....	39
Задание № 1.4.2. Порядок расчета преобразователей напряжения с независимым возбуждением.....	44
1.5. Способы стабилизации частоты и выходного напряжения преобразователей.....	48
Контрольные вопросы к первому разделу «Полупроводниковые преобразователи напряжения».....	54
<b>2. Стабилизаторы напряжения.....</b>	<b>57</b>
2.1. Назначение и принципы работы стабилизаторов напряжения.....	57
Задание № 2.1.1. Расчет транзисторного стабилизатора напряжения .....	59
Контрольные вопросы к второму разделу «Стабилизаторы напряжения» .....	67
<b>3. Программирование логических контроллеров (ПЛК).....</b>	<b>69</b>
3.1. Математические основы логической алгебры и программирования.....	69
3.2. Работа с программой OWEN Logic и разработка программы для реле OWEN .....	83
3.3. Практические примеры выполнения индивидуальных заданий .....	84
Задание № 3.3.1. Построить схему на элементах “И-НЕ” и написать программу для ПЛК в OWEN Logic .....	88
Задание № 3.3.2. Для данного логического выражения построить схему на элементах “И-НЕ” и написать программу для ПЛК в OWEN Logic .....	93
Задание № 3.3.3. Синтезировать реверсивный или нереверсивный счетчики .....	96
Контрольные вопросы третьего раздела «Программирование логических контроллеров (ПЛК)».....	101
<b>Заключение .....</b>	<b>102</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>103</b>

*Учебное издание*

*ВЕРЕЩАГИН Владислав Евгеньевич*

**Электромеханотроника**  
**Часть 1**

Редактор *Е.С. Захарова*

Компьютерная верстка *И.О. Миняева*

Выпускающий редактор *Ю.А. Петропольская*

Подп. в печать 23.03.20

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная

Усл. п.л. 6,08. Уч.-изд. л. 6,05

Тираж 100 экз. Рег. № 61/20

---

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский государственный технический университет»  
443100, г.Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии  
Самарского государственного технического университета  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус 8