

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Кафедра электромеханики, электрических и электронных аппаратов

М.Г. Лепанов, М.Г. Киселев

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ
ИССЛЕДОВАНИЕ В СРЕДЕ SIMINTECH**

Практикум
для студентов, обучающихся по направлению
13.03.02. «Электроэнергетика и электротехника»

ISBN 978-5-7046-3306-8

© М.Г. Лепанов, М.Г. Киселев, 2025
© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2025

УДК 621.316
ББК 31.264
Л 48

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»
в качестве учебного издания*

*Подготовлено на кафедре электромеханики, электрических и
электронных аппаратов*

Рецензенты: зав. каф., канд. техн. наук А.В. Михайлов;
 доц., канд. техн. наук П.А. Дергачев

Лепанов, М.Г.

Л 48 Электрические и электронные аппараты. Исследование в среде SimInTech [Электронный ресурс]: практикум / М.Г. Лепанов, М.Г. Киселев. – Электрон. дан. – М.: Издательство МЭИ, 2025 – 1 электрон. опт. диск DVD-R.

Данный практикум содержит описания лабораторных работ, выполняемых в программе моделирования SimInTech по курсу «Электрические и электронные аппараты». Лабораторные работы посвящены изучению цепей формирования траектории переключения полупроводниковых ключей, регуляторов постоянного тока, инверторов и тиристорных регуляторов на встречно-параллельных тиристорах.

Для студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника».

Минимальные системные требования:

Тип ЭВМ: ПК на базе Intel Pentium 1 ГГц 32-бит (или совместимый аналог)

ОС: Microsoft Windows 8 (64 бита) и выше.

Дополнительные программные средства: SumatraPDF, SimInTech

Веб-браузер: Yandex

ISBN 978-5-7046-3306-8

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
НАВИГАЦИОННОЕ МЕНЮ (список лабораторных работ).....	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1	
Цепи формирования траектории переключения силовых транзисторов	7
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2	
Импульсные регуляторы постоянного тока.....	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3	
Автономные инверторы напряжения.....	41
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4	
Тиристорный регулятор и компенсация реактивной мощности.....	57
Приложение 1. Повторение теоретического материала.....	71
Приложение 2. Оформление отчёта.....	84
Приложение 3. Внешний вид исследуемых моделей.....	85

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время полупроводниковые электронные аппараты получили большое распространение в первую очередь в области регулирования напряжения и тока за счёт главного их преимущества – способности работать на высокой частоте коммутации.

В издании предлагаются четыре лабораторные работы по курсу «Электрические и электронные аппараты», разработанные на базе программы *SimInTech*.

Лабораторные работы затрагивают вопросы применения силовых полупроводниковых ключей для коммутации различных видов нагрузки, исследования принципов работы и характеристик основных схем электронных аппаратов – регуляторов постоянного тока, инверторов напряжения, регуляторов на основе встречно-параллельных тиристоров.

Лабораторные работы составлены в едином стиле и структуре, которая состоит из описания лабораторной работы, теоретического раздела по соответствующей теме, списка заданий, включающего указания (что нужно делать) в виде цветового поля, инструкции по выполнению в рамочках, и инструкции по обработке полученных результатов (в виде поля серого цвета).

В конце сборника приведены основные требования к оформлению отчета по выполненной лабораторной работе. В приложениях изложены материалы для повторения о моделях полупроводниковых ключей, расчете переходных процессов, использовании математических инструментов для анализа полученных графиков, такие как вычисление среднего и действующего значений, разложение в ряд Фурье (спектральный состав).

В конце каждой лабораторной работы приводится список контрольных вопросов, которые состоят из двух блоков. Первый блок вопросов предполагает быстрый ответ студента, второй блок вопросов в большинстве своем основан на объяснении теоретического материала или анализе полученных результатов лабораторной работы.

Для перемещения по основным разделам предлагается использовать **навигационное меню**, где можно по ссылке перейти к описанию лабораторной работы, к разделу теоретической подготовки, заданию и к вопросам. Задания в каждой лабораторной работе размещены в блоках соответствующего цвета. Для возвращения от текста к навигационному меню в каждом разделе предлагается использовать гиперссылку с надписью «К СПИСКУ».

Полный теоретический материал по темам лабораторных работ представлен в следующих учебниках:

- **Электрические и электронные аппараты**: учебник и практикум для вузов / под ред. П. А. Курбатова. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — 440 с. — ISBN 978-5-534-00953-8.

- **Электронные аппараты:** учебник и практикум для вузов / под ред. П. А. Курбатова. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 195 с. — ISBN 978-5-9916-9719-4.
- **Силовая электроника:** учебник и практикум для вузов / Ю. К. Розанов, М. Г. Лепанов — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 206 с. — ISBN 978-5-9916-9440-7.



НАВИГАЦИОННОЕ МЕНЮ (список лабораторных работ)

Лабораторная работа №1. ЦФТП	Лабораторная работа №2. Регуляторы постоянного тока
ОПИСАНИЕ РАБОТЫ	ОПИСАНИЕ РАБОТЫ
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА	ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА
ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ	ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ
Лабораторная работа №3. Автономные инверторы	Лабораторная работа №4. Тиристорный регулятор и КРМ
ОПИСАНИЕ РАБОТЫ	ОПИСАНИЕ РАБОТЫ
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА	ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА
ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ	ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ
Дополнительные материалы Повторение теоретического материала Оформление отчета лабораторной работы + ШАБЛОН Внешний вид моделей исследуемых в лабораторных работах	

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Цепи формирования траектории переключения силовых транзисторов

 [К СПИСКУ](#) 

В лабораторной работе изучаются цепи формирования траектории переключения (или снабберы), обеспечивающие безопасную работу силовых транзисторов в динамических режимах (в процессах включения и выключения нагрузки). Исследуются процессы коммутации электрических цепей с различным характером нагрузки.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

Цель работы – изучить режимы работы силового транзистора при коммутациях активной, активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузок. Исследовать способы улучшения условий коммутации транзистора.

В работе исследуются процессы включения и выключения различных типов нагрузок при наличии и отсутствии ЦФТП транзисторного ключа (рис. 1.1).

Данная работа выполняется в среде *SimInTech (Simulation In Technic)*. Для каждой исследуемой схемы используются модели, позволяющие вычислить токи и напряжения на элементах электрической цепи в течение периода переключения транзистора, т.е. получить соответствующие осциллограммы. При этом диоды в схемах принимаются идеальными, а управляемый силовой ключ (транзистор) представляется в виде эквивалентных схем замещения: на интервалах включенного (выключенного) состояний – элементом с нулевым сопротивлением (проводимостью), на интервалах переключения – управляемыми источниками напряжения и тока.

Список исследуемых моделей:

- «JP1-ЦФТП-R» – "models/JP1-ЦФТП-R.prt" – рис. П3.2;
- «JP1-ЦФТП-RC» – "models/JP1-ЦФТП-RC.prt" – рис. П3.3;
- «JP1-ЦФТП-RL» – "models/JP1-ЦФТП-RL.prt" – рис. П3.4.

Дополнительно модели размещены внутри данного файла pdf-файла (в "SumatraPDF" выберите Вид - Показывать закладки (или нажмите F12)).

В компьютерной модели «ЛР1-ЦФТП-R» изучаются процессы коммутации R -нагрузки. В модели «ЛР1-ЦФТП-RC» реализован процесс включения нагрузки активно-емкостного характера, а процесс выключения RL -нагрузки изучается посредством модели «ЛР1-ЦФТП-RL».

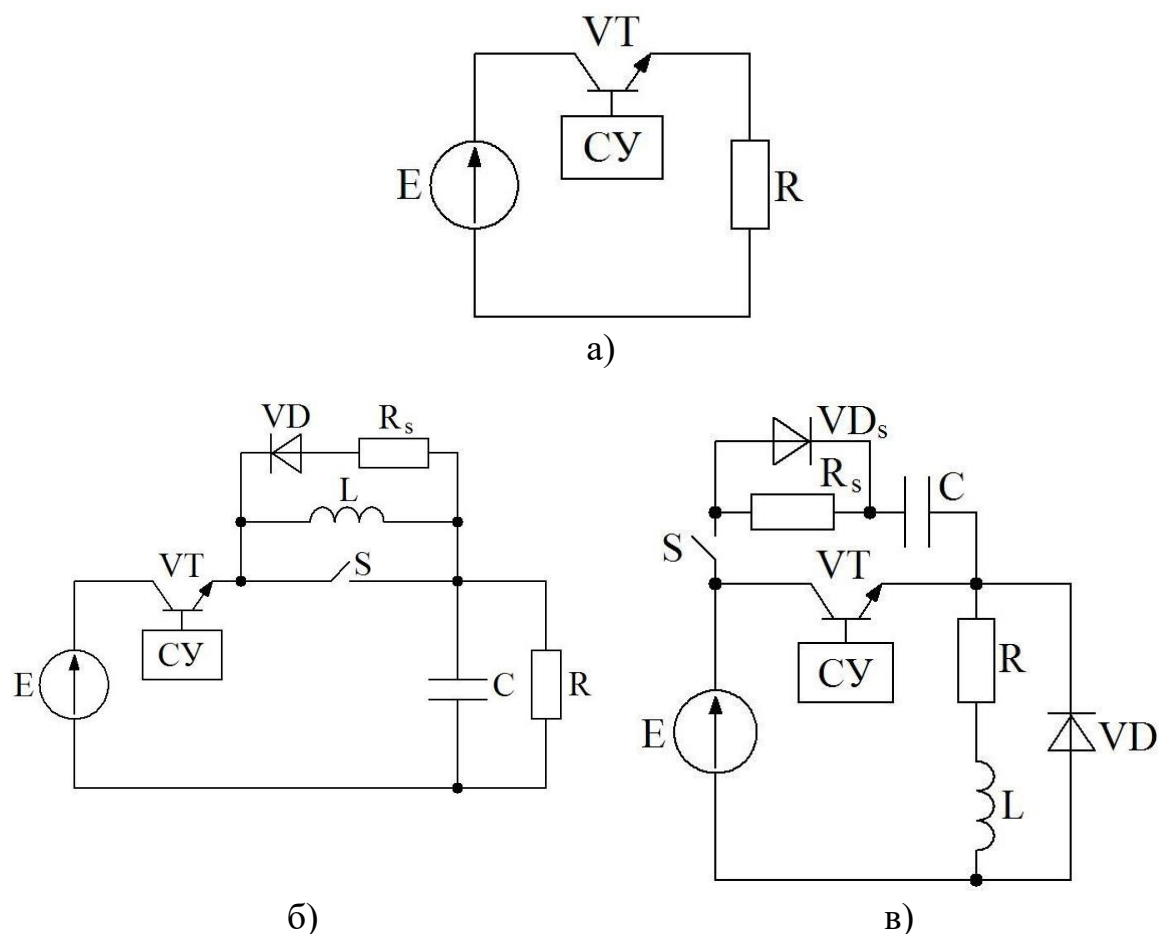


Рис. 1.1. Исследуемые схемы коммутации нагрузки:
а – схема 1; б – схема 2; в – схема 3

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА

[▲ К СПИСКУ ▲](#)

Для освоения теоретического материала следует повторить:

- законы коммутации;
- взаимосвязь токов и напряжений на резисторе, катушке индуктивности, конденсаторе;
- расчёт переходных процессов в электрических цепях;
- расчёт определённого интеграла.

Силовой транзистор (силовой электронный ключ), предназначенный для коммутации нагрузки в схемах постоянного тока, работает в двух режимах:

- **статический режим** работы соответствует включенному (проводящему) или выключенному состоянию транзистора;
- **динамический режим** работы соответствует переходу из включенного состояния в выключенное или наоборот, т.е. процессам включения / выключения (коммутации).

Во всех режимах в полупроводниковом ключе возникают потери, приводящие к нагреву полупроводниковой структуры прибора. Потери в статических режимах (статические) зависят от статической вольт-амперной характеристики (ВАХ) транзистора. Потери в динамических режимах (динамические или коммутационные) зависят от быстродействия прибора и характера нагрузки. Таким образом, изменение тока и напряжения на интервалах времени включения / выключения определяются типом нагрузки (активная, активно-индуктивная, активно-емкостная). Зависимость напряжения от тока ключа в динамических режимах называется траекторией переключения (динамической ВАХ), соответственно она тоже зависит от коммутируемой нагрузки.

Для анализа динамических режимов работы электронных ключей используются математические модели:

- на интервале **включения** $t = t_{ON}$ напряжение на ключе S принимается линейно убывающим:

$$u_S(t) = U_{S0} \left(1 - \frac{t}{t_{ON}} \right); \quad (1.1)$$

- на интервале **выключения** $t = t_{OFF}$ ток ключа S представляется линейно убывающей функцией:

$$i_S(t) = I_{S0} \left(1 - \frac{t}{t_{OFF}} \right). \quad (1.2)$$

В соответствии с принятыми математическими моделями вне зависимости от характера коммутируемой нагрузки для расчёта динамических потерь в силовом электронном ключе необходимо составить эквивалентные схемы:

- в процессе включения ключ заменяется источником линейно убывающего напряжения, и определяется ток ключа $i_S(t)$;
- в процессе выключения ключ заменяется источником линейно убывающего тока, и определяется напряжение на ключе $u_S(t)$.

По известным функциям изменения напряжения и тока находится мгновенная мощность на интервале переключения:

$$p(t) = u_S(t) \cdot i_S(t). \quad (1.3)$$

По мгновенной мощности $p(t)$ рассчитывается энергия, выделяющаяся на ключе в процессе коммутации:

- на интервале включения:

$$W_{ON} = \int_0^{t_{ON}} p_{ON}(t) dt; \quad (1.4)$$

- на интервале выключения:

$$W_{OFF} = \int_0^{t_{OFF}} p_{OFF}(t) dt. \quad (1.5)$$

Динамические потери при включении и выключении находятся как среднее за период коммутации (T) значение мощности, что соответствует отношению энергии, выделяющейся при переключении ключа к периоду:

$$P_D = P_{D.вкл} + P_{D.выкл} = \frac{1}{T}(W_{ON} + W_{OFF}). \quad (1.6)$$

Рассмотрим особенности коммутации различных типов нагрузки.

Для расчёта динамических потерь при включении и выключении активной нагрузки составляются эквивалентные схемы, на основе которых определяется ток ключа при включении и напряжение на ключе в процессе выключения (рис. 1.2). Мгновенная мощность на интервалах включения и выключения определяется как

$$\begin{aligned} p_{ON} &= u_S \cdot i_S = E \left(1 - \frac{t}{t_{ON}} \right) \cdot \frac{E}{R} \frac{t}{t_{ON}} = \\ &= \frac{E^2}{R \cdot t_{ON}} \left(t - \frac{t^2}{t_{ON}} \right); \end{aligned} \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned} p_{OFF} &= u_S \cdot i_S = E \frac{t}{t_{OFF}} \cdot \frac{E}{R} \left(1 - \frac{t}{t_{OFF}} \right) = \\ &= \frac{E^2}{R \cdot t_{OFF}} \left(t - \frac{t^2}{t_{OFF}} \right). \end{aligned} \quad (1.8)$$

Динамические потери при включении и выключении в этом случае:

$$P_{D.вкл} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{ON}} p_{ON}(t) \cdot dt = \frac{E^2 t_{ON}}{6RT}; \quad (1.9)$$

$$P_{D.выкл} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{OFF}} p_{OFF}(t) \cdot dt = \frac{E^2 t_{OFF}}{6RT}. \quad (1.10)$$

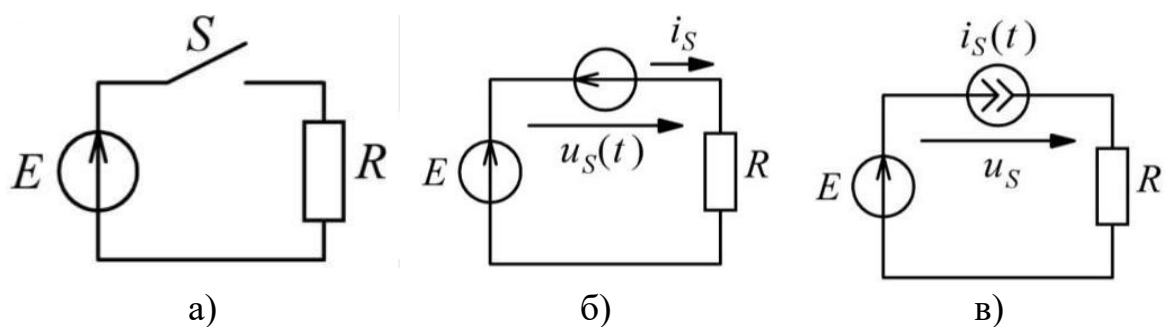


Рис. 1.2. Исходная (а) и эквивалентные схемы при коммутации R -нагрузки на интервале включения (б) и на интервале выключения (в)

Ток ключа в процессе включения и напряжение ключа при выключении R -нагрузки линейно возрастают, траектории переключения представляют собой линейные функции и совпадают для процессов включения и выключения (рис. 1.3).

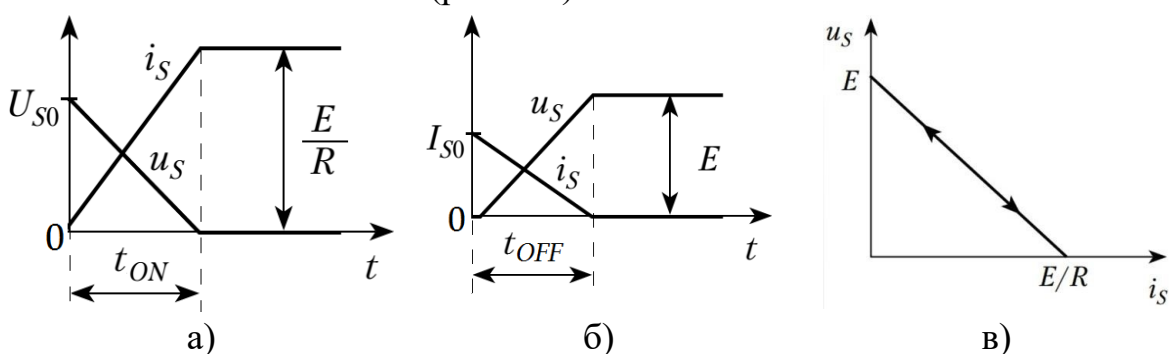


Рис. 1.3. Графики изменения напряжения и тока при включении (а) и выключении (б) и динамические ВАХ при коммутации R -нагрузки

Динамические потери прямо пропорциональны частоте коммутации ключа и зависят от быстродействия полупроводникового прибора.

В процессе включения активно-индуктивной нагрузки ток возрастает нелинейно и медленнее, чем в случае резистивной нагрузки. Однако в процессе выключения RL -нагрузки возникает опасность перенапряжения на электронном ключе, поскольку при снижении тока по закону электромагнитной индукции в катушке возникает ЭДС, препятствующая изменению тока, что приводит к скачкообразному росту напряжения на нагрузке, а следовательно и на ключе.

Эквивалентная схема для расчёта напряжения на ключе на интервале выключения при коммутации RL -нагрузки показана на рис. 1.4, а.

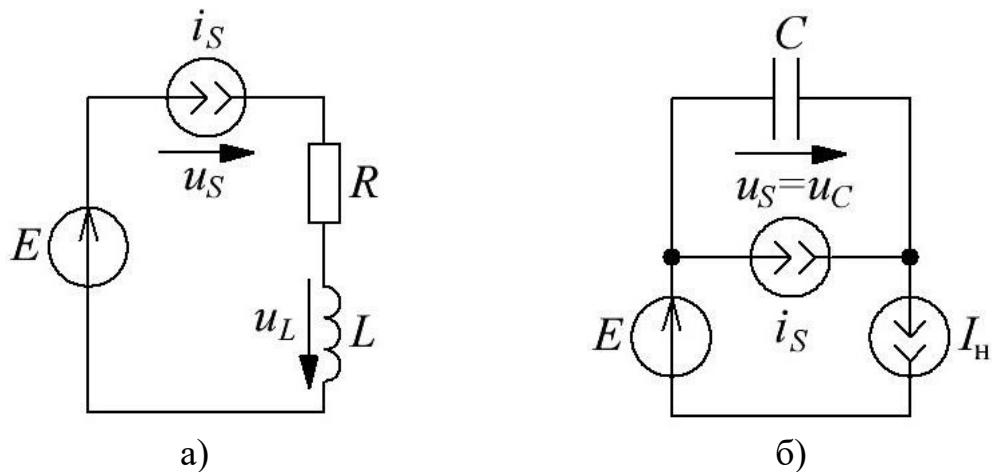


Рис. 1.4. Эквивалентные схемы при выключении RL -нагрузки:
а – без ЦФТП; б – при наличии ЦФТП (параллельного конденсатора)

Вследствие резкого увеличения напряжения на дросселе максимальное напряжение на ключе в этом случае превышает напряжение источника на величину ЭДС катушки (рис. 1.5, а):

$$\begin{aligned} u_S &= E - i_S R - u_L = E - i_S R - L \frac{di_S}{dt} = \\ &= E \frac{t}{t_{OFF}} + \frac{L}{t_{OFF}} \frac{E}{R} = E \frac{t}{t_{OFF}} + E_L. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Это приводит к значительному увеличению потерь по сравнению с потерями при выключении R -нагрузки. Кроме того, возникает опасность того, что напряжение на ключе превысит предельное значение напряжения, определяемое областью безопасной работы (ОБР) транзистора. Перенапряжение на ключе может привести к выходу транзистора из строя. Траектория выключения и общий вид ОБР показаны на рис. 1.5, б.

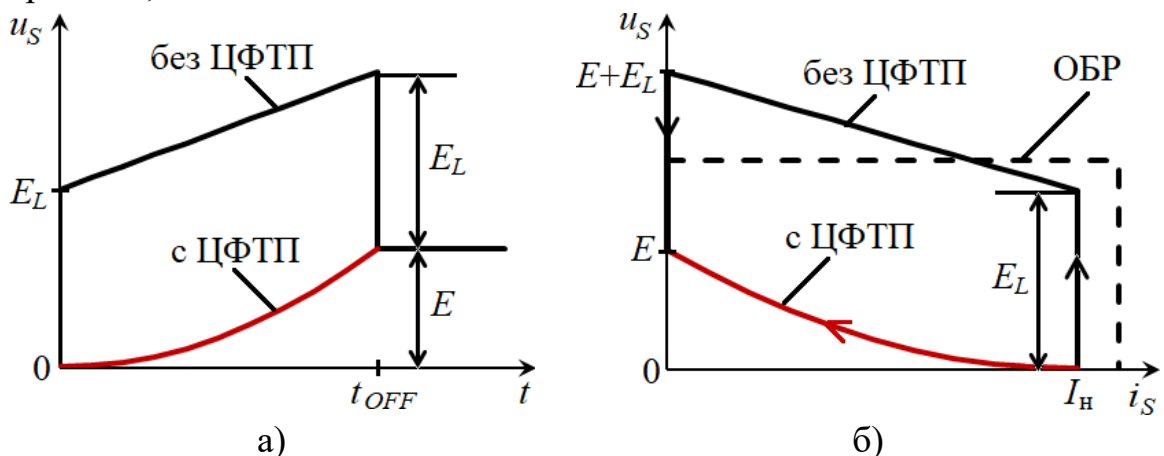


Рис. 1.5. Напряжения на ключе в процессе выключения RL -нагрузки (а) и соответствующие траектории переключения (б)

Чтобы исключить возможность перенапряжения и снизить потери необходимо изменить динамическую ВАХ ключа (траекторию его выключения) таким образом, чтобы она находилась в пределах границ ОБР. Эта задача решается посредством подключения к полупроводниковому ключу дополнительных элементов, позволяющих замедлить рост напряжения при выключении и ограничить его значение, – цепи формирования траектории переключения (ЦФТП).

Соответственно, основным элементом такой цепи в этом случае будет являться конденсатор, включенный параллельно полупроводниковому ключу (рис. 1.4, б). Тогда напряжение на ключе не будет изменяться скачком, конденсатор будет заряжаться под действием разности токов нагрузки и ключа (рис. 1.5, а):

$$u_S = u_C = \frac{1}{C} \int (I_H - i_S) dt = \frac{1}{C} \int I_H \frac{t}{t_{OFF}} dt = \frac{I_H}{C} \frac{t^2/2}{t_{OFF}}. \quad (1.12)$$

Динамическая ВАХ при использовании емкостной ЦФТП для RL -нагрузки становится сглаженной и соответствует ОБР (рис. 1.5, б).

В случае выключения активно-емкостной нагрузки напряжение на ключе плавно увеличивается по нелинейному закону, в соответствии с переходным процессом при замене транзистора эквивалентным источником линейно убывающего тока (изменение u_S в процессе выключения RC -нагрузки аналогично изменению тока при включении RL -нагрузки). Вследствие замедления роста напряжения из-за влияния конденсатора потери при выключении RC -нагрузки будут меньше по сравнению с потерями при коммутации R -нагрузки. Свойство конденсатора «препятствовать изменению напряжения» отрицательно сказывается в процессе включения, поскольку при снижении напряжения на ключе возрастает напряжение на конденсаторе, следовательно, возникает скачок тока (рис. 1.6, а). Ток ключа из-за резкого увеличения тока конденсатора будет превышать ток резистора, причем величина скачка прямо пропорциональна емкости и скорости включения транзистора (рис. 1.7, а):

$$\begin{aligned} i_S &= \frac{u_C}{R} + C \frac{du_C}{dt} = \frac{E - u_S}{R} + C \frac{d(E - u_S)}{dt} = \\ &= \frac{E}{R} \frac{t}{t_{ON}} + \frac{C}{t_{ON}} E = \frac{E}{R} \frac{t}{t_{ON}} + I_C. \end{aligned} \quad (1.13)$$

В результате потери значительно увеличиваются по сравнению с потерями при включении R -нагрузки, и возникает опасность выхода транзистора из строя по причине превышения предельного значения тока (если динамическая ВАХ не соответствует ОБР, как показано на рис. 1.7, б).

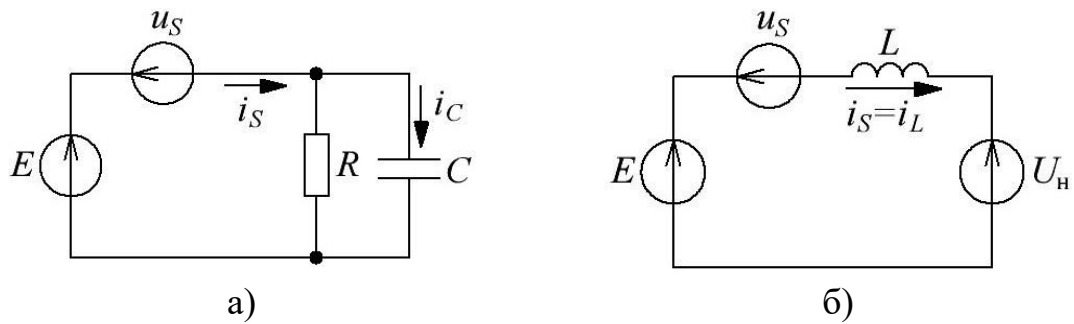


Рис. 1.6. Эквивалентные схемы при выключении RL -нагрузки:
а – без ЦФТП; б – при наличии ЦФТП (параллельного конденсатора)

Скорректировать траекторию включения позволяет использование в схеме коммутации RC -нагрузки ЦФТП в виде дросселя, включенного последовательно с электронным ключом (рис. 1.6, б). Наличие катушки исключает скачкообразное изменение тока, на интервале включения в дросселе будет накапливаться энергия под действием разности напряжения источника и суммарного напряжения на ключе и нагрузке (рис. 1.7, а):

$$i_S = i_L = \frac{1}{L} \int (E - U_H - u_S) dt = \frac{1}{L} \int (E - U_H) \frac{t}{t_{ON}} dt = \frac{E - U_H}{L} \frac{t^2}{2} \quad (1.14)$$

Траектория включения вследствие применения последовательного дросселя в качестве ЦФТП RC -нагрузки сглаживается (рис. 1.7, б).

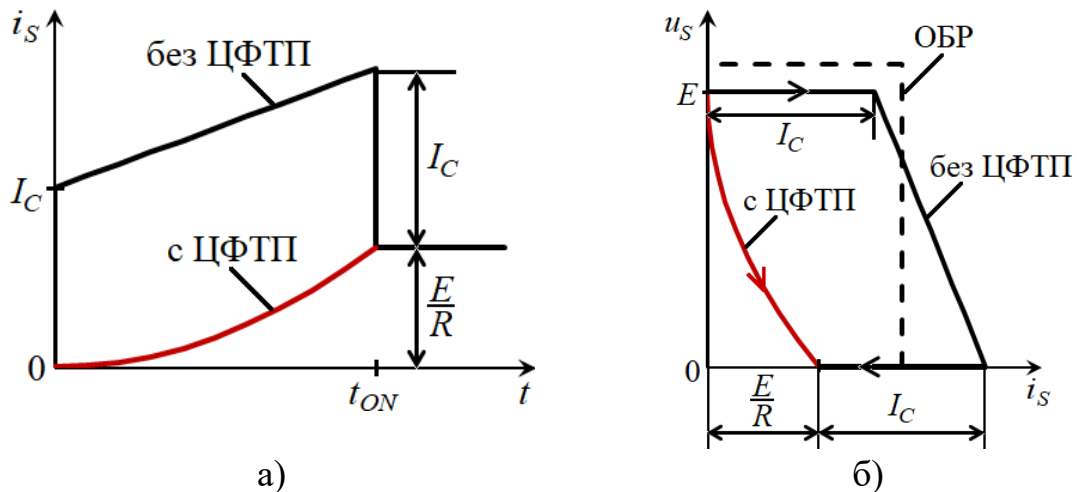


Рис. 1.7. Токи транзистора в процессе включения RC -нагрузки (а) и соответствующие динамические ВАХ (б)

ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ

 [К СПИСКУ](#) 

 При исследовании каждой схемы требуется ввести данные опыта и нажать кнопку «Пуск», расположенную на панели инструментов в окне модели (рис. ПЗ.1).

Рядом с исходными данными указаны размерности и диапазоны значений параметров. Время расчёта обычно не превышает 10 секунд. После окончания расчёта в специальном поле, расположенном в нижней части окна модели, появляется информационное сообщение «Конечное время достигнуто».

Напряжение источника во всех схемах рассчитывается в соответствии с номером бригады по формуле:

$$E = (100 + 10 \cdot N) [\text{В}], \quad (1.15)$$

где N – номер бригады.

Частота коммутации (переключения) составляет:

$$f_S = 5 \text{ кГц}. \quad (1.16)$$

А. Исследование процессов коммутации R -нагрузки

 Для проведения исследования необходимо открыть расчётную модель «ЛР1-ЦФТП-R». Для этого требуется запустить программу *SimInTech* и посредством команды «Открыть» выбрать файл из папки лабораторных работ ([МОДЕЛИ](#)). Либо можно просто открыть файл "ЛР1-ЦФТП-R.prt" в папке (двойным кликом ЛКМ).

1

Снять зависимости энергий, выделяющихся на транзисторе при включении (W_{ON}) и выключении (W_{OFF}), и соответствующих коммутационных потерь (P_{ON} и P_{OFF}) от времен включения (t_{ON}) и выключения (t_{OFF}) ключа при сопротивлении нагрузки $R = 10 \cdot N$ [Ом]:

$$W_{ON}, P_{ON} = f(t_{ON}); W_{OFF}, P_{OFF} = f(t_{OFF}).$$

- Результаты представить в виде таблицы.
- Для одного из опытов сохранить осциллограммы.

 Значения t_{ON} , t_{OFF} , E и R задаются в модели посредством соответствующих регуляторов (рис. П3.2), для этого необходимо нажать кнопку «Инициализация» и выставить нужные параметры, далее требуется нажать «Стоп», после этого можно запускать расчёт модели при помощи кнопки «Пуск» (рис. П3.1).

Результаты расчёта энергии W_{OFF} [мДж] и мощности P_{OFF} [Вт], а также W_{ON} и P_{ON} отображаются на выходе блока (субмодели) «Расчёт потерь».

Осциллограммы отображаются при открытии блока «Осциллограммы», на который выведены напряжение на транзисторе, ток транзистора и мгновенная мощность.

2

Снять зависимости энергий W_{ON} , W_{OFF} и мощностей P_{ON} , P_{OFF} от сопротивления нагрузки R при заданных значениях времен переключения:

- 1) $t_{ON} = 10$ мкс, $t_{OFF} = 20$ мкс для нечётных N ;
- 2) $t_{ON} = 25$ мкс, $t_{OFF} = 15$ мкс для чётных N .

- **Результаты внести в таблицу.**
- **Сохранить осциллограммы для одного случая.**

 Используя полученные данные построить зависимости энергий, выделяющихся при коммутации, и динамических потерь (см. рекомендации в разделе Приложение 2) – всего **4 графика**:

- 1) $W_{ON} = f(t_{ON})$, $W_{OFF} = f(t_{OFF})$ – на одних осях координат;
- 2) $P_{ON} = f(t_{ON})$, $P_{OFF} = f(t_{OFF})$ – на втором графике;
- 3) W_{ON} , $W_{OFF} = f(R)$;
- 4) P_{ON} , $P_{OFF} = f(R)$.

Провести анализ полученных графиков, **сформулировать выводы** о влиянии нагрузки на величину динамических потерь в транзисторе, а также о зависимости потерь от быстродействия ключа.

Б. Исследование процессов коммутации RC-нагрузки

 Необходимо открыть расчётную модель «ЛР1-ЦФТП-РС» и развернуть окно открывшейся модели ([МОДЕЛИ](#)).

3

Для схемы без ЦФТП снять зависимости W_{ON} , P_{ON} и W_{OFF} , P_{OFF} , а также скачка тока транзистора в момент включения (I_0) от ёмкости конденсатора (C) при заданном значении времени включения:

- $t_{ON} = 20$ мкс для нечётных N ;
- $t_{ON} = 15$ мкс для чётных N .

Значение I_0 определяется по осциллограмме.

- Результаты представить в виде таблиц.
- Для одного из опытов сохранить осциллограммы.

 Значения E , t_{ON} ($t_{OFF} = t_{ON}$) и C задаются в модели посредством соответствующих регуляторов (рис. [П3.3](#)).

Отсутствию ЦФТП в схеме соответствует замкнутое состояние ключа S (на его управляющий вход подается «1», значение задается в свойствах блока «k»).

На осциллограммах отображаются напряжения на транзисторе и нагрузке, токи транзистора, конденсатора и диода снабберной цепи, а также мгновенная мощность.

4

Для схемы без ЦФТП снять зависимости энергий, мощностей и скачка тока транзистора в момент включения от длительностей процессов переключения при заданном значении ёмкости $C = N + 1$ [мкФ]:

$$W_{ON}, P_{ON}, I_0 = f(t_{ON}); W_{OFF}, P_{OFF} = f(t_{OFF}).$$

- Результаты представить в виде таблиц.
- Сохранить осциллограммы для одного случая.

5

Для схемы с ЦФТП выполнить моделирование при заданном t_{ON} (см. п. 3) для трёх значений ёмкости ($C = 1, N + 1, 10$ мкФ) и трёх значений индуктивности снаббера: $L_s = 5, 10, 20$ мкГн – всего 9 опытов.

Измеренные значения W_{ON} , P_{ON} и W_{OFF} , P_{OFF} представить в виде соответствующих таблиц.

 Значение L_s задается в модели как параметр элемента.

Наличию ЦФТП в схеме соответствует *разомкнутое состояние ключа S* (на управляющий вход подаётся «0») (рис. П3.2).

Сохранить осциллограммы для трёх случаев: для двух из трёх значений L_s при ёмкости $C = N + 1$ и для одного из выбранных значений индуктивности при большей или меньшей ёмкости ($C = 1$ мкФ – для нечётных N , $C = 10$ мкФ – для чётных N).

 По результатам измерений построить зависимости энергий, динамических потерь и скачков тока транзистора при включении – всего **5 графиков**:

- 1) $I_0 = f(C)$ по данным п. 3;
- 2) $I_0 = f(t_{ON})$ по данным п. 4;
- 3) $P_{ON} = f(t_{ON})$, $P_{OFF} = f(t_{OFF})$ по данным п. 4 – на одной координатной плоскости;
- 4) $W_{ON}, W_{OFF} = f(C)$ по данным п. 4 и по данным п. 5 (для одного из трёх значений L_s) – всего четыре зависимости на одном графике;
- 5) $P_{ON}, P_{OFF} = f(L_s)$ по данным п. 5 (для $C = N + 1$ и $C = 1$ мкФ для нечётных N , $C = 10$ мкФ для чётных N) – совместить четыре зависимости.

Проанализировать построенные зависимости и **сформулировать выводы** о влиянии ёмкости нагрузки и индуктивности ЦФТП на процессы включения и выключения активно-ёмкостной нагрузки и величину коммутационных потерь.

В. Исследование процессов коммутации RL -нагрузки

 Для проведения исследования необходимо открыть расчётную модель «LP1-ЦФТП-RL» и развернуть окно открывшейся модели (**МОДЕЛИ**).

6

Для схемы без ЦФТП и отсутствии диода VD (рис. 1.1, в) снять зависимости W_{ON} , P_{ON} и W_{OFF} , P_{OFF} , а также скачка напряжения на транзисторе в момент выключения (U_0) от индуктивности дросселя (L) при заданном значении времени выключения:

- $t_{ON} = 10$ мкс для нечётных N ;
- $t_{ON} = 15$ мкс для чётных N .

Сформировать таблицы результатов и сохранить осциллограммы для одного опыта.

 Значения E , t_{OFF} ($t_{ON} = t_{OFF}$) и L задаются в модели посредством соответствующих регуляторов (рис. ПЗ.4).

Отсутствию ЦФТП в схеме соответствует *разомкнутое состояние* ключа S (на управляющий вход подаётся «0»), а **отсутствие диода** обеспечивается посредством *размыкания последовательного ключа S_{VD}* (на его управляющий вход подается «0») (рис. ПЗ.4).

В блоках «Осциллограммы», отображаются токи транзистора и нагрузки, напряжения на транзисторе и конденсаторе, токи и напряжения на диодах. Величина скачка напряжения определяется по соответствующей осциллограмме.

7

Для схемы без ЦФТП и отсутствии диода снять зависимости энергий, мощностей и скачка напряжения на транзисторе в момент выключения от длительности процесса выключения при заданном значении индуктивности $L = 0,2 + 0,05 \cdot N$ [мГн]:

$$W_{OFF}, P_{OFF} = f(t_{OFF}); U_0 = f(t_{OFF}); W_{ON}, P_{ON} = f(t_{ON}).$$

- **Результаты записать в таблицы.**
- **Сохранить осциллограммы для одного случая.**

8

Для схемы без ЦФТП при наличии диода снять зависимости при том же значении L (см. п. 7):

$$W_{ON}, P_{ON} = f(t_{ON}), \text{ а также } W_{OFF}, P_{OFF}, U_0 = f(t_{OFF}).$$

- **Записать результаты в таблицы.**
- **Сохранить осциллограммы для одного случая.**

 Наличие диода обеспечивается посредством замыкания последовательного ключа S_{VD} (на его управляющий вход подается «1»).

9

Для схемы с подключенной ЦФТП и диодом выполнить моделирование при заданном t_{OFF} (см. п. 6) для трёх значений ёмкости снаббера ($C_s = 0,05; 0,1$ и $0,3$ мкФ) и двух значений индуктивности нагрузки:

- 1) $L_1 = (0,2 + 0,05 \cdot N)$ мГн;
- 2) $L_2 = 0,2$ мГн - для $N \geq 5$; $L_2 = 0,7$ мГн - для $N \leq 4$.

Всего необходимо выполнить **шесть** опытов.

- **Измеренные значения W_{OFF}, P_{OFF} и W_{ON}, P_{ON} представить в виде соответствующих таблиц.**

 Значение ёмкости C_s задаётся в модели как параметр элемента в модели. Наличие ЦФТП соответствует *замкнутое состояние ключа S (на управляющий вход подается «1»)*.

- **Сохранить осциллограммы для трёх случаев:** для двух из трёх значений C_s при индуктивности L_1 и для одного из выбранных значений ёмкости при индуктивности L_2 .

10

Выполнить моделирование схемы при тех же параметрах, что и в п. 9, но для **схемы с ЦФТП без диода** (на управляющий вход ключа " S_VD " подается «0»).

- **Записать результаты измерений** W_{OFF}, P_{OFF} и W_{ON}, P_{ON} (таблицы значений).
- **Сохранить осциллограммы для трёх случаев:** при тех же значениях L и C_s , при которых снимались осциллограммы в п. 9.

 По результатам измерений построить зависимости энергий, динамических потерь и скачка напряжения на транзисторе в момент выключения – всего **5 графиков**:

- 1) $U_0 = f(L)$ по данным п.6;
- 2) $U_0 = f(t_{OFF})$ по данным п.7 и по данным п.8 – совместить две зависимости;
- 3) $P_{OFF} = f(t_{OFF}), P_{ON} = f(t_{ON})$ по данным п.7 и по данным п.8 – на одной координатной плоскости;
- 4) $W_{OFF}, W_{ON} = f(L)$ по данным п.6, п.9, п.10 (для одного из трёх значений C_s) – всего шесть зависимостей на одном графике;
- 5) $P_{OFF} = f(C_s)$ по данным п.9, п.10 (для L_1 и L_2 – совместить четыре зависимости).

Проанализировать полученные зависимости и **сформулировать выводы** о влиянии индуктивности нагрузки и параллельного диода, а также ёмкости снабберного конденсатора на динамические процессы в цепи с активно-индуктивной нагрузкой и величину динамических потерь.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

 [К СПИСКУ](#) 

 Вопросы и задания разделены на два блока.

БЛОК А содержит базовые вопросы и задания, **требующие мгновенного ответа**. Без понимания и знаний ответов на эти задачи считается, что не возможно в достаточной степени усвоить теоретический материал по теме лабораторной работы, а также невозможно осуществить правильный анализ полученных графиков и зависимостей, полученных в результате обработки данных и составления отчета. При правильном ответе на вопрос/задание из **БЛОКА А**, студент допускается к **БЛОКУ Б**.

БЛОК Б содержит вопросы и задания, которые подразумевают объяснение теоретического материала, анализа и объяснения полученных результатов и требуют использование отчета. Допускается давать некоторое время для подготовки.

БЛОК А

1. Что такое идеальный ключ? Приведите и объясните его вольт-амперную характеристику (ВАХ).
2. Перечислите преимущества и недостатки полупроводникового и электромеханического ключей.
3. Перечислите основные типы силовых полупроводниковых ключей, объясните их различия. Приведите их идеальные ВАХ.
4. Что такое статические и динамические потери в транзисторе?
5. Замените ключ по заданной преподавателем статической ВАХ.
6. Какие модели транзистора используются при включении и выключении в аналитическом и графическом виде?
7. Расскажите алгоритм для расчёта статических потерь.
8. Расскажите алгоритм для расчёта динамических потерь.
9. Как связаны между собой ток и напряжение на резисторе, дросселе и на конденсаторе?
10. Что показывает траектория переключения (динамическая ВАХ) ключа?
11. Что такое область безопасной работы транзистора (ОБР)?
12. Зачем подключается ЦФТП в схеме с активно-емкостной нагрузкой?
13. Зачем подключается ЦФТП в схеме с активно-индуктивной нагрузкой?
14. В чем различие понятий энергия и мощность? Как найти энергию аналитическим и графическим способом при заданной мгновенной мощности?
15. С какой целью подключается диод V_D на схеме **1.1**, в? Поясните, почему диод открывается в момент выключения ключа.

БЛОК Б

1. Объясните принцип работы схемы 1.1, б (для чего нужен каждый из элементов ЦФТП – дроссель, вспомогательное сопротивление и диод).
2. Объясните принцип работы схемы 1.1, в (для чего нужен каждый из элементов ЦФТП - конденсатор, вспомогательное сопротивление и диод).
3. Рассчитайте энергию по заданной преподавателем диаграмме мгновенной мощности.
4. Объясните зависимости энергии W и мощности P от времени включения и выключения и от сопротивления нагрузке в схеме с R -нагрузкой.
5. Объясните графики для схемы коммутации RC -нагрузки без ЦФТП.
6. Объясните графики для схемы коммутации RL -нагрузки без ЦФТП.
7. Проанализируйте как влияет время включения/выключения ключа на динамические потери для трех видов схем.
8. Объясните влияние параметров ЦФТП (L_s и C_s) на изменение процессов (токов и напряжений на ключе).
9. Проанализируйте полученные графики в лабораторной работе, покажите достоинства и недостатки ЦФТП.
10. Какие используются допущения при расчёте динамических потерь? Поясните их необходимость.
11. Другие вопросы на усмотрение преподавателя, ведущего занятия.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Импульсные регуляторы постоянного тока



В лабораторной работе рассматривается принцип регулирования выходного напряжения в базовых схемах импульсных регуляторов постоянного тока – понижающем, повышающем и инвертирующем.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

Цель работы – исследовать принцип работы регуляторов постоянного тока и их основные характеристики. Исследовать принцип работы широтно-импульсной модуляции и обратной связи в системе управления.

Исследуемые схемы показаны на рис. 2.1. Управление транзисторными ключами, обеспечивающее регулирование напряжения на нагрузке, осуществляется методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) – изменение ширины импульсов управления по требуемому закону, при этом импульсы формируются в результате сравнения высокочастотного несущего сигнала с управляющим сигналом. Импульсы управления транзисторами поступают от системы управления (СУ) с частотой f и скважностью q ($q = T/t_{\text{вкл}}$, $T = 1/f$ – период коммутации, $t_{\text{вкл}}$ – время включенного состояния транзистора).

Работа выполняется в программе *SimInTech*, в которой осуществляется моделирование исследуемых схем. Модели регуляторов собраны из стандартных элементов библиотеки «ЭЦ – Динамика», измеряемые напряжения и токи элементов исследуемых схем выводятся в виде осциллограмм. При моделировании используются транзисторы и диоды с идеальными вольт-амперными характеристиками: в открытом состоянии приборы имеют нулевое сопротивление, а в закрытом – нулевую проводимость. В схемах регуляторов учитывается внутреннее сопротивление источника.

Список исследуемых моделей:

- «ЛР2-ПОНрег» – "*models/ЛР2-ПОНрег.prt*" - рис. П3.5;
- «ЛР2-ПОНрег_ОС» – "*models/ЛР2-ПОНрег_ОС.prt*" - рис. П3.6;
- «ЛР2=ПОВрег» – "*models/ЛР2-ПОВрег.prt*" - рис. П3.7;
- «ЛР2-ИНВрег» – "*models/ЛР2-ИНВрег.prt*" - рис. П3.8;

Дополнительно модели размещены внутри данного файла *pdf*-файла (в "*SumatraPDF*" выберите Вид - Показывать закладки (или нажмите F12)).

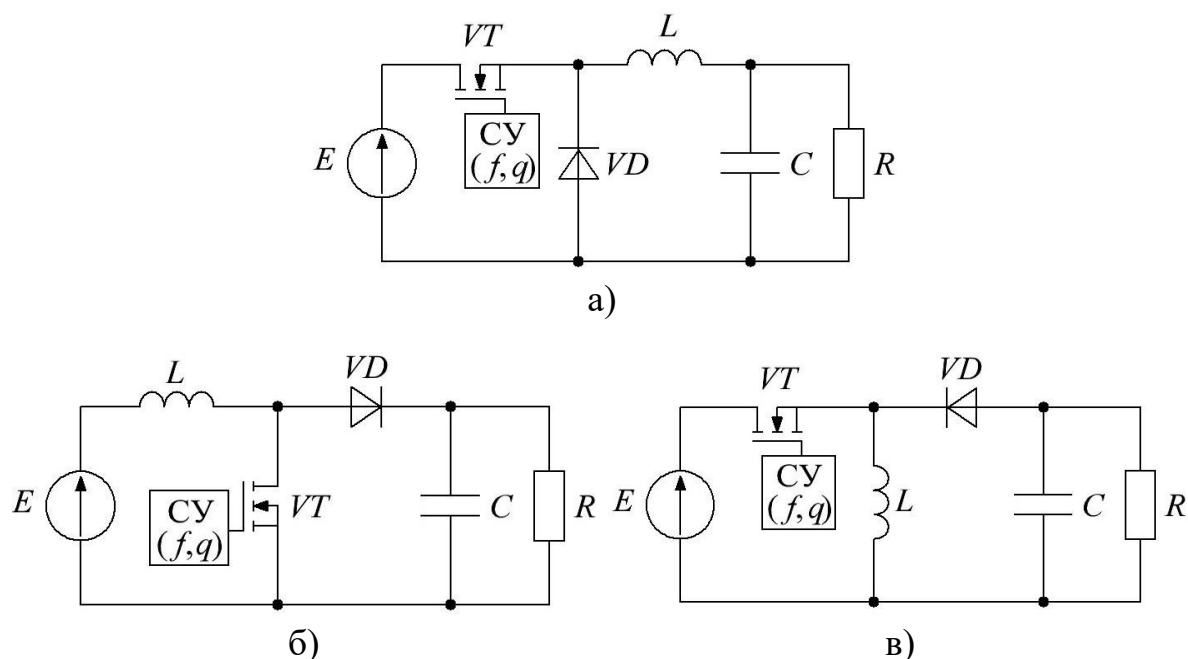


Рис. 2.1. Базовые схемы (топологии) импульсных регуляторов:
а – понижающий; б – повышающий; в – инвертирующий

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА

[К СПИСКУ](#)

 Для освоения теоретического материала следует повторить:

- законы коммутации;
- взаимосвязь токов и напряжений на резисторе, катушке индуктивности, конденсаторе;
- расчёт переходных процессов в электрических цепях;
- идеализированные модели полупроводниковых ключей;
- расчёт определённого интеграла.

Регуляторы постоянного тока предназначены для регулирования напряжения или поддержания его неизменным (стабилизации напряжения) в различных электротехнических устройствах, содержащих электрические схемы постоянного тока. Принцип действия импульсных регуляторов основан на периодическом подключении цепи нагрузки к источнику постоянного напряжения посредством транзисторного ключа. В таких регуляторах среднее за период значение выходного напряжения (постоянная составляющая напряжения на нагрузке) зависит от параметра работы транзистора – *коэффициента заполнения*:

$$\gamma = \frac{t_{\text{вкл}}}{T_S}, \quad (2.1)$$

где $t_{\text{вкл}}$ – время включённого состояния транзистора, T_S – период переключения. За счёт изменения этих параметров управления транзистором возможно изменять γ и регулировать средний уровень напряжения на выходе схемы ($U_{\text{вых}}$).

Для анализа работы схем используют идеальную модель транзистора, который принимает два состояния: включенное и выключенное. При включенном состоянии транзистор заменяется на «закоротку», при выключенном – на «разрыв» (повторение материала). Для управления транзистором на его управляющий вывод подаётся импульсный сигнал управления (рис. 2.2), имеющий два уровня: «1» – транзистор включён; «0» – транзистор выключен.

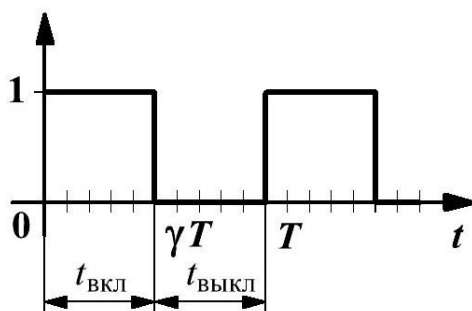


Рис. 2.2. Сигнал управления транзистором

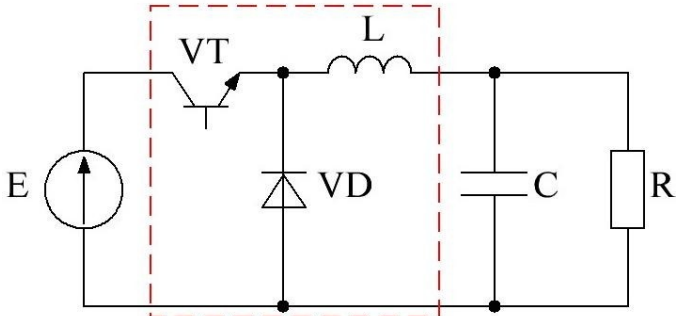
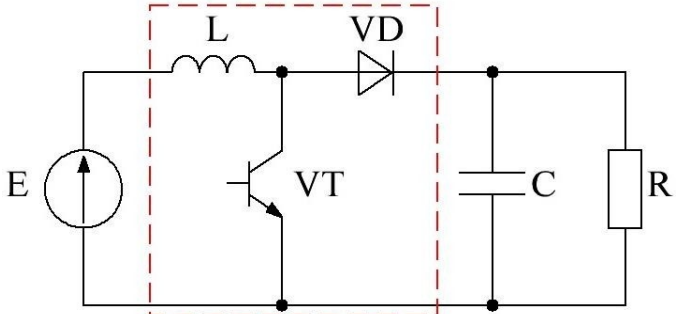
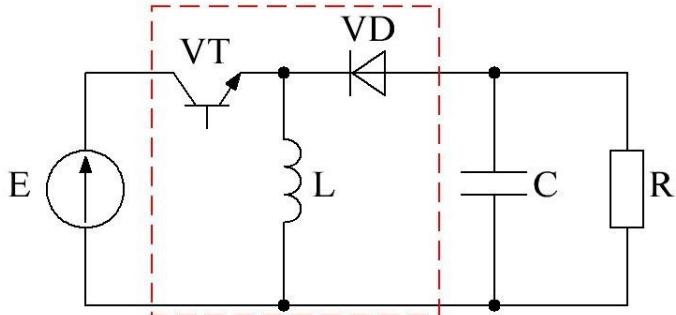
Сигнал управления характеризуется периодом T_S и длительностью импульсов $t_{\text{вкл}}$, от соотношения которых зависят значения параметров управления: коэффициент заполнения γ варьируется в диапазоне $(0 \dots 1)$, а обратная величина – скважность $q = 1/\gamma$, соответственно, теоретически может изменяться в диапазоне $(1 \dots \infty)$.

В таблице 2.1 представлены три базовые схемы импульсных регуляторов и формулы для определения постоянной составляющей выходного напряжения (на нагрузке) $U_{\text{н}}$, которое зависит от коэффициенту заполнения и входного напряжения (источника) E .

Понижающий регулятор позволяет уменьшить уровень напряжения относительно напряжения источника. Дроссель и конденсатор образуют LC -фильтр, обеспечивающий сглаживание формы выходного напряжения. Диод необходим для создания контура протекания тока катушки при выключении транзистора.

Повышающий регулятор позволяет получить на нагрузке больший уровень напряжения, чем на источнике, что обеспечивается за счёт накопления энергии в дросселе на интервале включённого состояния транзистора. В результате при отключении транзистора к нагрузке прикладывается напряжение, которое складывается из напряжения источника и дросселя. Диод в данной схеме не позволяет конденсатору разрядиться при включённом транзисторе.

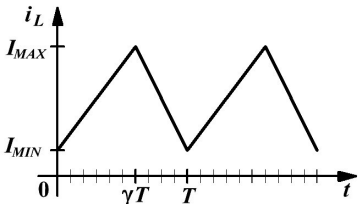
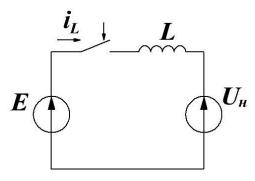
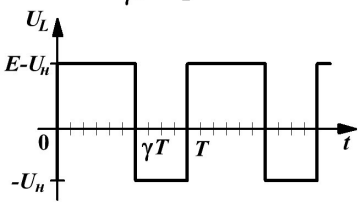
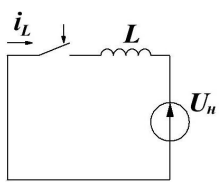
Таблица 2.1. Базовые схемы регуляторов постоянного тока

Понижающий (схема с последовательным ключом)		
		$U_{\text{вых}} = U_{\text{н}} = E\gamma$
Повышающий (схема с параллельным ключом)		
		$U_{\text{вых}} = U_{\text{н}} = \frac{E}{1-\gamma}$
Инвертирующий (схема с последовательным ключом и параллельным дросселем)		
		$U_{\text{вых}} = U_{\text{н}} = E \cdot \frac{\gamma}{1-\gamma}$

В инвертирующем регуляторе выходное напряжение может быть как ниже входного, так и выше него (в зависимости от значения коэффициента заполнения), но в любом случае напряжение на нагрузке имеет противоположную полярность относительно источника. В данной схеме дроссель выполняет функцию промежуточного накопителя энергии, накапливая энергию при включенном транзисторе и отдавая её в нагрузку на интервале выключенного состояния транзистора. Диод блокирует передачу энергии в нагрузку от источника, когда транзистор открыт (находится в проводящем состоянии).

Для анализа работы импульсных регуляторов используются эквивалентные схемы, соответствующие интервалам работы транзистора. При этом делается допущение о бесконечно большой ёмкости конденсатора, т.е. выходное напряжение считается неизменным (не содержит колебаний). В этом случае конденсатор с параллельным резистором (нагрузкой) заменяется на эквивалентный источник напряжения равный постоянной составляющей U_H . В таблице 2.2 представлены эквивалентные схемы, а также форма тока и напряжения на дросселе для понижающего регулятора.

Таблица 2.2. Базовые схемы регуляторов постоянного тока

VT включен (открыт): $0 \leq t \leq \gamma T$		
	$i_L = \frac{E - U_H}{L} \cdot t + I_{\text{MIN}}$	
VT выключен (закрыт): $0 \leq t \leq (1 - \gamma)T$		
	$i_L = -\frac{U_H}{L} \cdot t + I_{\text{MAX}}$	

Во всех схемах регуляторов на интервале включенного состояния транзистора (и выключенного состояния диода) в катушке (дросселе) накапливается энергия, т.е. ток i_L возрастает. На втором интервале периода (при закрытом транзисторе и открытом диоде) ток дросселя убывает. В установившемся режиме работы минимальное и максимальное значения тока катушки одинаковы на каждом периоде переключения транзистора, что соответствует отсутствию постоянной составляющей напряжения на дросселе:

$$U_{L.\text{cp}} = 0. \quad (2.2)$$

Используя это условие, можно получить приведенные выше зависимости $U_{\text{вых}}(\gamma)$.

В зависимости от минимального значения тока дросселя различают следующие режимы работы импульсных регуляторов:

- режим непрерывного тока катушки ($I_{L\text{MIN}} > 0$);
- режим прерывистого тока катушки ($I_{L\text{MIN}} = 0$ в течение части периода);
- граничный режим (i_L достигает нуля в конце периода).

Вследствие ключевого режима работы транзистора выходное напряжение в схемах импульсных регуляторов не может быть идеально сглаженным (ёмкость конденсатора является конечной), его можно представить как сумму постоянной и переменной составляющих:

$$u_{\text{вых}}(t) = U_{\text{cp}} + u_{\text{пер}}. \quad (2.3)$$

Постоянная составляющая – это среднее значение функции $u_{\text{вых}}(t)$:

$$U_{\text{cp}} = U_{\text{вых}} = \frac{1}{T} \int_0^{T_s} u_{\text{вых}}(t) dt. \quad (2.4)$$

Переменная составляющая характеризуется величиной пульсации напряжения:

$$\Delta U_{\text{н}} = \Delta U_{\text{вых}} = U_{\text{MAX}} - U_{\text{MIN}}. \quad (2.5)$$

Конденсатор, включенный параллельно нагрузке, уменьшает переменную составляющую напряжения, что позволяет обеспечить требуемый уровень пульсации напряжения на нагрузке. Чем больше ёмкость конденсатора, тем ниже уровень пульсации напряжения. В установившемся режиме работы схемы регулятора минимальное и максимальное значения напряжения на конденсаторе одинаковы на каждом периоде переключения транзистора, что соответствует отсутствию постоянной составляющей тока конденсатора:

$$I_{C.\text{cp}} = 0. \quad (2.6)$$

Особенности работы схем импульсных регуляторов проявляются в различии их основных характеристик – регулировочной и нагрузочной. **Регулировочная характеристика** отражает зависимость среднего значения напряжения на нагрузке от коэффициента заполнения: $U_{\text{н}}(\gamma)$. **Нагрузочная характеристика** демонстрирует влияние мощности (тока) нагрузки на среднее значение выходного напряжения. Так, в схеме понижающего регулятора на идеальных элементах (без учёта потерь) регулировочная характеристика соответствует функции $U_{\text{н}} = \gamma \cdot E$, а нагрузочная определяется условием $U_{\text{н}} = \text{const}$. В реальных схемах вследствие «неидеальности» элементов выходное напряжение становится меньше теоретического значения. Эквивалентную величину внутренних сопротивлений элементов, определяющих потери, можно оценить по наклону нагрузочной характеристики.

Как было отмечено ранее, регулирование выходного напряжения за счёт изменения коэффициента заполнения реализуется с использованием ШИМ. При таком способе управления частота переключения транзистора (период) остаётся постоянным, а длительность импульсов управления (ширина импульсов) может меняться. Частота импульсов задаётся несущим сигналом пилообразной (треугольной) формы $u_{\text{п}}$, а ширина зависит от уровня управляющего (модулирующего) сигнала $u_{\text{м}}$, который сравнивается с несущим (рис. 2.3):

- при $u_m \geq u_{\pi}$ $S = \langle 1 \rangle$ (высокий уровень сигнала), транзистор включён;
- при $u_m < u_{\pi}$ $S = \langle 0 \rangle$ (нулевой уровень сигнала), транзистор выключен.

Таким образом, увеличение сигнала u_m приводит к повышению коэффициента заполнения (увеличивается $t_{\text{вкл}}$), а уменьшение – наоборот.

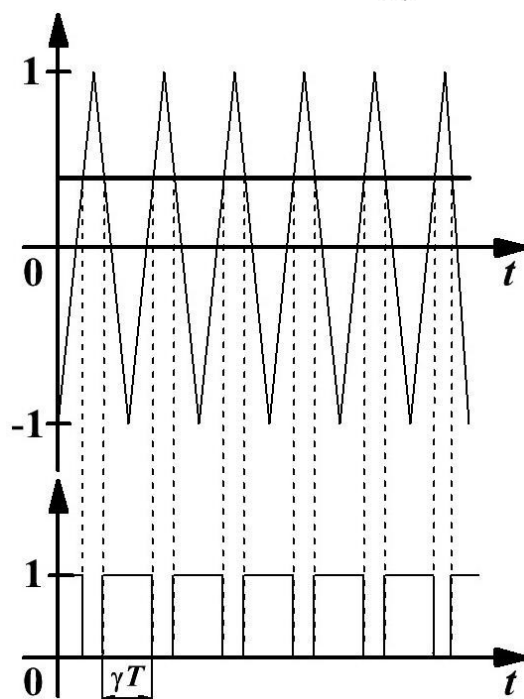


Рис. 2.3. Принцип работы широтно-импульсной модуляции

На рисунке 2.4 представлена структура системы управления с обратной связью по напряжению, что позволяет улучшить качество регулирования и стабилизации выходного напряжения при влиянии внешних условий, таких как изменение входного напряжения или мощности нагрузки.

Для реализации обратной связи измеренное каким-либо датчиком и усредненное напряжение на нагрузке (U_n) сравнивается с требуемым значением – вычитается из сигнала задания ($U_{\text{зад}}$). Полученный сигнал ошибки ε поступает на пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор (k_p , k_i – коэффициенты усиления пропорционального и интегрального звена, соответственно). ПИ-регулятор обеспечивает высокую точность и скорость регулирования напряжения. Формируемый регулятором управляющий сигнал u_m позволяет изменять напряжение на нагрузке до требуемого значения, в результате чего отклонение ε на входе ПИ-регулятора становится равным нулю. Генератор тактовых импульсов (ГТИ) задаёт частоту модуляции, а генератор пилообразного напряжения (ГПН) формирует несущий сигнал u_n , который вместе с регулирующим сигналом u_m поступает на компаратор КОМП (сравнивающее устройство) для формирования импульсов управления транзистором. Выбор коэффициентов регулирования является достаточно сложной оптимизационной задачей. Неверный выбор коэффициентов приводит к нарушению устойчивости системы.

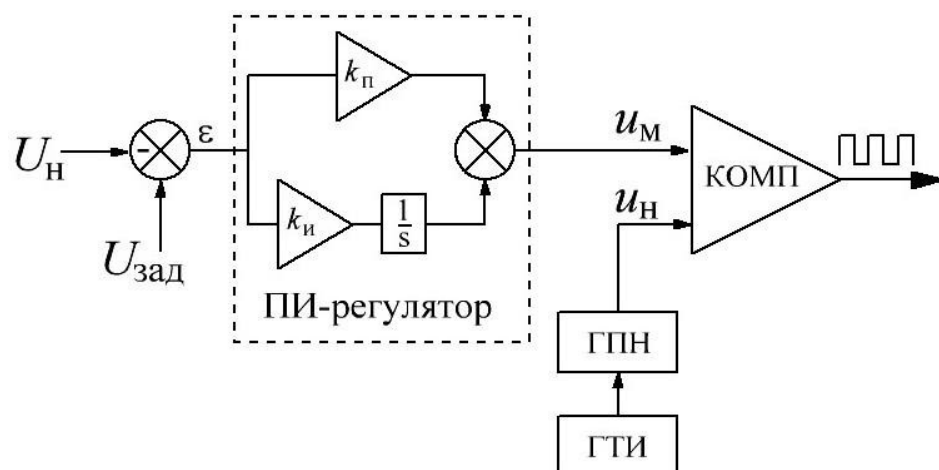


Рис. 2.4. Структурная схема системы управления

ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ

 [К СПИСКУ](#) 

А. Исследование понижающего импульсного регулятора в режиме непрерывного тока дросселя

 При исследовании каждой схемы требуется ввести данные опыта и нажать кнопку «Пуск», расположенную на панели инструментов в окне модели (рис. ПЗ.1).

Рядом с исходными данными указаны размерности и диапазоны значений параметров. Время расчета обычно не превышает 10 сек. После окончания расчета в специальном поле, расположенном в нижней части окна модели, появляется информационное сообщение «Конечное время достигнуто».

 Для проведения исследования необходимо открыть файл «ЛР2-ОНрег». Для этого требуется запустить программу *SimInTech* и посредством команды «Открыть» выбрать файл из папки лабораторных работ (МОДЕЛИ). Либо можно просто открыть файл «ЛР2-ПОНрег.prt» в папке (двойным кликом ЛКМ).

1

Моделирование регулятора проводится при напряжении источника $E = 45 + 5 \cdot N$ (В), коэффициенте заполнения $G = (0,3 + 0,05 \cdot N)$, частоте коммутации транзистора $F = 20$ кГц, сопротивлении нагрузки $R = 10$ Ом и сопротивлении источника r , значение которого указано в табл. 2.3, где N – номер варианта, для нескольких значений индуктивности и ёмкости:

1. $C = 5$ мкФ

2. $L = 2$ мГн

а) $L = 0,5$ мГн

а) $C = 2$ мкФ

б) $L = 2$ мГн

б) $C = 10$ мкФ

Таблица 2.3. Выбор сопротивления источника по номеру варианта N

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r , Ом	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1



- Значения G , L и R задаются в модели посредством соответствующих регуляторов, для этого необходимо нажать кнопку «Инициализация» и выставить нужные параметры, далее требуется нажать «Стоп» (рис. П3.1).
- Значения r и C задаются в модели как параметры элементов, а значения E и F – в свойствах блоков «ЭДС» и «частота» (необходимая константа прописывается в столбце «Значение»).
- Запуск расчета модели осуществляется при помощи кнопки «Пуск» (рис. П3.1).
- Результаты расчета постоянной составляющей (среднего за период значения) выходного напряжения регулятора отображаются при помощи блока «Датчик» (рис. П3.5).

Сохраните осциллограммы и запишите среднее значение напряжения на нагрузке (показание «Датчика»).



Осциллограммы отображаются при открытии блоков «Осциллограммы», на которые выведены токи транзистора и диода; ток дросселя; напряжения на катушке и нагрузке (4 блока). Перед сохранением на каждой диаграмме необходимо **увеличить (выделить) часть сигнала длительностью примерно два периода на интервале установившегося режима работы схемы (ближе к концу времени расчета).**

Б. Исследование понижающего импульсного регулятора в граничном режиме и режиме прерывистого тока дросселя

2

Выполнить моделирование при $L = 0,5$ (мГн), $C = 5$ (мкФ) и $G = 0,1$. Если на диаграмме тока дросселя появляются нулевые интервалы, то нужно сохранить осциллограмму тока дросселя. В противном случае требуется получить режим прерывистого тока, установив $L = 0,2$ (мГн) и, постепенно уменьшая G получить режим работы схемы с прерывистым током.

Записать полученное значение коэффициента заполнения.

3

Промоделировать схему при $L = 0,5$ (мГн), $G = (0,3 + 0,05 \cdot N)$ для значений $F = 15; 10; 5$ кГц.

Определить максимальное значение частоты коммутации F (кГц), при котором возникает режим прерывистого тока.

Записать полученное значение частоты и сохранить соответствующую осциллограмму тока дросселя.

4

При частоте модуляции $F = 20$ кГц **добиться перехода схемы из режима непрерывного тока дросселя в режим прерывистого тока, увеличивая значение сопротивления R , сохранить осциллограмму тока дросселя и записать найденное минимальное значение сопротивления нагрузки.** Если граничного режима получить не удалось, нужно уменьшать G с шагом 0,05.

5

Определить наибольшую индуктивность, при которой ток становится прерывистым, записать значение L и сохранить осциллограмму тока дросселя. Для этого нужно промоделировать схему при $R = 10$ Ом и $G = (0,3 + 0,05 \cdot N)$, уменьшая L от 0,2 до 0,05 (мГн) с шагом 0,05.

В. Регулировочные и нагрузочные характеристики понижающего регулятора

6

Необходимо задать номинальные значения параметров элементов схемы ($E = (45 + 5 \cdot N)$ В, $L = 0,5$ мГн, $C = 5$ мкФ) и **выполнить моделирование** при изменении коэффициента заполнения для двух значений сопротивления нагрузки (см. табл. 2.4).

Таблица 2.4. Регулировочные характеристики понижающего регулятора

G		0,1	0,25	0,4	0,55	0,7	0,85	1
$U_n, \text{ В}$	$R = 10 \text{ Ом}$							
	$R = 50 \text{ Ом}$							

 По данным табл. 2.4 необходимо построить графики регулировочных характеристик и сопоставить их с теоретической зависимостью $U_H = f(G)$ (представить теоретическую и две экспериментальные характеристики).

7

Выполнить моделирование при заданных значениях E, L, C , изменяя сопротивление нагрузки для нескольких значений коэффициента заполнения (см. табл. 2.5):

$$G_{\text{ном}} = 0,3 + 0,05 \cdot N; G_1 = G_{\text{ном}} - 0,3; G_2 = 0,9.$$

Используя измеренные значения напряжения, требуется рассчитать ток нагрузки и заполнить табл. 2.5.

Таблица 2.5. Нагрузочные характеристики понижающего регулятора

$R, \text{Ом}$		80	70	60	50	40	30	20	10
$G_1 < G_{\text{ном}}$	$U_H, \text{В}$								
	$I_H, \text{А}$								
$G_1 = G_{\text{ном}}$	$U_H, \text{В}$								
	$I_H, \text{А}$								
$G_2 > G_{\text{ном}}$	$U_H, \text{В}$								
	$I_H, \text{А}$								

 По данным табл. 2.5 необходимо **построить 3 нагрузочные характеристики** и сравнить их с соответствующими теоретическими зависимостями $U_H = f(I_H)$.

Г. Исследование понижающего регулятора с обратной связью по напряжению

 Необходимо открыть файл «ПОНрег_ОС» ([МОДЕЛИ](#)).

8

При $L = 0,5 \text{ мГн}$, $C = 5 \text{ мкФ}$, $R = 10 \text{ Ом}$, $E = (45 + 5 \cdot N) \text{ В}$, и $G = (0,3 + 0,05 \cdot N)$ **выполнить моделирование** и записать значения **выходного напряжения** для нескольких значений коэффициентов регулирования K_P и K_I (см. табл. 2.6). Для K_P и K_I , **выделенных в таблице красным цветом**, **сохранить осциллограммы**: на диаграммах сигналов P и I необходимо выделить участок, на котором происходят

колебания (переходной процесс); на остальных диаграммах – приблизительно два последних периода (установившийся режим).

На осциллограммах отображаются сигналы пропорционального и интегрального каналов управления, регулирующий сигнал на входе блока ШИМ и его выходной импульсный сигнал, а также ток дросселя и его постоянная составляющая.

В модели отображаются параметры настройки $SE = 0$, $DE = 0$, $SR_1 = 0$, $SR_2 = 0$, значения этих констант можно задать в свойствах соответствующих блоков. Коэффициенты регулирования KP и KI также задаются как параметры блоков.

Таблица 2.6. Зависимость напряжения от коэффициентов регулирования

KP	0,5	1	2	0			1		
KI	0			1000	2000	5000	1000	2000	5000
$U_n, В$									
$G,$		XXX		XXX		XXX		XXX	

Определить значения KP (при $KI = 0$ с точностью 0,1) и KI (при $KP = 0$; с точностью 1000), при которых нарушается работоспособность системы (возникают незатухающие колебания сигнала управления).

Сохранить осциллограммы сигналов P и I для найденных KP и KI .

По диаграммам сигналов управления необходимо **определить значения коэффициента заполнения** и записать их в табл. 2.6.

9

При $KP = 1$, $KI = 5000$ требуется выполнить моделирование при положительном и отрицательном отклонениях напряжения от номинального значения на 20%. Для этого нужно задать параметры изменения напряжения источника: $SE = 1$; $DE = 0,2$ (1-й случай) и $DE = -0,2$ (2-й случай). В случае неработоспособности системы следует установить $KP = 0$.

Сохранить осциллограммы (диаграммы сигналов P и I – без масштабирования, остальные – с увеличением области установившегося режима).

По диаграммам сигналов управления необходимо **определить значения коэффициента заполнения** для каждого случая изменения напряжения.

10

При $KP = 1$, $KI = 5000$ исследовать процесс регулирования напряжения при изменении нагрузки.

 Для этого требуется задать следующие параметры моделирования: $SE = 0$; параметры изменения нагрузки $SR\ 1 = 1$, $SR\ 2 = 0$ (соответствует возрастанию сопротивления на 50%) и $SR\ 1 = 0$, $SR\ 2 = 1$ (двукратное снижение сопротивления). В случае неработоспособности системы следует установить $KP = 0$.

Сохранить результаты моделирования (диаграммы сигналов P и I сохранить без масштабирования, остальные – с увеличением области установившегося режима).

 По диаграммам сигналов управления необходимо определить значения коэффициента заполнения для каждого случая изменения нагрузки.

Д. Исследование повышающего импульсного регулятора

 Необходимо открыть файл «ЛР2-ПОВрег» ([МОДЕЛИ](#)).

11

Моделирование проводится при тех же значениях E , G , r , что и в [пункте 1](#), $C = 5$ мкФ, $L = 0,2$ мГн и $R = 30$ Ом. Требуется **записать среднее значение напряжения на нагрузке** (показание «Датчика») и **сохранить осциллограммы**.

 На осциллограмме требуется выделить примерно два периода на интервале установившегося режима работы схемы. По осциллограммам определяется характер изменения тока дросселя (непрерывный или прерывистый), необходимо получить работу регулятора в режиме непрерывного тока катушки за счёт изменения значения L .

12

Снять регулировочную характеристику, выполнив моделирование при изменении коэффициента заполнения (**заполнить табл. 2.7**).

Таблица 2.7. Регулировочная характеристика повышающего регулятора

G	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	1
$U_H, В$										

 По данным табл. 2.7 необходимо построить график регулировочной характеристики и сопоставить её с теоретической зависимостью $U_H = f(G)$ (представить теоретическую и экспериментальную характеристики).

13

Снять нагрузочную характеристику, выполнив моделирование при изменении нагрузки и коэффициенте заполнения $G = 0,3 + 0,05 \cdot N$ (заполнить табл. 2.8).

Таблица 2.8. Нагрузочная характеристика повышающего регулятора

R, Ом	100	90	80	70	60	50	40	30
$U_H, В$								
$I_H, А$								

 По данным табл. 2.8 построить теоретическую и экспериментальную нагрузочные характеристики $U_H = f(I_H)$.

Е. Исследование инвертирующего импульсного регулятора

 Необходимо открыть файл «ЛР2-ИНВрег» (МОДЕЛИ).

14

Моделирование проводится при тех же параметрах, что и в п. 11. Требуется записать значение напряжения на нагрузке и сохранить осциллограммы, выделив примерно два периода на интервале установившегося режима работы схемы. В случае прерывистого тока получить режим непрерывного тока, изменяя L .

Снять регулировочную характеристику (заполнить аналогичную табл. 2.7).



По полученным данным построить теоретическую и экспериментальную нагрузочные характеристики $U_H = f(G)$.

При $G = (0,3 + 0,05 \cdot N)$ снять нагрузочную характеристику, изменяя R в диапазоне от 70 до 20 Ом (заполнить аналогичную табл. 2.8).



По полученным данным построить теоретическую и экспериментальную нагрузочные характеристики $U_H = f(I_H)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

 К СПИСКУ 

 Вопросы и задания разделены на два блока.

БЛОК А содержит базовые вопросы и задания, **требующие мгновенного ответа**. Без понимания и знаний ответов на эти задачи считается, что не возможно в достаточной степени усвоить теоретический материал по теме лабораторной работы, а также невозможно осуществить правильный анализ полученных графиков и зависимостей, полученных в результате обработки данных и составления отчета. При правильном ответе на вопрос/задание из **БЛОКА А**, студент допускается к **БЛОКУ Б**.

БЛОК Б содержит вопросы и задания, которые подразумевают объяснение теоретического материала, анализа и объяснения полученных результатов и требуют использование отчета. Допускается давать некоторое время для подготовки.

БЛОК А

1. Нарисуйте схему регулятора постоянного тока (понижающий, повышающий, инвертирующий). Напишите формулу связи напряжения на нагрузке и входного напряжения.
2. Что такое коэффициент заполнения? В каком диапазоне может изменяться коэффициент заполнения γ . Нарисуйте сигналы управления транзисторов для одного из указанных значений γ : 0; 0,1; 0,4; 0,7; 1; 2.

3. Что такое «скважность»? В каком диапазоне изменяется скважность. Нарисуйте сигналы управления транзистором при указанной скважности q : 0; 1; 2; 5.
4. Нарисуйте схемы замещения и уравнения для тока дросселя для указанного регулятора постоянного тока (понижающий, повышающий, инвертирующий).
5. Нарисуйте график тока в катушке при заданном режиме работы – в граничном режиме или в непрерывном режиме, для заданной схемы регулятора и заданном коэффициенте заполнения $\gamma = 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,7$.
6. Нарисуйте график тока в транзисторе при заданном режиме работы – в граничном режиме или в непрерывном режиме, для заданной схемы регулятора и заданном коэффициенте заполнения $\gamma = 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,7$.
7. Нарисуйте график тока в диоде при заданном режиме работы – в граничном режиме или в непрерывном режиме, для заданной схемы регулятора и заданном коэффициенте заполнения $\gamma = 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,7$.
8. Нарисуйте график напряжения на (диод, транзистор, дроссель) на регуляторе (понижающий, повышающий, инвертирующий) при заданном коэффициенте заполнения $\gamma = 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,7$.
9. При каком допущении конденсатор заменяется на источник напряжения? Объясните почему?
10. Объясните с чем связано возникновение пульсаций напряжения на нагрузке? Каким образом можно уменьшить пульсации?
11. Запишите уравнение баланса мощностей для указанного регулятора постоянного тока (понижающий, повышающий, инвертирующий).
12. Нарисуйте график тока в конденсаторе для указанного регулятора при коэффициенте заполнения $\gamma = 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,7$.
13. Для чего нужна обратная связь в регуляторах постоянного тока?
14. Покажите два способа расчёта среднего значения токов в регуляторах постоянного тока.
15. Перечислите виды модуляции сигналов управления транзистора.

БЛОК Б

1. Объясните принцип работы понижающего регулятора. Объясните назначение элементов L , C , VD .
2. Какими способами можно получить граничный режим в понижающем регуляторе?
3. Что такое регулировочная характеристика понижающего регулятора? Объясните различие теоретической и экспериментальной характеристики, используя полученные диаграммы.

4. Что такое нагрузочная характеристика понижающего регулятора? Объясните характер нагрузочной характеристики. Как выглядит идеальная нагрузочная характеристика?
5. По полученным в лабораторной работе графикам покажите с какой целью используют обратную связь.
6. Как реализуется обратная связь для регулятора постоянного тока? Приведите блок-схему.
7. Объясните принцип работы широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Что такое опорный и несущий сигналы? Как реализуется ШИМ?
8. Проанализируйте полученные графики работы понижающего регулятора с обратной связью при разных коэффициентах пропорционального и интегрального звеньев.
9. По графикам из отчёта проанализируйте работу понижающего регулятора с обратной связью при изменении входного напряжения.
10. По графиками из отчёта проанализируйте работу понижающего регулятора с обратной связью при изменении сопротивления нагрузки.
11. Объясните принцип работы повышающего регулятора постоянного тока, используя полученные диаграммы. Объясните назначение элементов L , VD , C .
12. Объясните регулировочную характеристику повышающего регулятора. Сравните теоретическую и экспериментальную характеристики.
13. Объясните нагрузочную характеристику повышающего регулятора. Сравните теоретическую и экспериментальную характеристики.
14. Объясните принцип работы инвертирующего регулятора постоянного тока, используя полученные диаграммы. Объясните назначение элементов L , VD , C .
15. Объясните регулировочную характеристику инвертирующего регулятора. Сравните теоретическую и экспериментальную характеристики.
16. Объясните нагрузочную характеристику инвертирующего регулятора. Сравните теоретическую и экспериментальную характеристики.
17. Другие вопросы на усмотрение преподавателя, ведущего занятия.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Автономные инверторы напряжения



В лабораторной работе исследуется однофазная мостовая схема инвертора напряжения, принципы формирования напряжения на нагрузке, изучаются методы управления и основные характеристики.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

Цель работы – исследовать принцип работы однофазного инвертора напряжения и его принципы управления с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Исследуемая схема представлена на рис. 3.1. Нагрузка подключается между выводами a и b , рассматривается работа с тремя вариантами нагрузки: активная (R), индуктивная (L) и активно-индуктивная (RL). Управление транзисторными ключами, обеспечивающее регулирование напряжения на нагрузке, осуществляется методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Простейшим ее вариантом является «однократная модуляция» – напряжение имеет форму меандра с нулевыми паузами, действующее значение которого зависит от относительной длительности ненулевых интервалов (коэффициента заполнения γ). Другим вариантом ШИМ является изменение ширины импульсов напряжения по синусоидальному закону, при этом импульсы формируются в результате сравнения высокочастотного несущего сигнала с модулирующим сигналом требуемой частоты. Амплитуда основной гармоники напряжения пропорциональна отношению амплитуд модулирующего и несущего сигналов (коэффициенту модуляции M).

Работа выполняется посредством моделирования силовых электронных преобразователей в программе *SimInTech*. Модели инверторов собраны из стандартных элементов библиотеки «ЭЦ – Динамика», измеряемые напряжения, токи и сигналы системы управления (СУ) отображаются на осциллограммах. При моделировании учитывается сопротивление полупроводниковых элементов преобразователя, задаются значения падений напряжений на транзисторах и диодах, а также внутреннее сопротивление источника.

В компьютерной модели «ЛР3-Инвертор_ШИР» исследуется однофазный инвертор с широтно-импульсным регулированием (ШИР), а модель «ЛР3-Инвертор_ШИМ» – однофазный инвертор с управлением на основе ШИМ-модуляции.

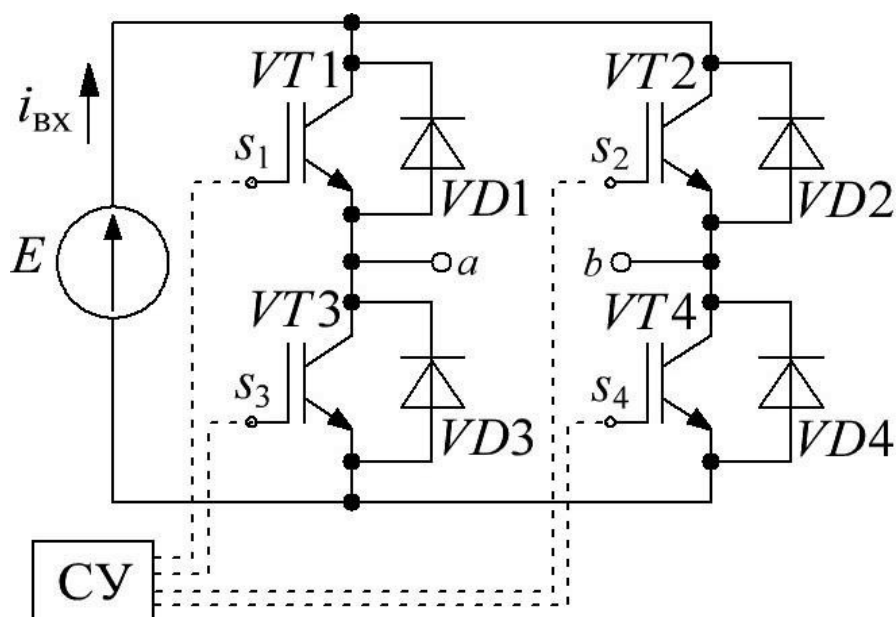


Рис. 3.1. Однофазная мостовая схема инвертора напряжения

Список исследуемых моделей:

- «ЛРЗ-Инвертор_ШИР» – "*models/ЛРЗ-Инвертор_ШИР.prt*" – рис. П3.9;
- «ЛРЗ-Инвертор_ШИМ» – "*models/ЛРЗ-Инвертор_ШИМ.prt*" – рис. П3.10.

Дополнительно модели размещены внутри данного файла pdf-файла (в "*SumatraPDF*" выберите Вид - Показывать закладки (или нажмите F12)).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА

 К СПИСКУ 

Для освоения теоретического материала следует повторить:

- законы коммутации;
- взаимосвязь токов и напряжений на резисторе, катушке индуктивности, конденсаторе;
- расчёт переходных процессов в электрических цепях;
- расчёт определённого интеграла;
- идеализированные модели полупроводниковых ключей;
- спектральный анализ.

Инвертор – полупроводниковое устройство, преобразующее электрическую энергию постоянного тока в электрическую энергию переменного тока, т.е. это преобразователь постоянных напряжения и тока в переменные напряжение и ток. На стороне постоянного тока такого преобразователя (на входе инвертора) включен источник электрической энергии, а выход преобразователя может быть подключён к нагрузке или к сети переменного тока. Инверторы, работающие независимо от сети, называются *автономными инверторами*. В *инверторах* напряжения на входе преобразователя включен источник постоянного напряжения (источник электрической энергии, обладающий свойствами источника ЭДС), а на выходе создаётся переменное напряжение, определяющее ток нагрузки.

Принцип действия инверторов основан на периодическом подключении цепи нагрузки к источнику посредством управляемых полупроводниковых ключей преобразователя (силовых транзисторов). Инверторы напряжения реализуются на двухпроводных ключах (S), каждый из которых представляет собой параллельное соединение транзистора и встречноключённого диода (рис. 3.1). Для анализа работы инвертора удобно использовать эквивалентные схемы, соответствующие положительному и отрицательному полупериодам формируемого напряжения. Эквивалентные схемы, а также форма выходного напряжения и форма тока при RL -нагрузке приведены в табл. 3.1.

Для формирования положительного полупериода напряжения на нагрузке ток должны проводить ключи $S1$ и $S4$ ($S2$ и $S3$ – закрыты), т.е. необходимо подавать импульсы управления на транзисторы $VT1$ и $VT4$, в этом случае к нагрузке будет приложено напряжение источника ($u_{ab} = +E$) (см. эквивалентную схему для 1-го интервала), а ток может протекать как через транзисторы (в случае положительного направления тока нагрузки i_H от узла a к узлу b) так и через диоды – $i_{S14} = i_H < 0$. Для формирования отрицательного полупериода выходного напряжения во включенном состоянии должны находиться ключи $S2$ и $S3$ ($S1$ и $S4$ – закрыты), что соответствует подаче импульсов управления на транзисторы $VT2$ и $VT3$, тогда на нагрузке формируется отрицательное напряжение равное напряжению источника ($u_{ab} = -E$) [см. эквивалентную схему для 2-го интервала], а ток протекает либо через транзисторы (от узла b к узлу a) либо через обратные диоды при положительном токе нагрузки ($i_{S23} = -i_H < 0$).

На каждом полупериоде при переключении транзисторов возникают переходные процессы, описываемые дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} \text{при } u_{ab} = E \rightarrow i_H R + L \frac{di_H}{dt} &= E; \\ \text{при } u_{ab} = -E \rightarrow i_H R + L \frac{di_H}{dt} &= -E. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Таблица 3.1. Эквивалентные схемы инвертора

1-й интервал (полупериод), $0 \leq \omega t \leq \pi$: проводят $VT1(VD1)$ и $VT4(VD4)$	2-й интервал (полупериод), $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$: проводят $VT2(VD2)$ и $VT3(VD3)$
$i_H = \frac{E}{R} + A \cdot e^{\frac{t}{\tau}} =$ $= \frac{E}{R} - \left(I_m + \frac{E}{R}\right) \cdot e^{-(\omega t)/(\omega\tau)}$	$i_H = -\frac{E}{R} + B \cdot e^{\frac{t}{\tau}} =$ $= \frac{E}{R} + \left(I_m + \frac{E}{R}\right) \cdot e^{-(\omega t)/(\omega\tau)}$

При положительном выходном напряжении ток нагрузки экспоненциально увеличивается, достигая максимального значения в конце полупериода. После изменения знака напряжения, ток убывает до минимального значения в конце периода. Скорость изменения тока зависит от постоянной времени τ , которая определяется нагрузкой – $\tau = L/R$.

В установившемся режиме работы инвертора минимальное и максимальное значения тока одинаковы на каждом периоде и равны друг другу по модулю, что говорит об отсутствии постоянной составляющей тока, т.е. $I_{н.ср} = 0$. Тогда $i_H(0) = -I_m$, и следовательно, постоянная интегрирования $A = -(I_m + E/R)$ (таб. 3.1).

На интервале $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$ решение будет аналогичным, а постоянная интегрирования $A = -(I_m + E/R)$, поскольку $i_H(0) = +I_m$.

Максимальное значение тока нагрузки:

$$I_m = i_{H(\omega t=\pi)} = \frac{E}{R} - \left(I_m + \frac{E}{R}\right) \cdot e^{-\frac{\pi}{\omega t}} \Rightarrow I_m = \frac{E}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{\pi}{\omega t}}}{1 + e^{-\frac{\pi}{\omega t}}}. \quad (3.2)$$

На каждом периоде можно выделить четыре интервала (см. диаграммы в табл. 3.1). Для простоты объяснения начнём с интервала II:

II: ток протекает через транзисторы $VT1$ и $VT4$ ($i_H > 0, u_{ab} > 0$), энергия передаётся от источника в нагрузку, происходит увеличение энергии в дросселе; в соответствии с эквивалентной схемой:

$$i_{S14} = i_{VT14} = i_{BX} = i_H. \quad (3.3)$$

III: в момент $\omega t = \pi$ транзисторы $VT1, VT4$ выключаются и подаются импульсы управления на $VT2$ и $VT3$, но поскольку $i_H = +I_m$ под действием ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке, открываются диоды $VD2$ и $VD3$ ($i_H > 0, u_{ab} < 0$), происходит возврат электрической энергии из нагрузки в источник, i_H уменьшается; в соответствии с эквивалентной схемой:

$$i_{S23} = -i_{VD23} = i_{BX} = -i_H. \quad (3.4)$$

IV: в момент снижения тока до нуля диоды $VD2, VD3$ закрываются, и ток переходит в транзисторы $VT2$ и $VT3$ ($i_H < 0, u_{ab} < 0$), электрическая энергия передаётся от источника в нагрузку, происходит увеличение энергии в дросселе; в соответствии с эквивалентной схемой:

$$i_{S23} = i_{VT23} = i_{BX} = -i_H. \quad (3.5)$$

I: момент $\omega t = 2\pi$ транзисторы $VT2, VT3$ выключаются и подаются импульсы управления на $VT1$ и $VT4$, но поскольку $i_H = -I_m$ под действием ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке, открываются диоды $VD1$ и $VD4$ ($i_H < 0, u_{ab} > 0$), происходит возврат электрической энергии из нагрузки в источник, i_H возрастает; в соответствии с эквивалентной схемой:

$$i_{S14} = -i_{VT14} = i_{BX} = i_H. \quad (3.6)$$

Поскольку нагрузка содержит резистор, то постоянная составляющая входного тока является положительной ($I_{BX.cp} > 0$), что соответствует потреблению мощности от источника постоянного напряжения. Диаграмму тока источника можно построить по интервалам тока нагрузки либо представить его как алгебраическую сумму токов ключей – токов транзисторов и диодов (по 1-му закону Кирхгофа).

Чтобы иметь возможность регулировать действующее значение напряжения на выходе инвертора и его основную гармонику (u_{ab1}), необходимо смещать импульсы управления транзисторов таким образом,

чтобы напряжение u_{ab} принимало нулевые значения на каждом полупериоде (полупериоды были «заполнены» не полностью). Для формирования нулевых интервалов в проводящем состоянии должны находиться ключи $S1, S2$ или $S3, S4$. Соотношение длительностей ненулевых и нулевых интервалов напряжения характеризуется коэффициентом заполнения:

$$\gamma = \frac{t_{\text{имп}}}{T/2} = \frac{\omega t_{\text{имп}}}{\pi}, \quad (3.7)$$

где $t_{\text{имп}}$ – длительность импульса напряжения (время ненулевого интервала) на каждом полупериоде, T – период переключения транзисторов (период выходного напряжения); $\omega = 2\pi/T$ – угловая частота напряжения и тока.

Коэффициент заполнения является параметром управления. За счёт изменения γ осуществляется регулирование напряжения u_{ab} , т.к. изменяется относительная длительность ненулевых интервалов (рис. 3.2). Диаграммы напряжения и тока, представленные в табл. 3.1, соответствуют $\gamma = 1$, когда отсутствуют нулевые интервалы напряжения (напряжение имеет форму меандра). При разложении прямоугольного сигнала (меандра) в ряд Фурье присутствуют все нечётные гармонические составляющие. Частота первой (основной) гармоники равна частоте рассматриваемой несинусоидальной функции. Амплитуда основной гармоники рассчитывается как

$$U_{ab1m} = \frac{4E}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\gamma\pi}{2}\right). \quad (3.8)$$

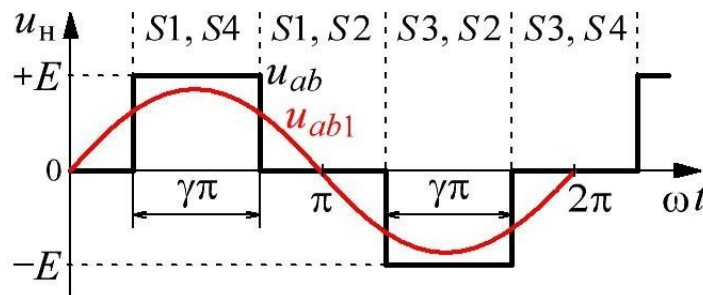


Рис. 3.2. Диаграмма выходного напряжения при $\gamma < 1$

С целью улучшения гармонического состава напряжения на нагрузке, подключенной к инвертору, для управления транзисторным преобразователем используется *синусоидальная широтно-импульсная модуляция* (ШИМ). Этот алгоритм управления характеризуется высокой частотой переключения транзисторов, которая равна частоте несущего сигнала пилообразной (треугольной) формы, и изменением ширины импульсов по синусоидальному закону, поскольку импульсы управления формируются в результате сравнения несущего сигнала с модулирующим синусоидальным сигналом, частота которого определяет частоту основной гармоники выходного напряжения инвертора. Регулирование напряжения в этом случае происходит за счёт изменения амплитуды модулирующего

сигнала относительно амплитуды несущего сигнала, что характеризуется *коэффициентом модуляции*:

$$M = \frac{U_{\text{мод.}m}}{U_{\text{нес.}m}}, \quad (3.9)$$

где $U_{\text{мод.}m}$ – амплитуда модулирующей синусоиды; $U_{\text{нес.}m}$ – амплитуда несущего высокочастотного сигнала треугольной формы. Наиболее простым способом реализации ШИМ является двухполярная модуляция (рис. 3.3), когда поочередно в проводящем состоянии находятся VT1 и VT4, потом VT2 и VT3. Условия переключения транзисторов:

$$\begin{aligned} u_{\text{мод}}(\theta) \geq u_{\text{нес}}(\theta) & - \text{проводят VT1 и VT4;} \\ u_{\text{мод}}(\theta) < u_{\text{нес}}(\theta) & - \text{проводят VT2 и VT3.} \end{aligned}$$

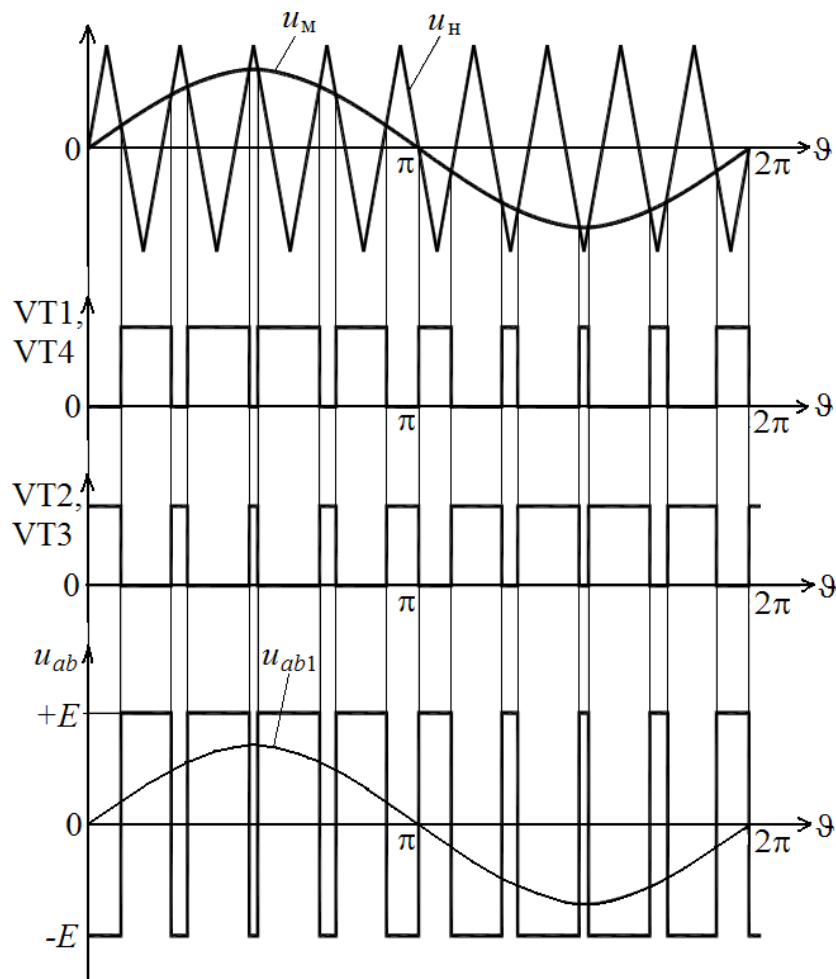


Рис. 3.3. Принцип формирования управляющих импульсов при двухполярной ШИМ

В результате на нагрузке формируется двухуровневое импульсное напряжение, амплитуда основной гармоники которого $U_{ab1m} = M \cdot E$.

Режим работы, при котором амплитуда модулирующего сигнала превышает амплитуду несущего сигнала называется *перемодуляцией* ($M > 1$). В таком случае амплитуда первой гармоники выходного напряжения будет превышать напряжение источника, но

линейная зависимость между амплитудой основной гармоники и напряжением источника при этом нарушается.

Кроме требования к значению выходного напряжения инвертора обычно необходимо обеспечить его синусоидальность. Эта задача решается подключением фильтра на выходе инвертора. Наиболее простым и распространенным является однозвенный Г-образный LC -фильтр. Параметры фильтра рассчитываются из условия обеспечения заданного уровня содержания высших гармоник, т.е. искажения формы выходного напряжения. При использовании ШИМ задача фильтрации существенно упрощается.

Нагрузку полупроводниковых элементов в схеме инвертора можно оценить по средним значениям тока в них. Как было описано выше, при активно-индуктивной нагрузке ток каждого ключа распределяется между транзистором и обратным диодом: через транзисторы ток поступает в нагрузку, а при изменении знака возвращается в источник через диоды. Момент смены знака тока определяется параметрами нагрузки (R и L), от которых зависит разность фаз между основными гармониками напряжения и тока.

ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ

 [К СПИСКУ](#) 

А. Исследование инвертора с широтно-импульсным регулированием

 При исследовании каждой схемы требуется ввести данные опыта и нажать кнопку «Пуск», расположенную на панели инструментов в окне модели (рис. ПЗ.1).

Рядом с исходными данными указаны размерности и диапазоны значений параметров. Время расчета обычно не превышает 10 сек. После окончания расчета в специальном поле, расположенном в нижней части окна модели, появляется информационное сообщение «Конечное время достигнуто».

 Необходимо открыть файл «ЛР3-Инвертор_ШИР.prt».

1

Моделирование проводится при указанных в табл. 3.2 значениях параметров нагрузки инвертора (R , L), напряжения (E) и сопротивления источника (r), а также параметров транзисторов и диодов – пороговых напряжений (U_{VT} , U_{VD}) для трех значений коэффициента заполнения: $G = 1$, $G = 0,5$ и $G = 0,1 \cdot N$.

 Значения G и R (вместе с L) задаются в модели посредством соответствующих регуляторов (рис. ПЗ.9), для этого необходимо нажать кнопку «Инициализация» и выставить нужные параметры, нажать «Стоп» (рис. ПЗ.1). Значение r задается как параметр элемента, а E и U_{VT} , U_{VD} – в свойствах блоков «ЭДС» и « U_{VT} », « U_{VD} ».

Таблица 3.2. Исходные данные для моделирования (N – номер бригады)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E , В	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340
r , Ом	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
R , Ом	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
L , Гн	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
U_{VT} , В	1,5	1,8	1,7	1,9	1,6	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
U_{VD} , В	0,9	0,7	0,6	0,5	0,8	0,6	0,5	0,9	0,8	0,7

Требуется **сохранить осциллограммы (5 блоков)**, предварительно выделив 1...1,5 периода изменения сигналов на интервале установившегося режима работы схемы (ближе к концу времени расчета).

Также необходимо **сохранить гармонический состав напряжения и тока нагрузки**.

 Для отображения гармонического состава следует открыть соответствующую диаграмму, нажав ПКМ выбрать в меню «Анализ данных», кликнуть на «Спектральный анализ» и развернуть открывшееся окно на весь экран. В разделе «Частота первой гармоники, Гц» задать 50, а в поле «Количество гармоник» выбрать 512, указать «Сканировать с конца диапазона», после чего выделить диапазон наибольших гармоник (примерно от 0 до 1000 Гц).

2

Выполнить моделирование при изменении коэффициента заполнения. Значения напряжений и коэффициента гармоник (*THD*) записать в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Регулировочные характеристики инвертора без модуляции

G	0	0,15	0,25	0,35	0,5	0,65	0,75	0,85	1,0
U_d , В									
U_{1m} , В									
U_{3m} , В									
U_{5m} , В									
U_{7m} , В									
<i>THD</i>									
K_г									
K_г (теор)									

 Действующее значение напряжения на нагрузке (U_d) отображается в модели как «U нагр», а значение *THD* и амплитуды высших гармоник выходного напряжения (U_{3m} , U_{5m} , U_{7m}) выводятся как показания соответствующих блоков «Датчик».

 По данным табл. 3.3 вычислить коэффициенты гармоник напряжения для заданных коэффициентов заполнения (γ):

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} U_{nm}^2}}{U_{1m}}, \quad (3.10)$$

где U_{1m} – амплитуда 1-й гармоники; U_{nm} – амплитуда n -й гармоники.

Определить теоретические значения коэффициента гармоник:

$$K_{\Gamma(\text{теор})} = \frac{U_{\text{ВГ}}}{U_1} = \sqrt{\frac{U_{\text{д}}^2}{U_1^2} - 1}, \quad (3.11)$$

где $U_{\text{ВГ}}$ – действующее значение высших гармоник (всех, кроме основной); U_1 – действующее значение напряжения (всех гармоник, включая основную).



По полученным результатам необходимо построить:

- зависимость $U_{\text{д}} = f(G)$ и соответствующую теоретическую характеристику;
- зависимость $U_{1m} = f(G)$ и соответствующую теоретическую характеристику;
- зависимости амплитуд 3-й, 5-й и 7-й гармоник напряжения от G ;
- зависимости коэффициентов гармоник напряжения от G (1 – по измеренным значениям, 2 – рассчитанную по гармоникам, 3 – теоретическую).

3

Выполнить моделирование, изменяя параметры нагрузки, для двух значений коэффициента заполнения: $G = 1$ и $G = 0,1 \cdot N$ (дважды заполнить табл. 3.4).

Таблица 3.4. Внешние характеристики инвертора

R , Ом	L , Гн	$I_{\text{вх.ср}}$, А	$I_{\text{вх.д}}$, А	U_{1m} , В	I_{1m} , А	φ_u , гр	φ_i , гр	$I_{VT\text{ср}}$, А	$I_{VT\text{д}}$, А	$I_{VD\text{ср}}$, А	$I_{VD\text{д}}$, А
90	0,9										
50	0,5										
20	0,2										
10	0,1										

 Среднее и действующее значения тока источника ($I_{\text{вх.ср}}$, $I_{\text{вх.д}}$), среднее и действующее значения токов транзистора и диода ($I_{VT\text{ср}}$, $I_{VT\text{д}}$; $I_{VD\text{ср}}$, $I_{VD\text{д}}$) отображаются в верхней части модели (действующие – синим цветом, средние значения – зеленым), амплитуды первых гармоник тока и напряжения и их начальные фазы (I_{1m} , φ_I , U_{1m} , φ_U) выводятся при помощи датчиков.

 По данным табл. 3.4 требуется рассчитать значения потребляемой мощности ($P_{\text{ист}}$), мощностей нагрузки (S_1 , P_1 , Q_1) и потери в инверторе ($P_{\text{п}}$) – заполнить табл. 3.5.

Таблица 3.5. Энергетические характеристики инвертора

R , Ом	L , Гн	$P_{\text{ист}}$, Вт	S_1 , ВА	P_1 , Вт	Q_1 , вар	$P_{\text{п}}$, Вт	$P_{\text{п(теор)}}$, Вт
90	0,9						
50	0,5						
20	0,2						
10	0,1						

 Полная, активная и реактивная мощности нагрузки по 1-ой гармонике:

$$S_1 = \frac{U_{1m} \cdot I_{1m}}{2}, \quad P_1 = S_1 \cdot \cos \varphi, \quad Q_1 = S_1 \cdot \sin \varphi, \quad (3.12)$$

где $\varphi = (\varphi_u - \varphi_i)$ – сдвиг фаз между гармониками напряжения и тока (угол нагрузки).

Мощность, потребляемая инвертором от источника:

$$P_{\text{ист}} = E \cdot I_{\text{вх.ср}}. \quad (3.13)$$

Мощность потерь в инверторе по измеренным данным:

$$P_{\text{п}} = 2P_{\text{п}S1} + 2P_{\text{п}S3} + rI_{\text{вх.д}}^2, \quad (3.14)$$

$$P_{\text{п}} = \Delta U_{VT} I_{VT1\text{ср}} + \Delta U_{VD} I_{VD1\text{ср}} + (I_{VT1\text{д}}^2 + I_{VD1\text{д}}^2) R_{\text{он}}, \quad (3.15)$$

$$P_{\text{п}} = \Delta U_{VT} I_{VT3\text{ср}} + \Delta U_{VD} I_{VD3\text{ср}} + (I_{VT3\text{д}}^2 + I_{VD3\text{д}}^2) R_{\text{он}}, \quad (3.16)$$

где $R_{\text{он}} = 0,1$ [Ом] – сопротивление ключей инвертора в проводящем состоянии; $\Delta U_{VT} = U_{VT}$, $\Delta U_{VD} = U_{VD}$ – падения напряжения на транзисторах и диодах (табл. 3.2).



Теоретическое значение мощности потерь в инверторе:

$$P_{\text{п(теор)}} = 4(P_{VT} + P_{VD}) + rI_{\text{вх.д}}^2, \quad (3.17)$$

$$P_{VT} = \Delta U_{VT} \frac{I_{1m}}{2\pi} (1 + \cos \varphi) + \frac{I_{1m}^2 R_{on}}{4\pi} \left(\pi - \varphi + \frac{1}{2} \sin 2\varphi \right), \quad (3.18)$$

$$P_{VD} = \Delta U_{VD} \frac{I_{1m}}{2\pi} (1 - \cos \varphi) + \frac{I_{1m}^2 R_{on}}{4\pi} \left(\varphi - \frac{1}{2} \sin 2\varphi \right). \quad (3.19)$$



По данным табл. 3.4, 3.5 необходимо построить:

- внешние (нагрузочные) характеристики инвертора $U_{1m} = f(I_{1m})$ для каждого G ;
- энергетические характеристики для $G = 1$ и $G = 0, 1N$:
 $P_{\text{ист}} = f(P_1)$, $S_1 = f(P_1)$, $Q_1 = f(P_1)$ – на одном графике;
 $P_{\text{п}} = f(P_1)$, $P_{\text{п(теор)}} = f(P_1)$ – на отдельной координатной плоскости.

Б. Исследование инвертора с ШИМ-управлением



Необходимо открыть файл «ЛР3-Инвертор_ШИМ.prt».

4

Выполнить моделирование для четырёх значений коэффициента модуляции: $M = 1$; $M = 0,5$; $M = 0,1 \cdot N$; $M = 1,5$ (при значениях параметров, указанных в табл. 3.2).

Сохранить все осциллограммы и гармонический состав напряжения и тока нагрузки.

5

Выполнить моделирование при изменении коэффициента модуляции M .

Записать в табл. 3.6 значения напряжений, токов и коэффициентов гармоник (THD).

Таблица 3.6. Регулировочные характеристики инвертора с ШИМ

М	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0
$I_{\text{вх.ср}}, \text{A}$										
$U_{\text{д}}, \text{В}$										
$I_{\text{д}}, \text{A}$										
THD_I										
THD_U										
$U_{1m}, \text{В}$										
$U_{9m}, \text{В}$										
$U_{7,11m}, \text{В}$										
$U_{15,21m}, \text{В}$										
$U_{17,19m}, \text{В}$										
$U_{25,29m}, \text{В}$										
K_{Γ}										
$K_{\Gamma} (\text{теор})$										

Действующие значения напряжения и тока ($U_{\text{д}}, I_{\text{д}}$) отображаются в модели как «U нагр» и «I нагр», «I ист» – постоянная составляющая тока источника ($I_{\text{вх.ср}}$), значения коэффициентов гармоник THD_I , THD_U и амплитуды гармоник напряжения (U_{1m} , U_{9m} , $U_{7m} = U_{11m}$, $U_{15m} = U_{21m}$, $U_{17m} = U_{19m}$, $U_{25m} = U_{29m}$) выводятся как показания соответствующих датчиков.

По данным табл. 3.6 вычислить коэффициенты гармоник:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} U_{nm}^2}}{U_{1m}}, \quad K_{\Gamma(\text{теор})} = \frac{U_{\text{вГ}}}{U_1} = \sqrt{\frac{U_{\text{д}}^2}{U_1^2} - 1}. \quad (3.20)$$

По полученным результатам необходимо построить:

- регулировочные характеристики
 - $I_{\text{вх.ср}} = f(M)$, $I_{\text{д}} = f(M)$, $U_{\text{д}} = f(M)$,
 - $U_{1m} = f(M)$ - экспериментальную и теоретическую;
- зависимости амплитуд 7-й, 9-й и 11-й гармоник напряжения от М (совместно);
- зависимости амплитуд 17(19)-й, 15(21)-й, 25(29)-й гармоник напряжения от М (три характеристики на одном графике);
- зависимости коэффициентов гармоник $THD_I = f(M)$, THD_U , K_{Γ} , $K_{\Gamma(\text{теор})} = f(M)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

 [К СПИСКУ](#) 

 Вопросы и задания разделены на два блока.

БЛОК А содержит базовые вопросы и задания, **требующие мгновенного ответа**. Без понимания и знаний ответов на эти задачи считается, что не возможно в достаточной степени усвоить теоретический материал по теме лабораторной работы, а также невозможно осуществить правильный анализ полученных графиков и зависимостей, полученных в результате обработки данных и составления отчета. При правильном ответе на вопрос/задание из **БЛОКА А**, студент допускается к **БЛОКУ Б**.

БЛОК Б содержит вопросы и задания, которые подразумевают объяснение теоретического материала, анализа и объяснения полученных результатов и требуют использование отчета. Допускается давать некоторое время для подготовки.

БЛОК А

1. Нарисуйте схему однофазного мостового инвертора напряжения. Укажите, где находится сторона переменного тока, а где сторона постоянного тока.
2. Нарисуйте схему однофазного мостового инвертора тока. Укажите, где находится сторона переменного тока, а где сторона постоянного тока.
3. Какие методы используются для регулирования амплитуды основной гармоники и частоты выходного напряжения?
4. Объясните необходимость обратных диодов в инверторе напряжения, и последовательных диодов в инверторе тока.
5. По какому закону изменяется ток инвертора в случаях (R -нагрузка; L -нагрузка; последовательная RL -нагрузка; параллельная RL -нагрузка)?
6. По какому закону изменяется напряжение на выходе инвертора тока (R -нагрузка; C -нагрузка; последовательная RC -нагрузка; параллельная RC -нагрузка)?
7. Расставьте токи во всех элементах инвертора напряжения. Как находится мгновенное значение тока источника?
8. Напишите баланс активной мощности для инвертора напряжения.
9. Что такое коэффициент заполнения при использовании ШИР?
10. Что такое коэффициент модуляции? Что такое несущий и опорный сигналы? Что такое частота коммутации?
11. Что такое коэффициент гармоник?
12. С помощью какого метода анализируют периодические сигналы разных форм?

13. Каким образом можно из спектрального состава сигнала получить форму сигнала?
14. Что такое перемодуляция? Какой недостаток у такого режима работы инвертора?
15. Перечислите способы улучшения синусоидальности выходного напряжения инвертора.

БЛОК Б

1. Объясните принцип работы мостового инвертора напряжения.
2. Объясните полученные графики при различных коэффициентах заполнения. Сравните гармонические составы.
3. Проанализируйте влияние коэффициента заполнения на качество выходного напряжения.
4. Что такое регулировочная характеристика при ШИР-регулировании? Объясните полученную регулировочную характеристику в отчёте.
5. Что такое внешняя характеристика при ШИР-регулировании? Объясните полученную внешнюю характеристику в отчёте.
6. Что такое энергетические характеристики инвертора? Как рассчитываются мощности и оцениваются потери в нём? Объясните полученные энергетические характеристики в отчёте.
7. Что такое широтно-импульсная модуляция? Объясните принцип работы. Сравните графики из отчёта, полученные при различных коэффициентах модуляции.
8. Что такое регулировочная характеристика при ШИМ-модуляции? Объясните полученную регулировочную характеристику в отчёте. Как влияет коэффициент модуляции на качество выходного напряжения?
9. По графикам и зависимостям в отчёте сравните качество выходного напряжения при ШИР-регулировании и при ШИМ-модуляции.
10. Другие вопросы на усмотрение преподавателя, ведущего занятия.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Тиристорный регулятор и компенсация реактивной мощности

 [К СПИСКУ](#) 

В лабораторной работе исследуются схема однофазного регулятора тока на основе параллельных встречноключенных тиристоров при различных типах нагрузки, а также принцип компенсации реактивной мощности.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

Цель работы – изучить принцип работы тиристорного регулятора для регулирования мощности на активной, активно-индуктивной и индуктивной нагрузках. Изучить принцип компенсации реактивной мощности с помощью тиристорного регулятора.

Исследуемые схемы показаны на рис. 4.1. Нагрузка подключается тиристорным регулятором к источнику переменного синусоидального напряжения $u(t) = U_m \sin(2\pi f \cdot t)$ с частотой $f = 50$ Гц, амплитудное значение зависит от номера варианта (бригады) N и указано в табл. 4.1. Импульсы управления тиристорами поступают на управляющие электроды от системы управления (СУ) с задержкой относительно моментов изменения знака напряжения источника с отрицательного на положительный (относительно начала положительного полупериода) для $V S1$ и относительно начала отрицательного полупериода напряжения для тиристора $V S2$, задержка включения тиристорov задаётся посредством угла управления. Рассматриваются процессы регулирования тока и напряжения для трёх вариантов нагрузки: активная (R), индуктивная (L) и активно-индуктивная (RL).

Таблица 4.1. Амплитуда напряжения сети (источника)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_m, \text{В}$	275	310	345	400	550	510	490	600	720

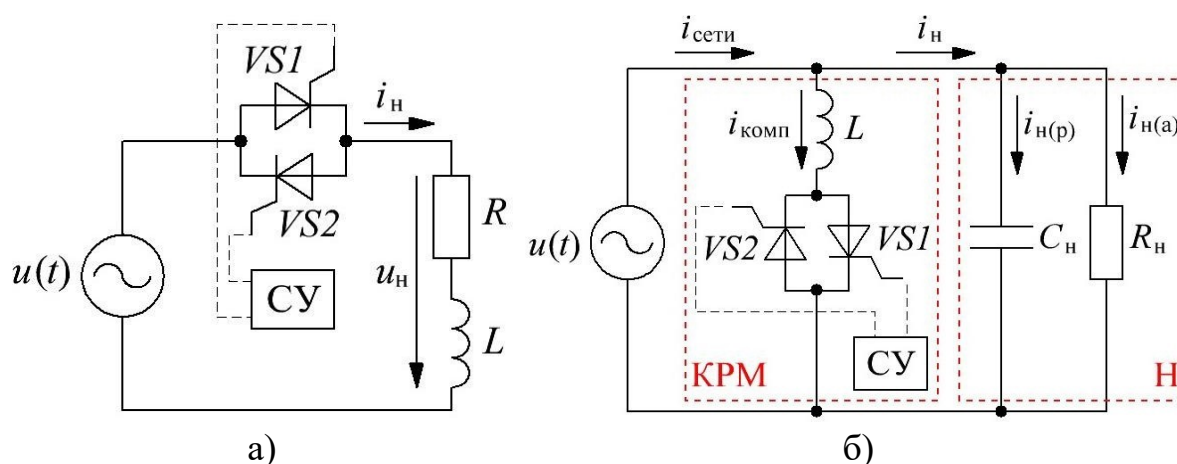


Рис. 4.1. Исследуемые схемы:

а – тиристорный регулятор; б – компенсатор реактивной мощности (KPM)

Работа выполняется в программе *SimInTech*, в которой осуществляется имитационное моделирование исследуемых устройств. Модель регулятора собрана из стандартных элементов библиотеки, измеряемые напряжения, ток и импульсы управления тиристорами отображаются на блоках временных диаграмм. При моделировании используются тиристоры с идеальными вольт-амперными характеристиками: в открытом состоянии приборы имеют нулевое сопротивление, а в закрытом – бесконечно большое сопротивление.

🔧 Список исследуемых моделей:

- «JP4-VSpег» – "*models/JP4-VSpeг.prt*" – рис. ПЗ.11;
- «JP4-KPM» – "*models/JP4-KPM.prt*" – рис. ПЗ.12.

Дополнительно модели размещены внутри данного файла pdf-файла (в "*SumatraPDF*" выберите Вид - Показывать закладки (или нажмите F12)).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА

📄 К СПИСКУ 📄

📖 Для освоения теоретического материала следует повторить:

- законы коммутации;
- взаимосвязь токов и напряжений на резисторе, катушке индуктивности, конденсаторе;
- расчёт переходных процессов в электрических цепях;
- расчёт определённого интеграла.

Регулятор на встречно-включенных тиристорах (рис. 4.1, а) может работать как регулятор переменного напряжения, а также как контактор для включения и выключения электрической цепи переменного тока. Вместо двух тиристоров можно использовать симистор.

При рассмотрении принципа действия регулятора тиристоры принимаются идеальными в соответствии с **моделями ключей**. Импульсы управления тиристорами формируются системой управления (СУ) синхронно с сетевым напряжением $u(\vartheta)$ в определённой фазе, которая соответствует углу управления α (рис. 4.2).

Рассмотрим работу тиристорного регулятора с **активной нагрузкой**. На интервале $0 \div \pi$ прямое напряжение прикладывается к тиристоры $VS1$, а на интервале $\pi \div 2\pi$ – к тиристоры $VS2$. Поэтому при подаче импульса управления в соответствующий интервал тиристор включается. Момент подачи импульса обозначается *углом управления α , который отсчитывается от момента приложения прямого напряжения к тиристоры*. При включении тиристора $VS1$ в момент $\vartheta_1 = \alpha$ напряжение сети $u(\vartheta)$ прикладывается к нагрузке с сопротивлением R . Ток в цепи активной нагрузки i_H повторяет форму напряжения сети $u(t)$. В момент спада тока тиристора, соответствующий спаданию тока нагрузки до нуля, тиристор $VS1$ выключается. В момент $\vartheta = \pi + \alpha$ включается тиристор $VS2$ и ток нагрузки протекает в противоположную сторону. В момент 2π ток спадает до нуля и тиристор $VS2$ выключается. В дальнейшем процессы периодически повторяются (рис. 4.2).

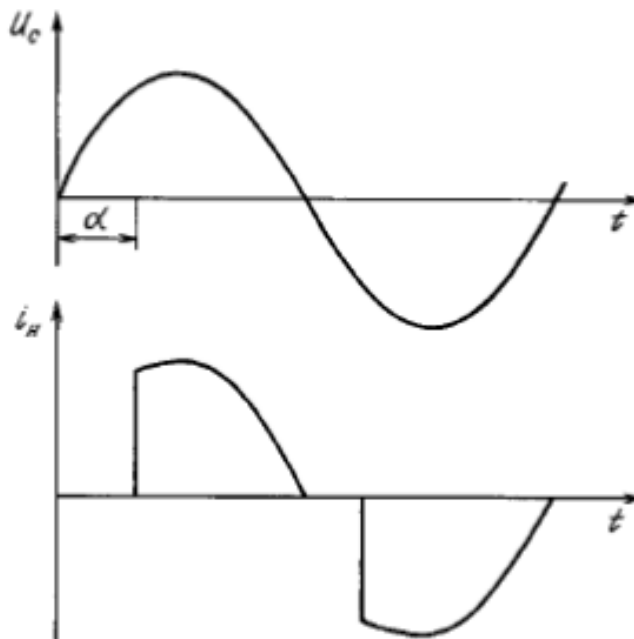


Рис. 4.2. Диаграммы тока и напряжения тиристорного регулятора переменного тока

Диапазон регулирования напряжения на активной нагрузке соответствует $0 \div \pi$. При подаче угла управления $\alpha > \pi$, условия для включения тиристоров не выполняются и напряжение сети не прикладывается к нагрузке и оно равно нулю.

Напряжение нагрузки $u_H(\vartheta)$ имеет несинусоидальную форму и в зависимости от величины угла управления α уровень высших гармоник возрастает.

Основной характеристикой регулятора является регулировочная характеристика, связывающая действующее значение напряжения нагрузки U_H и угол управления тиристора α . На вид характеристики оказывает влияние характер нагрузки. Запишем уравнение для определения действующего значения напряжения нагрузки U_H :

$$U_H = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U \sin \vartheta)^2 d\vartheta} = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}, \quad (4.1)$$

где U – действующее значение напряжения сети; $\vartheta = \omega t$ (ω – круговая частота напряжения сети).

Регулировочная характеристика показана на рис. 4.3. Максимальное значение ($\alpha = 0$) соответствует действующему значению напряжения сети, а при $\alpha = \pi$ равно нулю.

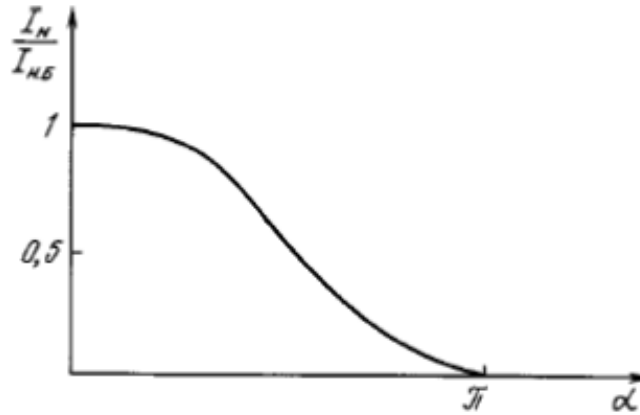


Рис. 4.3. Регулировочная характеристика тиристорного регулятора переменного тока при активной нагрузке

Активно-индуктивная нагрузка. Тиристорный регулятор и подключение нагрузки показано на рис. 4.1, а. В данном случае при включении тиристора возникает переходной процесс. Эквивалентная схема для расчёта тока приведена на рис. 4.3. Запишем уравнение:

$$u(t) = L \frac{di}{dt} + iR. \quad (4.2)$$

Решением данного уравнения будет:

$$i = i_{уст} + Ae^{pt}, \quad (4.3)$$

где $i_{уст}$ – установившееся значение тока; A – постоянная интегрирования; p – корень характеристического уравнения, равный в данном случае $-\frac{R}{\omega L}$.

Установившееся значение тока определяется как:

$$i_{уст} = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t - \varphi_H), \quad (4.4)$$

где $\varphi_H = \arctg \frac{\omega L}{R}$.

Для поиска постоянной интегрирования используется начальное условие $i(\alpha) = 0$.

$$i(\alpha) = 0 = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\alpha - \varphi_H) + Ae^{\frac{\alpha p}{\omega T}}. \quad (4.5)$$

$$i(\vartheta) = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left(\sin(\vartheta - \varphi_H) - \sin(\alpha - \varphi_H) e^{\frac{\alpha - \vartheta}{\omega T}} \right). \quad (4.6)$$

Для правильной работы схемы необходимо выбирать угол управления $\alpha \geq \varphi_H$. В ином случае ток в тиристоре не успевает пересекать нуль до подачи импульса управления на другой тиристор и схема работает в выпрямительном режиме.

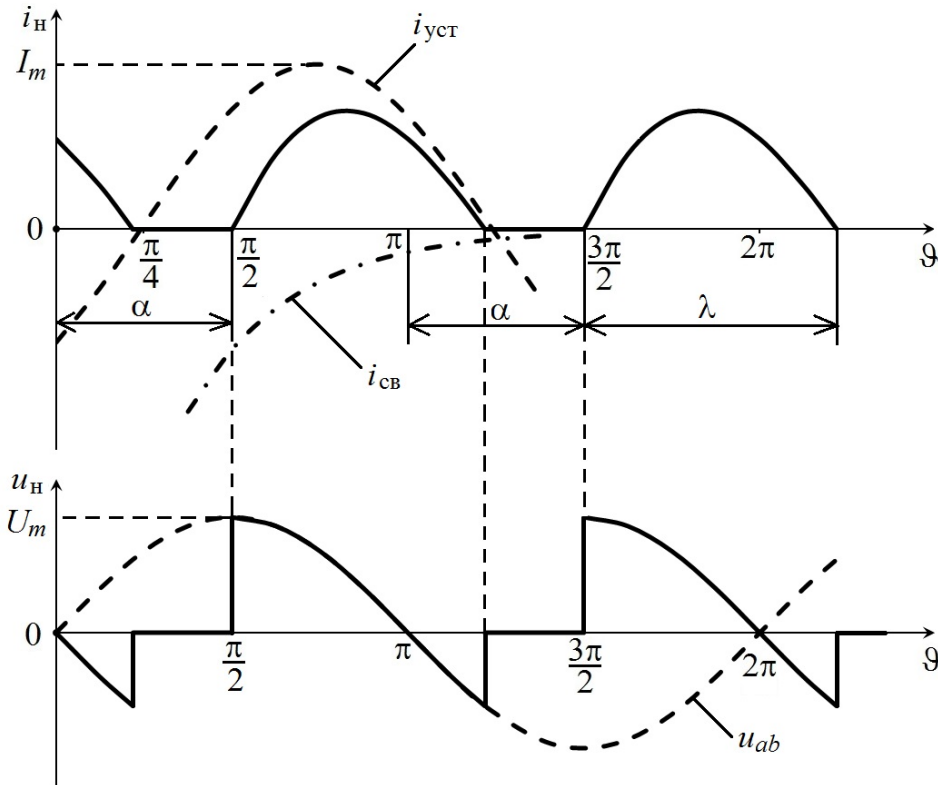


Рис. 4.4. Диаграммы тиристорного регулятора на активно-индуктивную нагрузку

Индуктивная нагрузка. В схеме тиристорного регулятора с дросселем в качестве нагрузки также возникает переходной процесс. Дифференциальное уравнение данной эквивалентной схемы:

$$u(t) = L \frac{di}{dt}. \quad (4.7)$$

Решение данного уравнения находится с помощью интегрирования левой и правой частей:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int \sqrt{2}U \sin(\vartheta) dt = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} \cdot \cos(\vartheta) + A. \quad (4.8)$$

Постоянная интегрирования A находится из начального условия $i(\alpha) = 0$:

$$i(\alpha) = 0 = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} + A \Rightarrow A = -\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}, \quad (4.9)$$

Запишем решение уравнения:

$$i(\vartheta) = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L}(\cos(\vartheta) - 1). \quad (4.10)$$

Для правильной работы схемы необходимо выбирать угол управления $\alpha \geq \pi/2$. В ином случае схема работает в выпрямительном режиме как сказано выше.

Для расчёта основной гармоники тока нагрузки используется формула:

$$I_1 = \frac{2}{\sqrt{2}\pi} I_m \left(\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right), \quad (4.11)$$

из которой видно, что с ростом угла α первая гармоника тока уменьшается, а следовательно увеличивается индуктивное сопротивление нагрузки.

На рисунке 4.5 приведена зависимость эквивалентной индуктивности $X_{\text{экр}}$ от угла α . По зависимости видно, что тиристорный регулятор с индуктивностью L_0 на выходе можно рассматривать как индуктивность, регулируемую системой электронного управления в диапазоне от $X_0 = \omega L_0$ до $X_{\text{экр}} = \infty$.

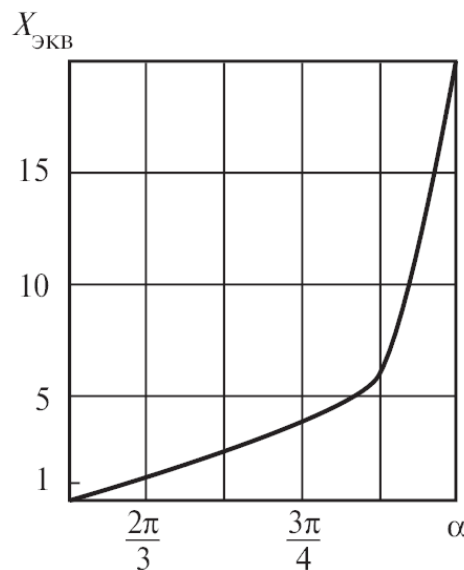


Рис. 4.5. Зависимость эквивалентного сопротивления индуктивности от угла управления α

Такая схема тиристорного регулятора получила широкое распространение в электроэнергетике для компенсации реактивной мощности в устройствах, состоящих из параллельно соединенных групп конденсаторов и дросселя со встречно-включенными тиристорами (рис. 4.1)

ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ

 [К СПИСКУ](#) 

 При исследовании каждой схемы требуется ввести данные опыта и нажать кнопку «Пуск», расположенную на панели инструментов в окне модели (рис. П3.1).

Рядом с исходными данными указаны размерности и диапазоны значений параметров. Время расчета обычно не превышает 10 сек. После окончания расчета в специальном поле, расположенном в нижней части окна модели, появляется информационное сообщение «Конечное время достигнуто».

А. Исследование тиристорного регулятора с активной нагрузкой

 Для проведения исследования необходимо открыть файл расчётной модели «LP4-VSpec.prt».

1

Выполнить моделирование схемы тиристорного регулятора с активной нагрузкой при угле управления $\alpha = (10 + 15 \cdot N)$ [градусы]°, **сохранить осциллограммы** (3 блока графиков).

 Параметры источника и нагрузки (U_m , R_n и L_n) задаются в свойствах блоков «напряжение», «сопротивление» и «индуктивность».

Угол управления задается в модели посредством соответствующего регулятора, для этого необходимо нажать кнопку «Инициализация» и выставить на шкале значение, нажать «Стоп».

Значение угла управления отображается в модели после окончания расчета модели.

2

Снять зависимости действующих и средних значений напряжения и тока, вычисленных за полупериод, а также амплитуды основной гармоники тока от угла управления (заполнить табл. 4.2).

Таблица 4.2. Характеристики регулятора при R -нагрузке

$\alpha, ^\circ$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
$U_d, \text{В}$										
$U_{cp}, \text{В}$										
$I_d, \text{А}$										
$I_{cp}, \text{А}$										
$I_{1m}, \text{А}$										

 Действующие значения тока (I_d) и напряжения на нагрузке (U_d) отображаются в модели как «Uд» и «Id» и выделены черным цветом, средние за полупериод значения (I_{cp} , U_{cp}) выделены синим цветом и обозначены как «Ucp» и «Icp», а амплитуды и начальные фазы основных гармоник тока и выходного напряжения выводятся как показания соответствующих блоков «Датчик».

 **Получить выражения** для среднего по модулю и действующего значений напряжения на нагрузке (определить их зависимости от угла управления при R -нагрузке).

По полученным формулам **рассчитать** среднее и действующее значения напряжения при значениях угла управления, представленных в табл. 4.2.

По результатам вычислений и данным табл. 4.2 требуется **построить графики** регулировочных характеристик – всего 2 графика:

1) теоретические и экспериментальные характеристики $U_d, U_{cp} = f(\alpha)$ (4 графика на одной координатной плоскости);

2) $I_d, I_{cp}, I_{1m} = f(\alpha)$ – все на втором графике.

Сопоставить экспериментальные характеристики с теоретическими зависимостями среднего и действующего значений напряжения от угла управления.

Сделать вывод о взаимосвязи амплитуды основной гармоники тока, его действующего значения и среднего значения за полупериод.

Б. Исследование регулятора с активно-индуктивной нагрузкой

3

Требуется исследовать два случая, предварительно рассчитав параметры нагрузки (индуктивность и сопротивление) по заданным значениям угла нагрузки φ и модуля сопротивления Z , указанным в табл. 4.3. Угол управления определяется в зависимости от угла нагрузки.

Для каждого опыта (в соответствии с табл. 4.3) сохранить осциллограммы.

Таблица 4.3. Параметры моделирования при RL -нагрузке

	φ , градусы	Z , Ом	L , мГн	R , Ом	α , градусы
Опыт 1	$\varphi_1 = 5 \cdot N$	$5 \cdot N$	L_1	R_1	$\alpha_1 = \varphi_1 + 10^\circ$
Опыт 2	$\varphi_2 = \varphi_1 + 25^\circ$	$5 \cdot N$	L_2	R_2	$\alpha_2 = \varphi_2 + 25^\circ$

4

Для схемы с параметрами из пункта 1 снять зависимости действующих и средних значений напряжения и тока, а также амплитуды основной гармоники тока от угла управления, изменяя его значение с шагом $15\text{--}20^\circ$, начиная с α_1 (заполнить табл. 4.4).

Таблица 4.4. Характеристики регулятора при RL -нагрузке

$\alpha, ^\circ$	α_1											180
$U_d, \text{В}$												
$U_{\text{ср}}, \text{В}$												
$I_d, \text{А}$												
$I_{\text{ср}}, \text{А}$												
$I_{1\text{м}}, \text{А}$												

5

Выполнить моделирование при $\alpha = \varphi_1$ и $\alpha = 0.5 \cdot \varphi_1$, **сохранить осциллограммы**.

 **Привести расчёт** индуктивности и сопротивления нагрузки в соответствии с табл. 4.3.

Получить выражения для среднего по модулю и действующего значений напряжения на нагрузке (определить их зависимости от угла управления при RL -нагрузке).

По полученным формулам **рассчитать среднее и действующее значения** напряжения при значениях угла управления, представленных в табл. 4.4.

По результатам вычислений и данным табл. 4.4 необходимо построить регулировочные характеристики – **3 графика**:

1) теоретические и экспериментальные зависимости $U_d, U_{cp} = f(\alpha)$ (4 графика на одной координатной плоскости);

2) $U_d, U_{cp} = f(\alpha)$ для случаев R -нагрузки (по данным табл. 4.2) и RL -нагрузки – совместить 4 зависимости;

3) $I_d, I_{cp}, I_{1m} = f(\alpha)$ для случаев R -нагрузки (по данным табл. 4.2) и RL -нагрузки – 6 характеристик на отдельной координатной плоскости.

Сопоставить экспериментальные характеристики с построенными теоретическими зависимостями.

Сравнить осциллограммы тока и напряжения при активной и активно-индуктивной нагрузках, а также соответствующие регулировочные характеристики и сделать вывод о влиянии характера нагрузки и угла управления на работу тиристорного регулятора.

В. Исследование регулятора с индуктивной нагрузкой

6

Исследование проводится при значении индуктивности, соответствующем заданному сопротивлению катушки: $X_L = 5 \cdot N$ Ом. Необходимо выполнить моделирование и **сохранить осциллограммы** при $R = 0$ и $\alpha = (100 + 5 \cdot N)^\circ$; 90° ; 45° .

7

Снять зависимости указанных значений тока от угла α (заполнить табл. 4.5).

Таблица 4.5. Регулировочные характеристики при L -нагрузке

$\alpha, ^\circ$	90	105	120	135	150	165	180
I_d, A							
I_{cp}, A							
I_{1m}, A							
$X_{экв}, Ом$							
$Q, вар$							

 **Привести расчёт** эквивалентного индуктивного сопротивления схемы и реактивной мощности, результаты записать в табл. 4.5.

По данным табл. 4.5 необходимо **построить регулировочные характеристики – всего 3 графика:**

- 1) $I_d, I_{cp}, I_{1m} = f(\alpha)$ – совместить 3 характеристики;
- 2) $X_{экв} = f(\alpha)$;
- 3) $Q = f(\alpha)$.

Сравнив полученные зависимости с аналогичными характеристиками, построенными при активной и активно-индуктивной нагрузками, и, проанализировав осциллограммы тока и напряжения, **сформулировать вывод** об особенностях работы тиристорного регулятора в случае индуктивной нагрузки.

Г. Исследование компенсатора реактивной мощности (КРМ)

 Необходимо открыть файл расчётной модели «ЛР4-КРМ».

8

Исследование проводится при активно-ёмкостной нагрузке, когда сопротивление и конденсатор соединены параллельно. Параметры нагрузки вычисляются по углу нагрузки ($\varphi_n = 8 \cdot N$ [градусы]) и модулю сопротивления ($Z_n = 5 \cdot N$ [Ом]), которая соответствует сопротивлению $X_L = 5 \cdot N$ [Ом].

 Значения сопротивления и ёмкости нагрузки («RN» [Ом] и «CN» [мкФ]), а также индуктивности (L_{reg} [мГн]) задаются в свойствах блоков «индуктивность КРМ», «сопротивление» и «ёмкость».

После задания параметров нагрузки необходимо выполнить моделирование и сохранить осциллограммы для трёх случаев:

- 1) Режим максимального тока компенсатора (угол $\alpha = 90^\circ$);
- 2) Режим полной компенсации реактивной мощности нагрузки, при котором начальная фаза основной гармоники тока источника находится в пределах $\pm 1^\circ$ (добиться посредством увеличения угла управления до требуемого значения α^*);
- 3) Режим потребления реактивной мощности из сети ($90^\circ < \alpha < \alpha^*$).

Для каждого случая требуется записать действующее значение тока КРМ, амплитуды тока нагрузки и основных гармоник токов компенсатора и сети, а также начальную фазу основной гармоники тока источника (заполнить табл. 4.6).

 Амплитуды и начальные фазы тока нагрузки, основных гармоник токов дросселя компенсатора и источника ($I_{н.m}$, $I_{кpm.1m}$, $I_{ист.1m}$) выводятся при помощи датчиков. Действующее значение тока дросселя (компенсатора) отображается как «Iкрм_д».

На осциллографы выведены напряжение источника, импульсы управления тиристорами, ток сети и его основная гармоника, ток нагрузки и его реактивная составляющая, ток компенсатора и его основная гармоника.

Таблица 4.6. Регулирование реактивной мощности сети

	α , гр.	$I_{кpm.д}^*$ А	$I_{кpm.1m}$ А	$Q_{кpm}$ вар	$I_{н.m}$, А	Q_n , вар	$I_{ист.1m}$ А	φ_C , гр	$Q_{ист}$ вар
1	90°								
2									
3									

 Привести расчёт ёмкости и сопротивления нагрузки, а также реактивных мощностей нагрузки, компенсатора и источника, результаты записать в табл. 4.6.

По данным таблицы 4.6 для случая полной компенсации реактивной мощности нагрузки необходимо **построить векторную диаграмму токов** (показать векторы токов нагрузки, компенсатора и источника, соблюдая масштаб).

Проанализировав осциллограммы токов нагрузки, компенсатора и источника, **сделайте вывод** о влиянии угла управления тириستоров на регулирование реактивной мощности сети.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

 [К СПИСКУ](#) 

 Вопросы и задания разделены на два блока.

БЛОК А содержит базовые вопросы и задания, **требующие мгновенного ответа**. Без понимания и знаний ответов на эти задачи считается, что не возможно в достаточной степени усвоить теоретический материал по теме лабораторной работы, а также невозможно осуществить правильный анализ полученных графиков и зависимостей, полученных в результате обработки данных и составления отчета. При правильном ответе на вопрос/задание из **БЛОКА А**, студент допускается к **БЛОКУ Б**.

БЛОК Б содержит вопросы и задания, которые подразумевают объяснение теоретического материала, анализа и объяснения полученных результатов и требуют использование отчета. Допускается давать некоторое время для подготовки.

БЛОК А

1. Нарисуйте вольт-амперную характеристику тиристора.
2. Что такое угол управления α ? От какого момента он отсчитывается?
3. Назовите условия включения и выключения диода.
4. Назовите условия включения и выключения тиристора.
5. Запишите формулы для расчета среднего и действующего значений.
6. В каком диапазоне следует подавать угол управления в тиристорном регуляторе при активной, активно-индуктивной, индуктивной нагрузках?
7. Нарисуйте график напряжения на активной нагрузке при заданном угле управления ($\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ и др.).
8. Какой формы напряжение на активной нагрузке в случае угла управления $\alpha > 180^\circ$?
9. Что такое угол нагрузки?
10. Объясните работу регулятора со встречно-параллельными ключами при угле управления α меньше угла нагрузки φ_n .
11. Какие составляющие в токе при активно-индуктивной нагрузке?
12. Что такое полная, активная, реактивная мощности?
13. Что означают положительная и отрицательная реактивная мощности?
14. Какие достоинства и недостатки компенсатора реактивной мощности на встречно-параллельных тиристорах по сравнению с компенсацией с помощью включения группы конденсаторов?
15. С какой целью параллельно компенсатора реактивной мощности на встречно-параллельных тиристорах устанавливается конденсатор?

БЛОК Б

1. Объясните принцип работы регулятора на встречно-параллельных тиристорах при работе на активную нагрузку, используя графики из отчёта.
2. Объясните принцип работы регулятора на встречно-параллельных тиристорах при работе на активно-индуктивную нагрузку, используя графики из отчёта.
3. Объясните принцип работы регулятора на встречно-параллельных тиристорах при работе на индуктивную нагрузку, используя графики из отчёта.
4. Объясните регулировочные характеристики при активной и активно-индуктивной нагрузках.
5. Что такое эквивалентное сопротивление $X_{\text{экв}}$? Как оно изменяется в зависимости от угла управления α ?
6. Что такое реактивная мощность? Как рассчитать реактивную мощность регулятора на встречно-параллельных тиристорах?
7. Объясните принцип компенсации реактивной мощностью с помощью конденсаторов и с помощью компенсатора реактивной мощности на встречно-параллельных тиристорах.
8. Построить график и рассчитать действующее значение напряжения на активной нагрузке в схеме с регулятором на встречно-параллельных тиристорах при $U = 220 \text{ В}$, $R = 5 \text{ Ом}$ с углами управления (на выбор преподавателя):
 $\alpha = 30^\circ, \alpha = 60^\circ, \alpha = 90^\circ, \alpha = 120^\circ$ и др.
9. Построить график и рассчитать среднее значение тока тиристора при $U = 220 \text{ В}$, $R = 5 \text{ Ом}$ с углами управления (на выбор преподавателя):
 $\alpha = 30^\circ, \alpha = 45^\circ, \alpha = 60^\circ, \alpha = 90^\circ, \alpha = 120^\circ$ и др.
10. Построить график и рассчитать действующее значение напряжения на активной нагрузке в схеме с регулятором на встречно-параллельных тиристорах при $U = 220 \text{ В}$, $R = 5 \text{ Ом}$ и при разных углах управления тиристоры: $\alpha_{VS1} = 30^\circ, \alpha_{VS2} = 60^\circ$.
11. Рассчитайте максимальную реактивную мощность компенсатора реактивной мощности на тиристорах при $U = 220 \text{ В}$, $L = 1,5 \text{ мГн}$.
12. Другие вопросы на усмотрение преподавателя, ведущего занятия.

Приложение 1. Повторение теоретического материала



Законы коммутации

Первый закон (правило) коммутации: *ток через индуктивный элемент L до коммутации равен току после коммутации или ток в индуктивном элементе скачком не меняется:*

$$i_{L(0_-)} = i_{L(0_+)} \quad (\text{П1.1})$$

Второй закон (правило) коммутации: *напряжение на конденсаторе C до коммутации равно напряжению после коммутации или напряжение на конденсаторе скачком не меняется:*

$$u_{C(0_-)} = u_{C(0_+)} \quad (\text{П1.2})$$

Взаимосвязь токов и напряжений на сопротивлении, катушке и конденсаторе

Закон Ома:

$$u_R = i_R R \quad (\text{П1.3})$$

Дифференциальная зависимость тока и напряжения на катушке L :

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{П1.4})$$

Дифференциальная зависимость тока и напряжения на конденсаторе C :

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad (\text{П1.5})$$

Выражения (П1.4) и (П1.5) можно записать через интеграл:

$$i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt, \quad u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt \quad (\text{П1.6})$$

Дифференциальные зависимости поясняют законы коммутации. Так как при коммутации $dt \rightarrow 0$, соответственно при любом изменении тока в уравнении (П1.4) $u_L \rightarrow \infty$ и соответственно при любом изменении напряжения в уравнении (П1.5) $i_C \rightarrow \infty$.

Расчёт переходных процессов. Типовые схемы

Коммутация активной нагрузки

При коммутации в электрической цепи чисто активной нагрузки переходных процессов не возникает. На рисунке [П1.1](#) изображены два дуальных случая коммутации активной нагрузки с источником тока и источником напряжения.

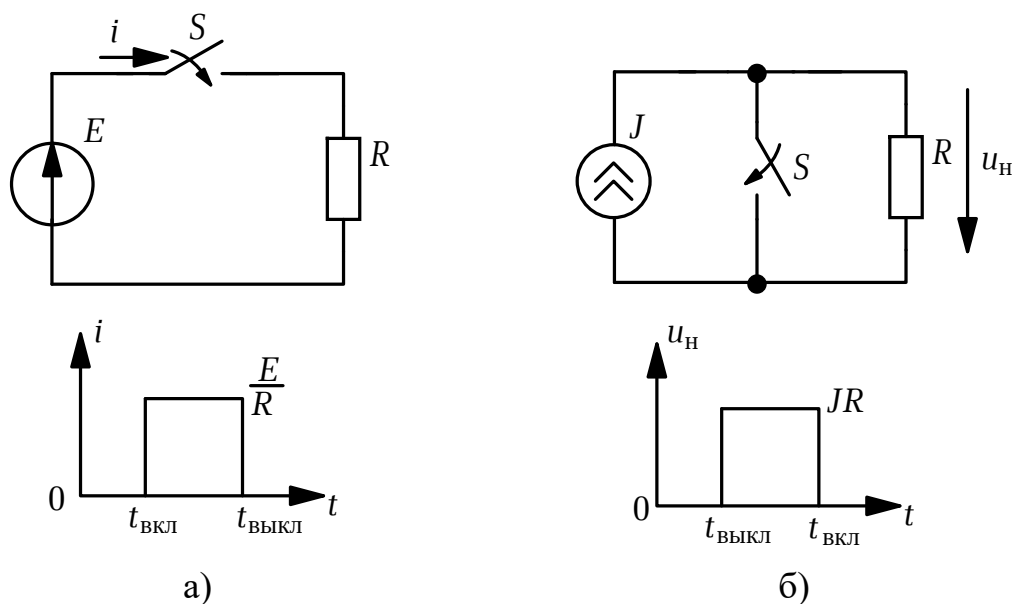


Рис. П1.1. Коммутация активной нагрузки ($t_{\text{вкл}}$ – момент включения, $t_{\text{выкл}}$ – момент выключения): а – с источником напряжения; б – с источником тока

Коммутация чисто реактивной нагрузки

На рисунке [П1.2](#) изображены два дуальных случая коммутации чисто реактивного элемента постоянным источником напряжения и источником тока. Диод VD является вспомогательным и его отсутствие приведет к некорректной задаче в случае решения задачи с идеальными элементами. В реальном случае при отключении катушки индуктивности возникнет перенапряжение на ключе (рис. [П1.2, а](#)), а при включении ключа на рис. [П1.2, б](#) к току короткого замыкания в нем.

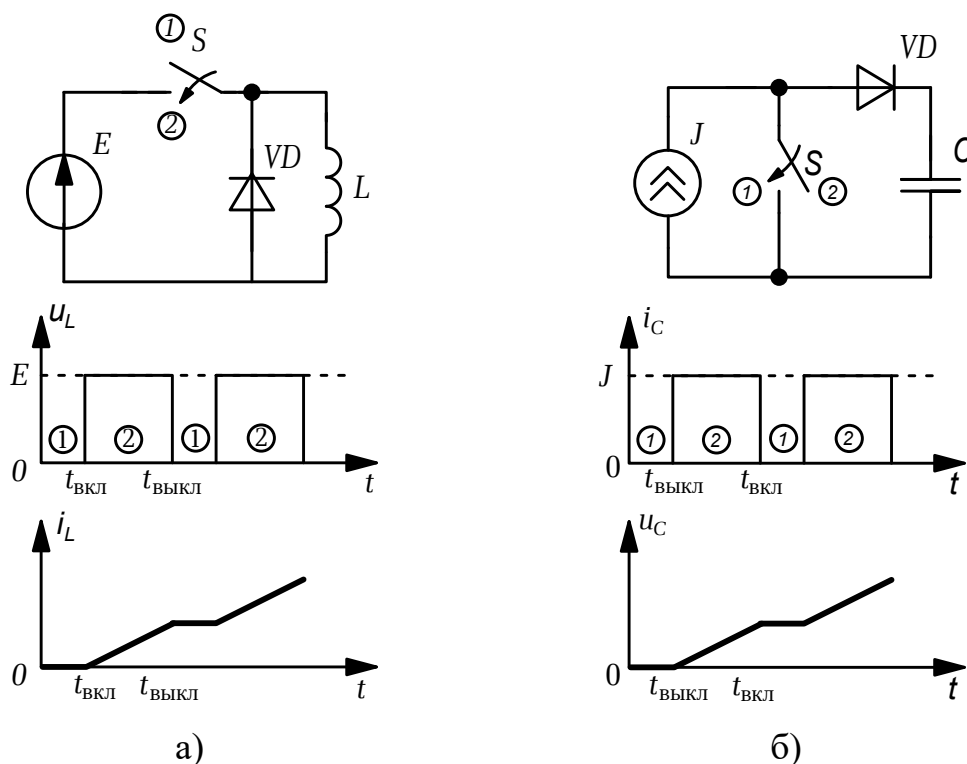


Рис. П1.2. Коммутация чисто реактивной нагрузки:
а – коммутация L ; б – коммутация C

Для схемы на рисунке П1.2, а ток нагрузки i_L при коммутации в момент времени $t_{\text{ВКЛ}}$ определяется следующим образом:

$$E = L \frac{di_L}{dt}, \quad i_L = \frac{E}{L}t + A = \frac{E}{L}t, \quad (\text{П1.7})$$

где A – постоянная интегрирования.

При отключении ключа в момент времени $t_{\text{ВЫКЛ}}$ ток катушки замыкается через диод VD . Так как активного сопротивления в контуре нет, то ток на всем протяжении времени выключенного состояния ключа остается неизменным. В следующий момент времени включения ключа ток в катушке продолжает возрастать. При расчете тока постоянная интегрирования из уравнения (П1.7) не равна нулю.

Для схемы на рисунке П1.2, б при отключении ключа в момент времени $t_{\text{ВЫКЛ}}$ напряжение на конденсаторе u_C определяется следующим образом:

$$J = C \frac{du_C}{dt}, \quad u_C = \frac{J}{C} \cdot t + A = \frac{J}{C} \cdot t, \quad (\text{П1.8})$$

где A – постоянная интегрирования.

При включении ключа в момент времени $t_{\text{ВКЛ}}$ диод VD блокирует разряд конденсатора, и на всем протяжении включенного состояния ключа напряжение конденсатора не меняется. В следующий момент выключения ключа напряжение на конденсаторе возрастает. При расчете тока постоянная интегрирования из уравнения (П1.8) не равна нулю.

Расчёт переходных процессов с активно-реактивным сопротивлением. Тип 1

Рассмотрим коммутацию параллельной RL -нагрузки и дуальную ей схему с источником тока и RC -нагрузкой (рис. П1.3). Переходные процессы в данных схемах являются по сути совмещением решений двух ранее рассматриваемых схем коммутаций.

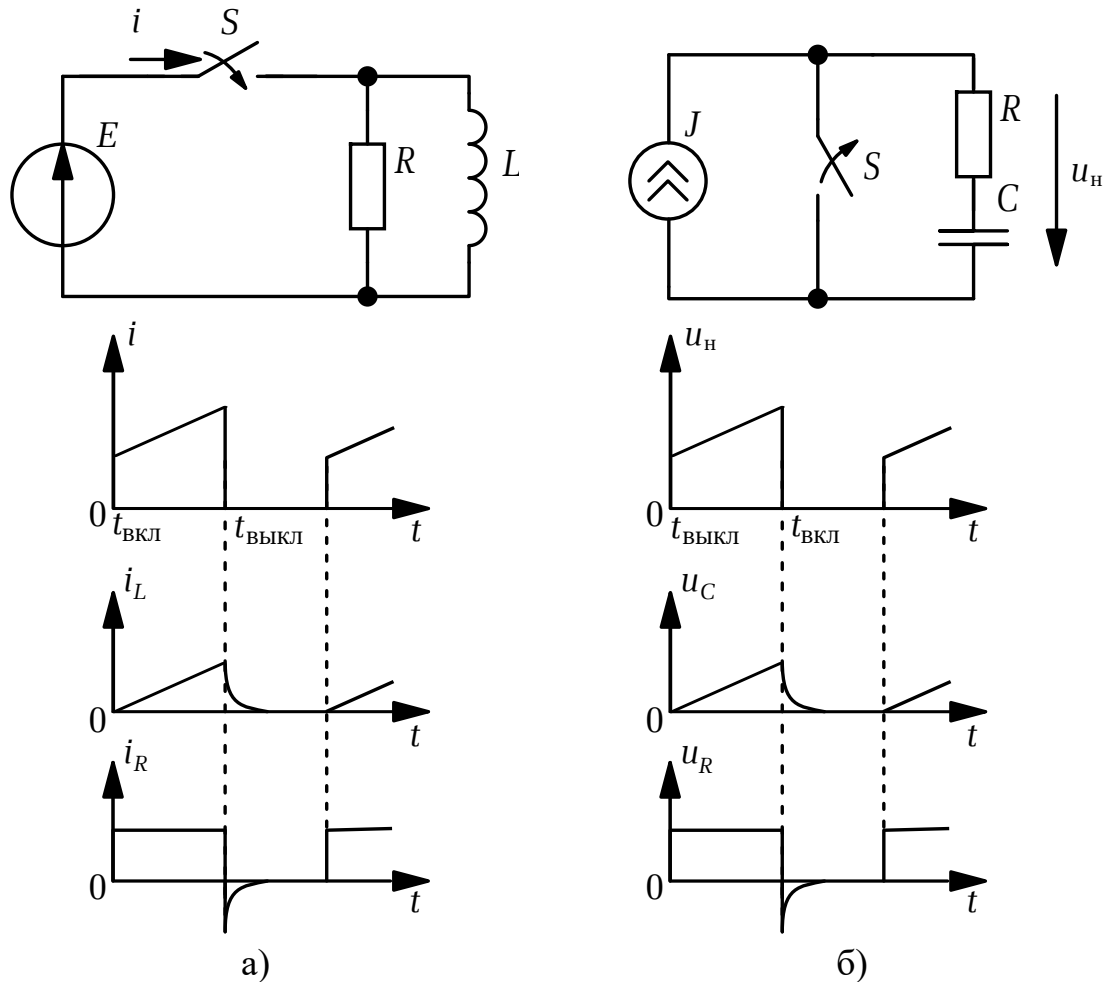


Рис. П1.3. Коммутация параллельной RL -нагрузки (а)
и последовательной RC -нагрузки (б)

Рассмотрим решение схемы на рис. П1.3, а:

$$\begin{aligned}
 i &= i_R + i_L; \\
 i_R &= \frac{E}{R}; \\
 i_L &= \frac{1}{L} \int E \, dt = \frac{E}{L} \cdot t + A; \\
 i &= \frac{E}{R} + \frac{E}{L} \cdot t.
 \end{aligned} \tag{П1.9}$$

На втором интервале времени катушка размагничивается через активное сопротивление по экспоненте.

Аналогичным будет решение схемы на рис. П1.3, б:

$$\begin{aligned}u_{\text{н}} &= u_R + u_C; \\u_R &= J \cdot R; \\u_C &= \frac{1}{C} \int J \, dt = \frac{J}{C} \cdot t + A; \\u_{\text{н}} &= J \cdot R + \frac{J}{C} \cdot t.\end{aligned}\tag{П1.10}$$

На втором интервале конденсатор разряжается через R по экспоненциальному закону.

Расчёт переходных процессов с активно-реактивным сопротивлением. Тип 2

Рассмотрим схему с коммутацией последовательно соединенной RL -нагрузки и схему коммутации с дуальными ей процессами при параллельной RC -нагрузки (рис. П1.4). Для решения составим дифференциальное уравнение:

$$E = L \frac{di}{dt} + iR.\tag{П1.11}$$

Решением данного уравнения будет:

$$\begin{aligned}i &= I_{\text{уст}} + A \cdot e^{pt}; \\i &= \frac{E}{R} + A \cdot e^{pt}.\end{aligned}\tag{П1.12}$$

Для поиска постоянной интегрирования A используем начальное условие $i_{L(0_-)} = i_{L(0_+)}$ или $i(0) = 0$:

$$i(0) = 0 = \frac{E}{R} + A \cdot e^0 \Rightarrow A = -\frac{E}{R}.\tag{П1.13}$$

Подставим найденную постоянную интегрирования и запишем решение:

$$i = \frac{E}{R}(1 - e^{pt}).\tag{П1.14}$$

Аналогично можно найти и решение, когда ключ выключен. В этом случае $E = 0$, а постоянная интегрирования будет равна значению тока.

$$\begin{aligned}J &= i_C + i_R; \\J &= C \frac{du_{\text{н}}}{dt} + \frac{u_{\text{н}}}{R}.\end{aligned}\tag{П1.15}$$

Решением данного уравнения будет:

$$\begin{aligned} u_H &= U_{H \text{ уст}} + A \cdot e^{pt}; \\ u_H &= J \cdot R + A \cdot e^{pt}. \end{aligned} \quad (\text{П1.16})$$

Для поиска постоянной интегрирования A используем начальное условие $u_{C(0_-)} = u_{C(0_+)}$ или $u_{H(0)} = 0$:

$$u_{H(0)} = 0 = J \cdot R + A \cdot e^0 \Rightarrow A = -J \cdot R. \quad (\text{П1.17})$$

Подставим найденную постоянную интегрирования и запишем решение:

$$u_H = J \cdot R(1 - e^{pt}). \quad (\text{П1.18})$$

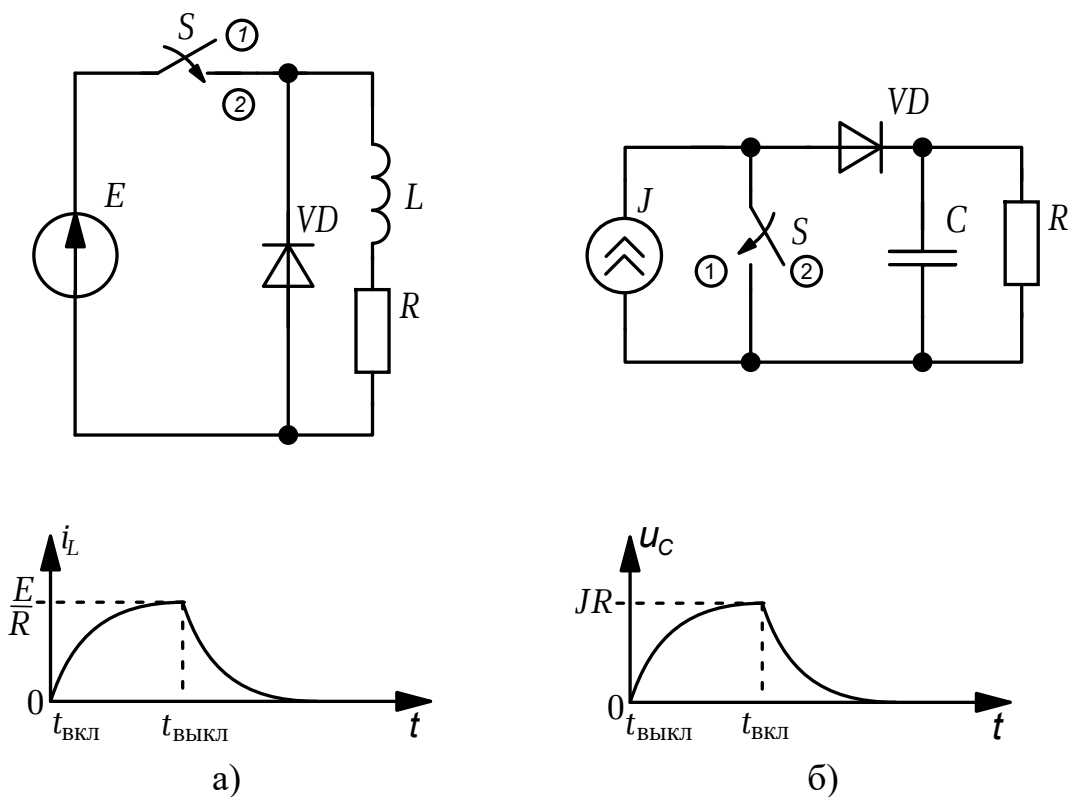


Рис. П1.4. Коммутация последовательной RL -нагрузки (а) и параллельной RC -нагрузки (б)

Расчёт определённых интегралов

В данных лабораторных расчёт определённых интегралов необходим для расчётов средних и действующих значений.

Для расчёта определённого интеграла необходимо иметь навык вычисления первообразной функции. В таблице [П1.1](#) приведены наиболее часто встречаемые функции для расчёта первообразной для неопределённого интеграла. Постоянная C равна значению функции $f(x)$ в начальный момент, т.е. $f(0) = C$.

Таблица П1.1. Таблица первообразных

	Интеграл от $f(x)$	Значение $F(x)$		Интеграл от $f(x)$	Значение $F(x)$
1	$\int k dx$	$a \cdot x + C$	5	$\int \sin(x) dx$	$-\cos(x) + C$
2	$\int x dx$	$\frac{x^2}{2} + C$	6	$\int \cos(x) dx$	$\sin(x) + C$
3	$\int x^2 dx$	$\frac{x^3}{3} + C$	7	$\int e^x(x) dx$	$e^x + C$
4	$\int x^3 dx$	$\frac{x^4}{4} + C$	8	$\int \frac{1}{x} dx$	$\ln x + C$

Для вычисления определённого интеграла используют формулу **Ньютона-Лейбница**:

$$\int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a), \quad (\text{П1.19})$$

где $F(x)$ – первообразная функции $f(x)$.

Примеры расчёта

Пример 1.

$$\int_0^\pi \sin(\omega t) d\omega t = -\cos(\omega t) \Big|_0^\pi = -(\cos(\pi) - \cos(0)) = 2. \quad (\text{П1.20})$$

Пример 2.

$$\int_0^2 x dx = \frac{x^2}{2} \Big|_0^2 = \frac{2^2}{2} - 0 = 2. \quad (\text{П1.21})$$

Пример 3.

$$\begin{aligned} \int_0^\pi \sin^2(\omega t) d\omega t &= \int_0^\pi \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} d\omega t = \\ &= \frac{1}{2}(\pi - 0) - (-\sin(2\pi) + \sin(2 \cdot 0)) = \frac{\pi}{2} + 0 - 0 = \frac{\pi}{2}. \end{aligned} \quad (\text{П1.22})$$

Расчёт средних и действующих значений

Среднее значение для функции $i(t)$ вычисляется по формуле:

$$I_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d\omega t, \quad (\text{П1.23})$$

где $i(\omega t)$ – мгновенное значение функции; T – период.

Действующее значение для функции $i(t)$ в общем виде определяется:

$$I_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2(\omega t) d\omega t}. \quad (\text{П1.24})$$

Основные моменты при вычислении значений:

- расчёт среднего и действующего значения является математическим вычислением, поэтому не имеет значения для тока или для напряжения осуществляется расчёт;
- действующее и среднее значение – это **число** (скалярное значение), а не функция от времени и угла;
- обычно задаются значения в радианах (или в градусах), поэтому используется функция $i(\omega t)$ и интегрируют ее по $d\omega t$ (или $i(\vartheta)$ и $d\vartheta$);
- иногда период функции равен π ;
- если на интервалах функция разная, то используют свойство интеграла: интеграл суммы равен сумме интегралов;
- если функция не сложная, то среднее значение в ряде случаев можно вычислить на основе определения интеграла, что интеграл – это площадь под фигурой (пример);
- если функция имеет нулевые участки, их можно не включать в интеграл, так как на этих промежутках интеграл равен нулю.

Пример

Рассчитать среднее и действующее значения тока, заданного на рис. П1.5.

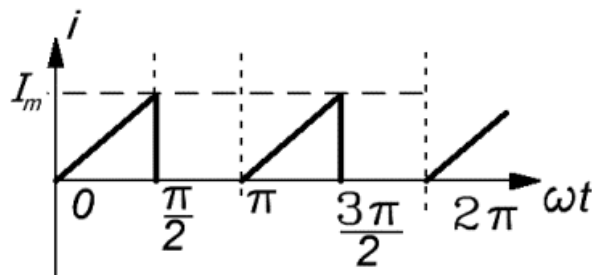


Рис. П1.5. График для расчёта среднего и действующего значений

Среднее значение можно найти двумя способами: аналитическим и графическим. Чтобы рассчитать среднее значение аналитическим способом, необходимо записать в аналитическом виде $i(\omega t)$. Заданный ток представляет собой кусочно-линейную функцию, описываемую уравнением $y = kx + b$. В данном случае достаточно записать функцию на одном интервале, например, на $\omega t \in [0, \frac{\pi}{2}]$:

$$\begin{cases} 0 = kx + b \\ I_m = k\pi/2 + b \end{cases}; \quad \begin{cases} b = 0 \\ k = 2I_m/\pi \end{cases} \Rightarrow i(\omega t) = \frac{2I_m}{\pi}\omega t. \quad (\text{П1.25})$$

Период функции равен π , поэтому:

$$\begin{aligned} I_{\text{cp}} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i(\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{2I_m}{\pi} \cdot \omega t d\omega t = \\ &= \frac{2I_m}{\pi} \cdot \left(\frac{(\pi/2)^2}{2} - 0 \right) = \frac{I_m}{4}. \end{aligned} \quad (\text{П1.26})$$

Или вычислить через площадь под графиком, что в данном случае более просто:

$$I_{\text{cp}} = \frac{1}{\pi} S_{\triangle} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2} \cdot I_m \cdot \frac{\pi}{2} \right) = \frac{I_m}{4}. \quad (\text{П1.27})$$

Определим действующее значение:

$$\begin{aligned} I_{\text{д}} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i^2(\omega t) d\omega t} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{2I_m}{\pi} \cdot \omega t \right)^2 d\omega t} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \frac{4I_m^2}{\pi^2} \left(\frac{(\pi/2)^3}{3} - 0 \right)} = \frac{I_m}{\sqrt{6}}. \end{aligned} \quad (\text{П1.28})$$

Идеализированные модели полупроводниковых ключей

Для анализа принципа работы силовой схемы рассматривают два состояния полупроводниковых ключей – включенное и выключенное. Упрощенную модели ключей показаны на рис. П1.6.



Рис. П1.6. Замена ключа в включенном состоянии (а) и в выключенном состоянии (б)

Полупроводниковые ключи проводят ток только в одну сторону, к диоду и тиристорам можно прикладывать обратное напряжение. Идеальные вольт-амперные характеристики (ВАХ) полупроводниковых ключей показаны на рис. П1.7.

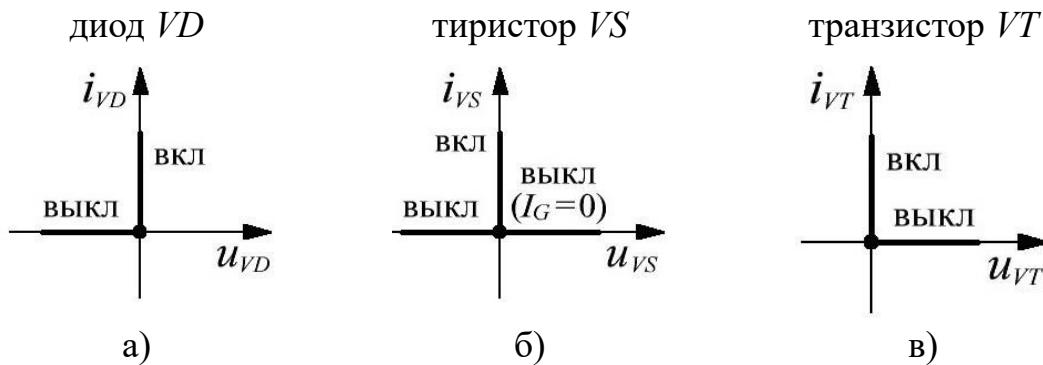


Рис. П1.7. Идеализированные вольт-амперные характеристики: а – диода; б – тиристора; в – транзистора

Спектральный анализ

Для количественной оценки несинусоидальности токов и напряжений используют разложение в спектр с помощью ряда Фурье. С помощью спектра можно количественно оценить степень отклонения формы от синуса основной гармоники.

Для оценки качества гармонического состава несинусоидального сигнала используют коэффициент гармоник K_H или THD (*Total Harmonic Distortion*):

$$K_H = THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}, \quad (\text{П1.29})$$

где I_n – действующее значение n -й гармонической составляющей тока; I_1 – действующее значение основной гармоники тока.

В *SimInTech* в блоке «Временной график» при нажатии ПКМ в поле выведенного графика выбрать «Анализ данных – Спектральный анализ». Для правильного отображения спектра необходимо предварительно подготовить график, ограничив диапазон данных периодом или несколькими периодами. На рисунке П1.8 показано окно спектрального анализа. Основными настройками вывода спектра являются: частота первой гармоники (обычно 50 Гц), количество гармоник (128 в случае, когда частота модуляции сигнала ШИМ до 5 кГц), источник данных (график для вычисления спектра). Рекомендуется установить галочки на «Сканировать с конца диапазона» и «Показать только пиковые». В меню «Рассчитываемая величина» можно выбрать абсолютную величину, относительную и др. Кроме спектра также выводится ряд значений, таких как действующее и среднее значения, коэффициент гармоник (*THD*), максимальная амплитуда (обычно соответствует амплитуде основной гармоники) и др. Вместо спектрального анализа можно выбрать табличный просмотр для отображения спектрального состава сигнала в табличном виде, однако данное отображение не позволяет оперативно оценить спектр.

Параметры спектрального анализа		Тип графика																			
Частота первой гармоники, Гц		Столбчатая диаграмма																			
50																					
Количество гармоник (степень 2)		Частотная шкала																			
1024		Линейная																			
Источник данных		Шкала величины																			
График		Линейная																			
☒ Сканировать с конца диапазона		Рассчитанные параметры сигнала																			
Метод интерполяции данных		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Параметр</th> <th>Значение</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RMS по отсчётам</td> <td>350.206177540114</td> </tr> <tr> <td>RMS по спектру</td> <td>350.205550462464</td> </tr> <tr> <td>Среднее</td> <td>0.226806818062146</td> </tr> <tr> <td>Постоянная</td> <td>0.226806818062658</td> </tr> <tr> <td>КГ(макс.гarm-ка),%</td> <td>43.5697363169234</td> </tr> <tr> <td>Макс. амплитуда</td> <td>454.041098044803</td> </tr> <tr> <td>Частота макс.гarm-к</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>КГ(1-я гarm-ка),%</td> <td>43.5697363169234</td> </tr> </tbody> </table>		Параметр	Значение	RMS по отсчётам	350.206177540114	RMS по спектру	350.205550462464	Среднее	0.226806818062146	Постоянная	0.226806818062658	КГ(макс.гarm-ка),%	43.5697363169234	Макс. амплитуда	454.041098044803	Частота макс.гarm-к	50	КГ(1-я гarm-ка),%	43.5697363169234
Параметр	Значение																				
RMS по отсчётам	350.206177540114																				
RMS по спектру	350.205550462464																				
Среднее	0.226806818062146																				
Постоянная	0.226806818062658																				
КГ(макс.гarm-ка),%	43.5697363169234																				
Макс. амплитуда	454.041098044803																				
Частота макс.гarm-к	50																				
КГ(1-я гarm-ка),%	43.5697363169234																				
Фильтр паразитных гармоник		Пересчитать																			
Без фильтра																					
Отн. частота среза	Порядок фильтра																				
0.5	10																				
Тип временного окна фильтрации																					
Прямоугольное																					
Рассчитываемая величина																					
Абсолютная амплитуда																					
☒ Показать только пиковые																					

Рис. П1.8. Скриншот окна настроек для спектрального анализа сигнала

На рисунке П1.9 приведен пример спектрального состава сигнала идеального синусоидального напряжения сети. В спектре отображается один столбец на частоте 50 Гц с амплитудой 310 В.

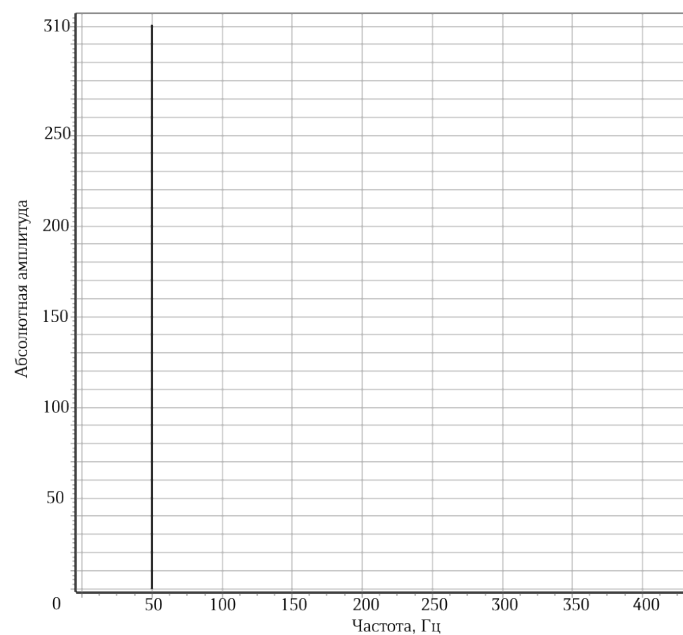
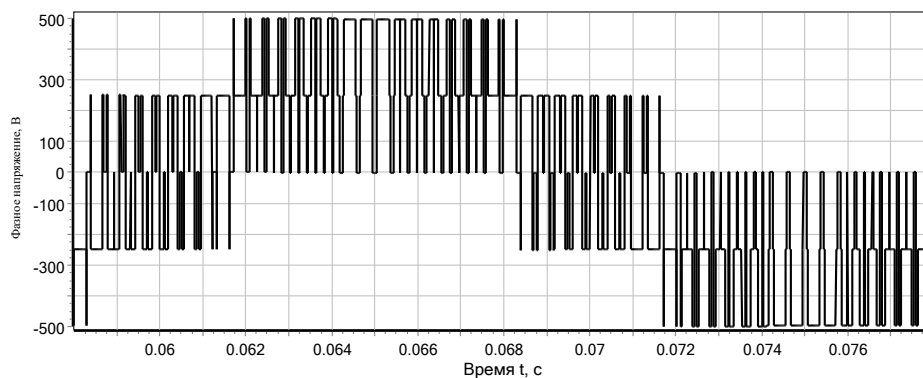
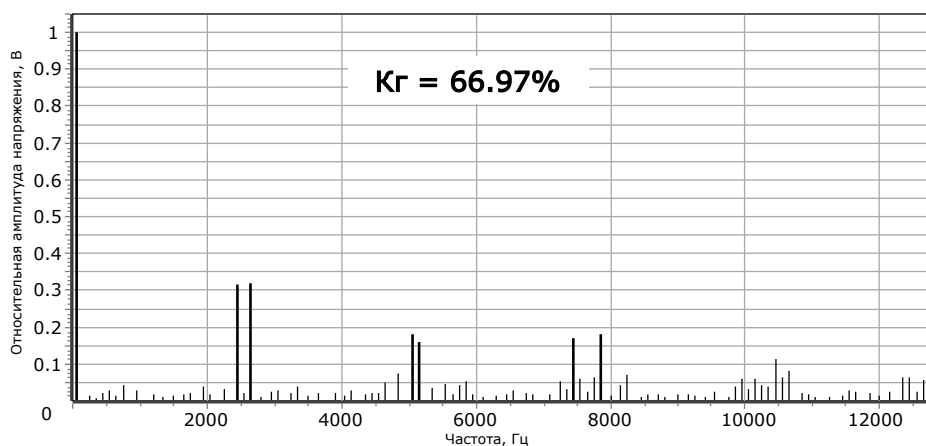


Рис. П1.9. Спектральный состав идеального синуса

На рисунке **П1.10** приведен спектральный состав выходного напряжения трехфазного инвертора с единичным коэффициентом модуляции.



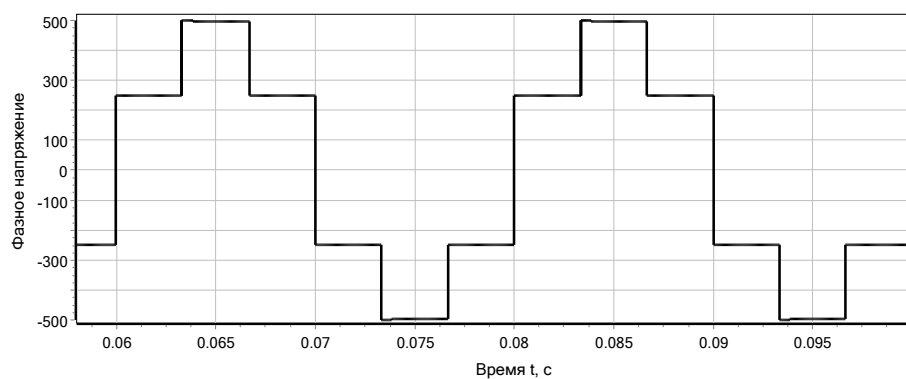
а)



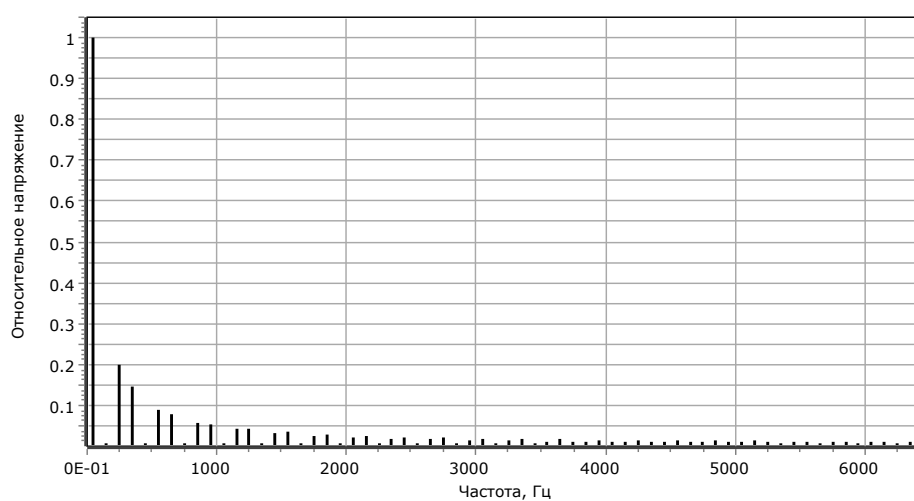
б)

Рис. П1.10. Напряжение на выходе трехфазного инвертора (а) и его спектральный состав (б)

На рисунке П1.11 приведён спектральный состав выходного напряжения трёхфазного инвертора с максимальной перемодуляцией (аналогичное без использования ШИМ-модуляции).



а)



б)

Рис. П1.11. Напряжение на выходе трехфазного инвертора при отсутствии ШИМ-модуляции(а) и его спектральный состав (б)

Приложение 2. Оформление отчёта

 [К СПИСКУ](#) 

 Шаблон титульного листа размещен в папке электронного курса: «Допол_мат / Отчет_Шаблон.docx»

1. Отчёт содержит титульный лист, на котором должны быть указаны: сокращённые наименования вуза и кафедры, название дисциплины, номер и название выполненной работы; группа и номер бригады; фамилии студентов и преподавателя.
2. Отчёт **должен содержать**:
 - *цель работы*;
 - *краткое содержание работы и описание исследуемых схем*;
 - *данные для каждого опыта, результаты измерений (таблицы данных) и требуемые осциллограммы, размер которых следует отредактировать таким образом, чтобы хорошо читались значения, использовать всю ширину листа*;
 - *выполненные задания и выводы по каждому опыту (в соответствии с заданием)*.
3. При оформлении отчёта необходимо придерживаться стандартных требований:
 - *все рисунки (осциллограммы и графики) должны быть пронумерованы и подписаны*,
 - *на осциллограммах следует отметить каждую представленную диаграмму*;
 - *требуется использовать одинаковый шрифт, выделять заголовки, нумеровать страницы и т.п.*

Рекомендации по обработке результатов (построению графиков).

Для удобства графической обработки числовых данных рекомендуется применить любую из подходящих программ. Например, для построения графиков в программе *MS Excel* следует воспользоваться функцией построения диаграмм (выбрать «точечную» диаграмму). Каждая графическая зависимость должна быть подписана (в *Excel* это можно сделать при помощи инструмента «легенда диаграммы», указав необходимое «имя ряда» для каждого графика). Графики, представленные в отчёте, должны иметь размер, соответствующий ширине страницы. Числовые значения должны быть читаемы.

Приложение 3. Внешний вид исследуемых моделей

[К СПИСКУ](#)

Интерфейс программы

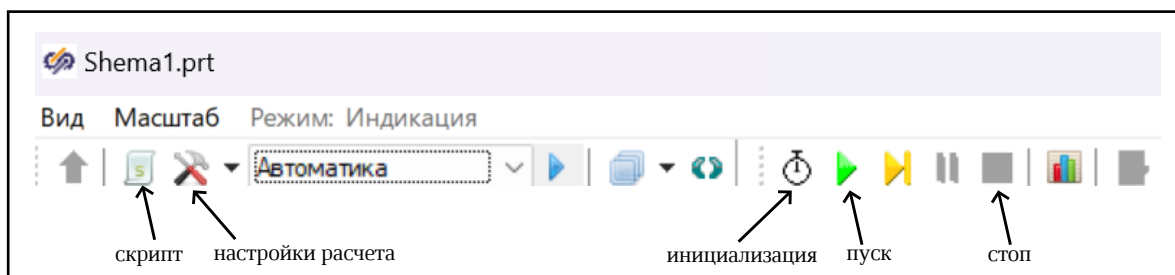


Рис. ПЗ.1. Панель *SimInTech* для работы с моделями

Опыт коммутации чисто активной нагрузки

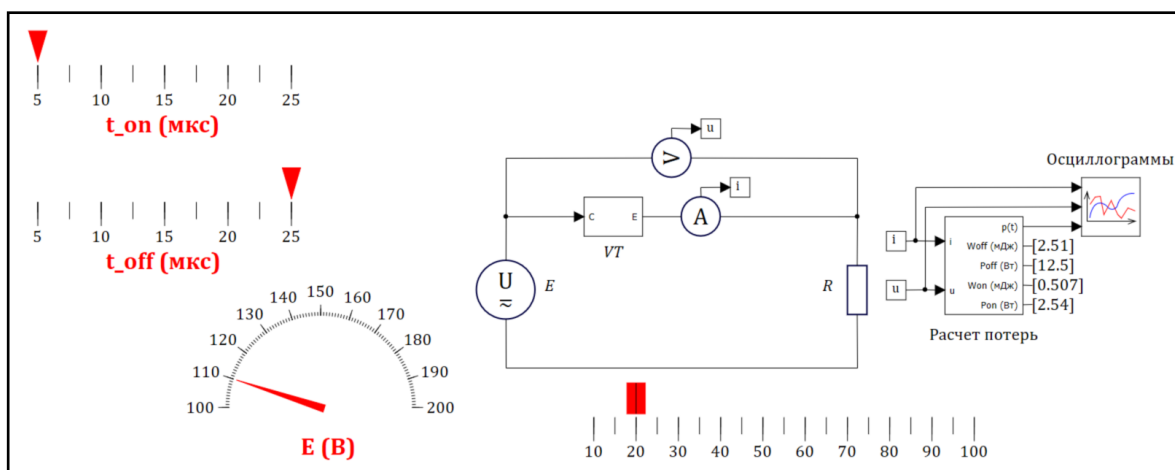


Рис. ПЗ.2. Внешний вид модели «ЛР1-ЦФТП-R»

Опыт коммутации чисто активно-ёмкостной нагрузки

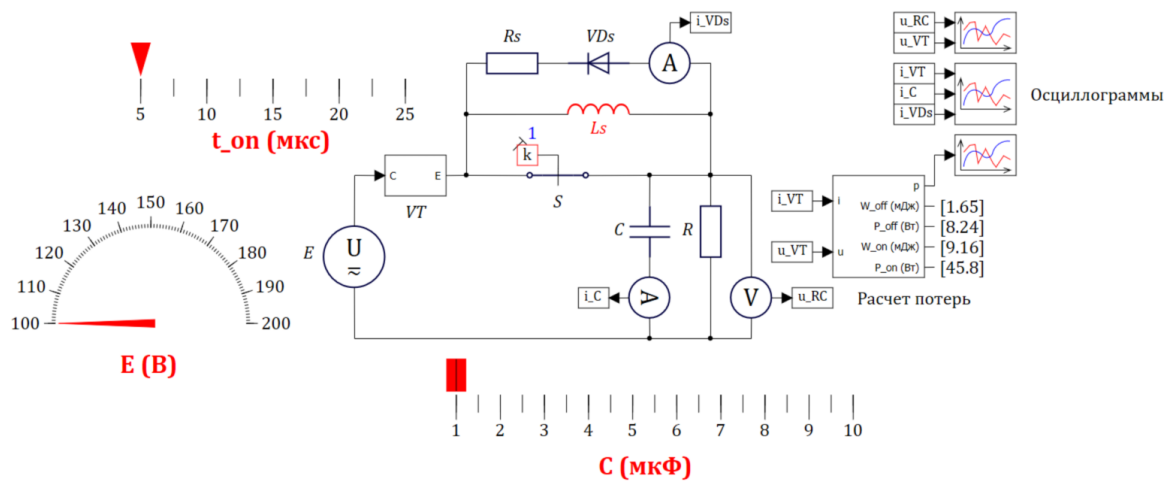


Рис. ПЗ.3. Внешний вид модели «ЛР1-ЦФТП-RC»

Опыт коммутации чисто активно-индуктивной нагрузки

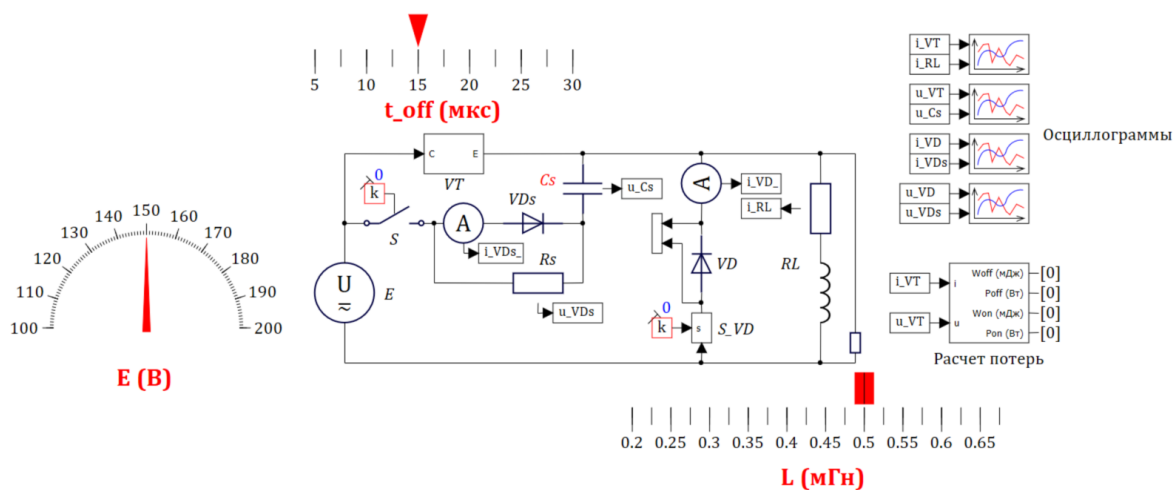
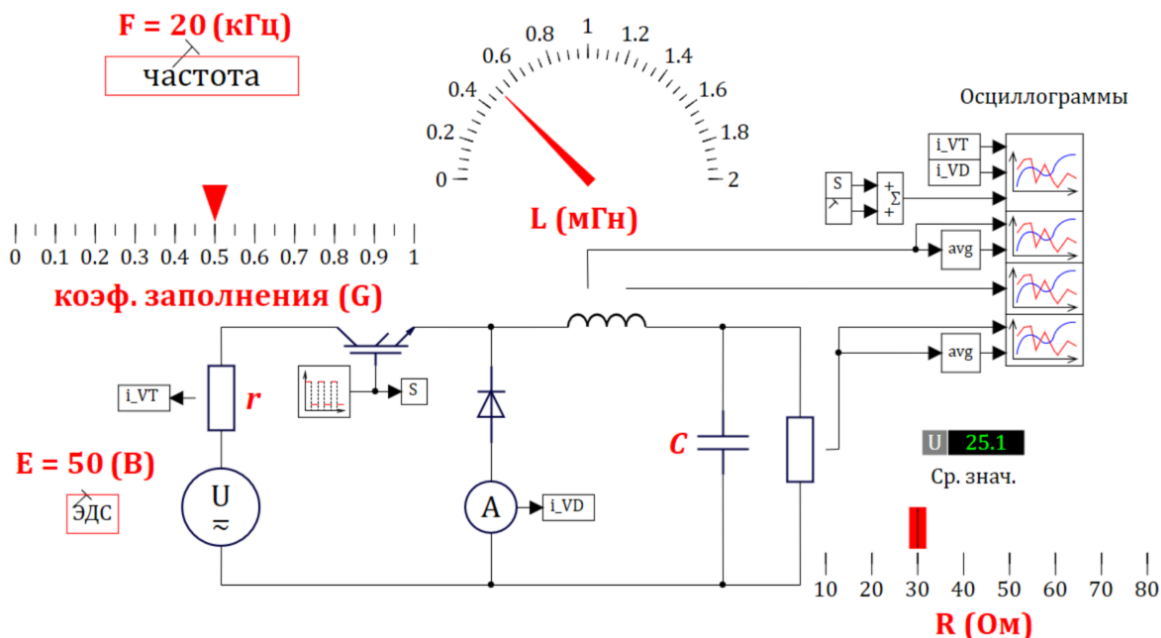
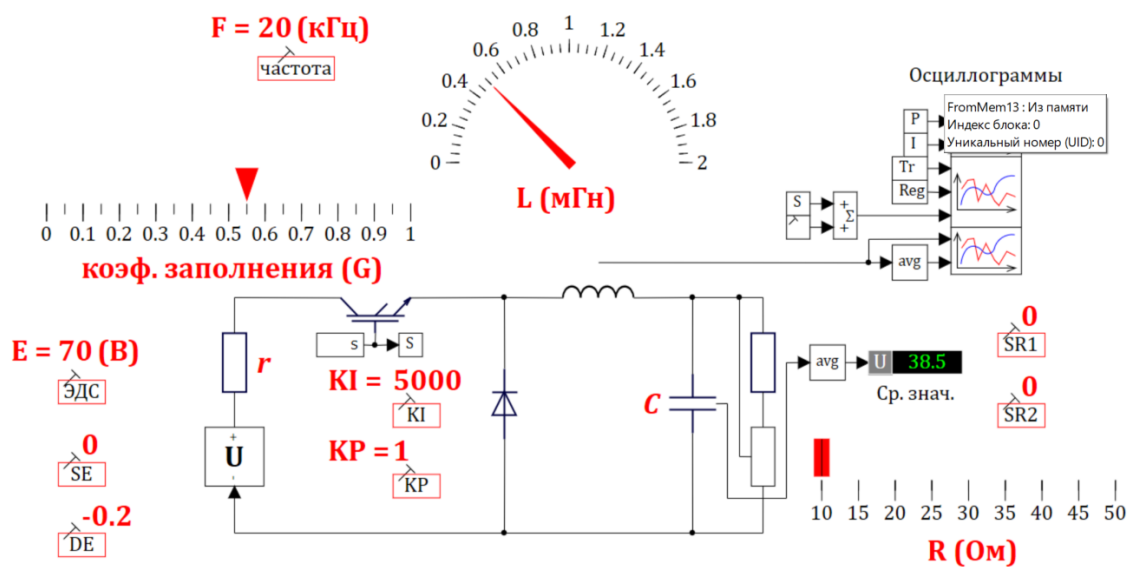


Рис. ПЗ.4. Внешний вид модели «ЛР1-ЦФТП-RL»

Исследование понижающего регулятора постоянного тока



Исследование понижающего регулятора постоянного тока с обратной связью



Исследование повышающего регулятора постоянного тока

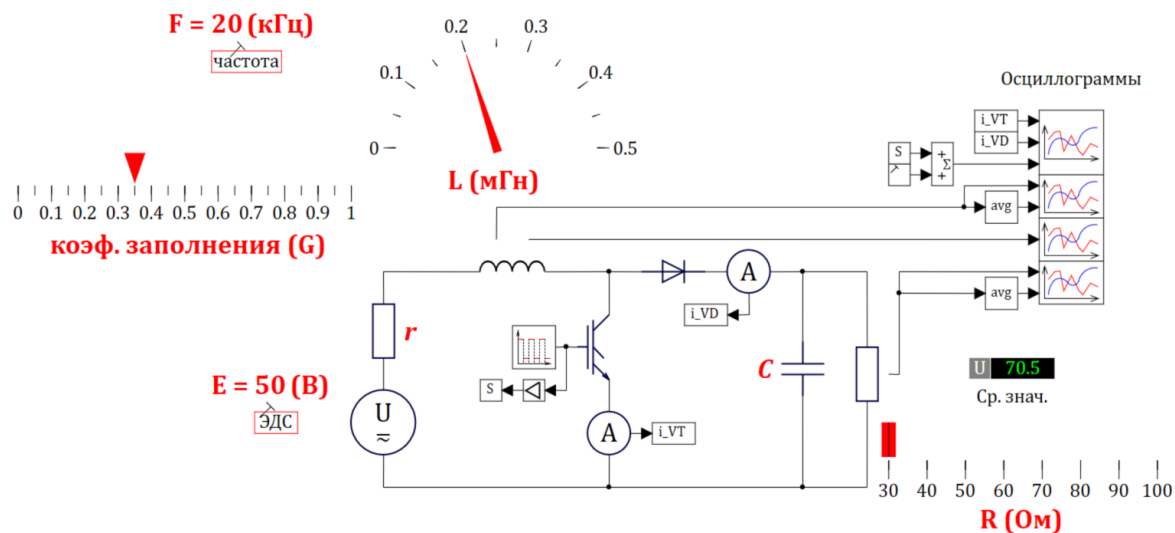


Рис. ПЗ.7. Внешний вид модели «ЛР2-ПОВрег»

Исследование инвертирующего регулятора постоянного тока

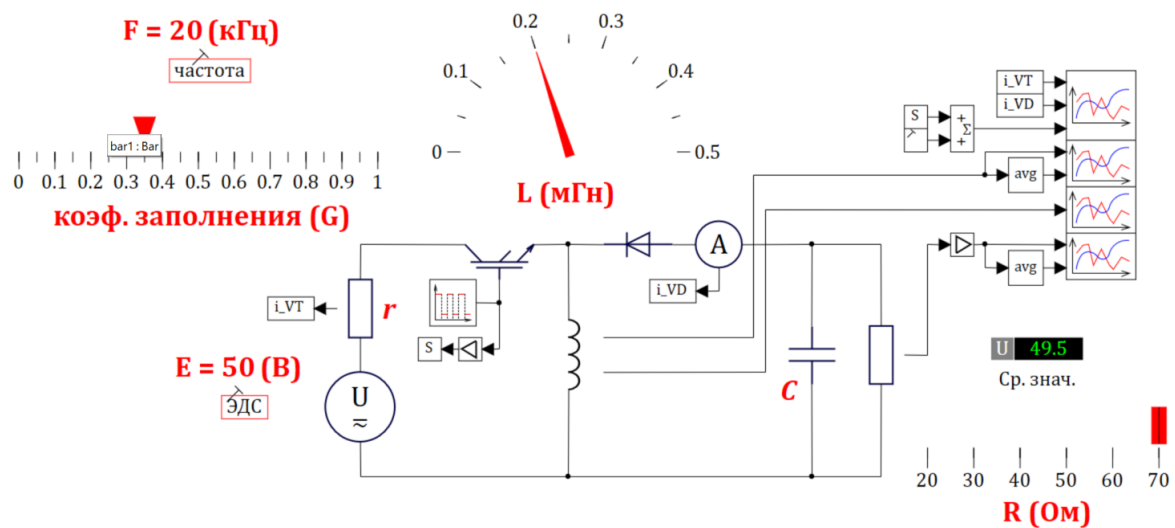


Рис. ПЗ.8. Внешний вид модели «ЛР2-ИНВрег»

Исследование инвертора с ШИР

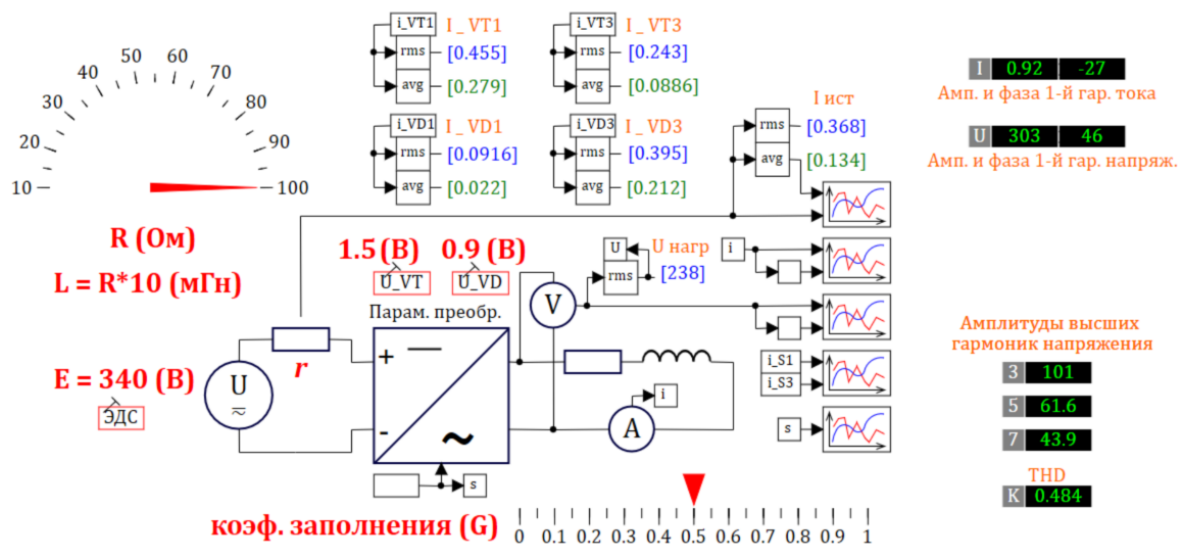


Рис. ПЗ.9. Внешний вид модели «ЛР3-Инвертор_ШИР»

Исследование инвертора с ШИМ

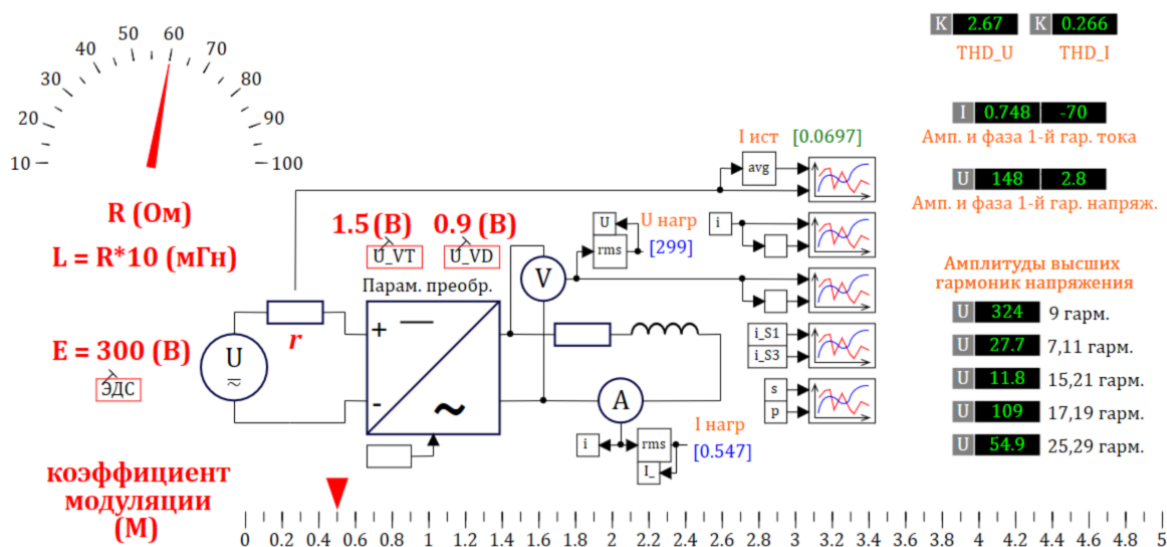


Рис. ПЗ.10. Внешний вид модели «ЛР3-Инвертор_ШИМ»

Исследование тиристорного регулятора

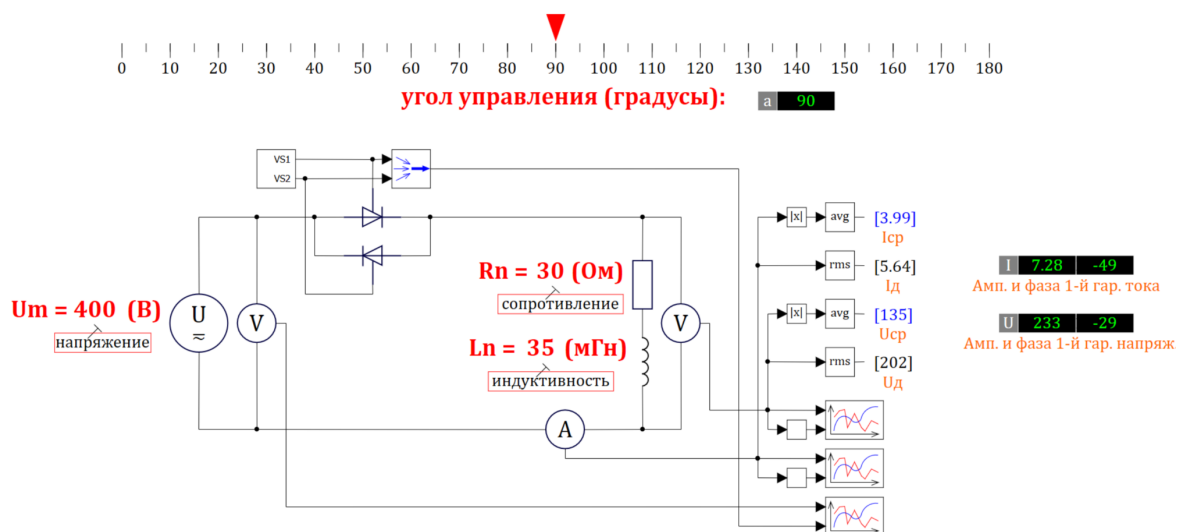


Рис. ПЗ.11. Внешний вид модели «ЛР4-VSрег»

Исследование компенсатора реактивной мощности (КРМ)

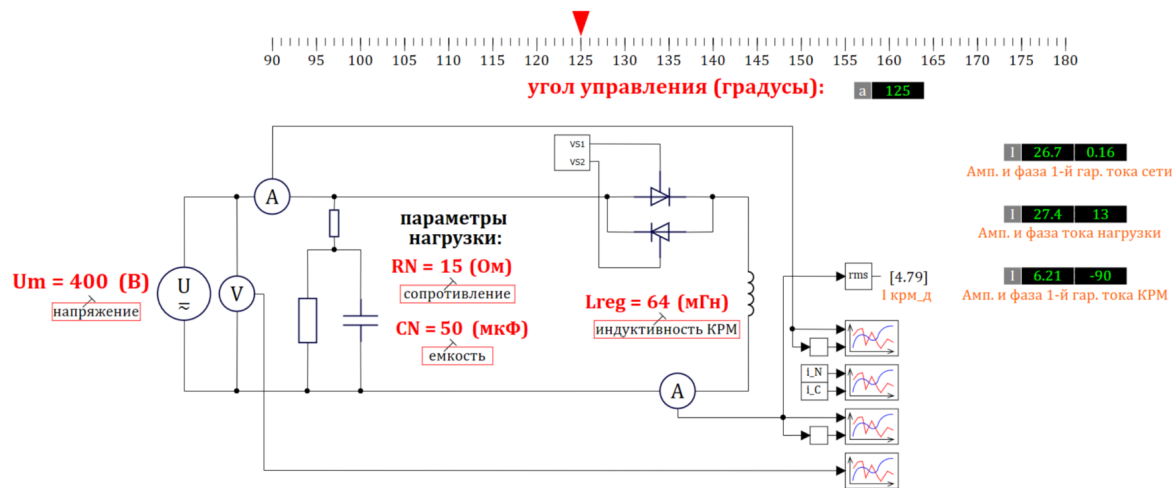


Рис. ПЗ.12. Внешний вид модели «ЛР4-КРМ»

Учебное электронное издание

Лепанов Михаил Геннадьевич

Киселев Михаил Геннадьевич

Редактор Е.Б. Бурдюкова

Для выполнения лабораторных работ используются предварительно подготовленные модели в программе моделирования SimInTech.

Дистрибутив программного обеспечение размещен на диске или скачивается по ссылкам, указанным преподавателем, и устанавливается на ЭВМ слушателя.

Дата подписания - 17.11.2025

Объём издания - 8,73 Мбайт.

Тираж – 10 электронных оптических дисков DVD-R

Издательство МЭИ

111250, Москва, Красноказарменная, д. 14, стр.1

izdatmpei@gmail.com