

Министерство образования и науки Российской Федерации

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.П. Синегубов

Методические указания

к практическим занятиям по дисциплине

**«СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА В
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»**

Ростов-на-Дону
2018

УДК 621.314 (075.3)

Составитель: Синегубов А.П.

Методические указания по дисциплине «Силовая электроника в электрических системах» – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2018. – 28 с

Методические указания позволят студентам освоить моделирование работы основных устройств силовой электроники в пакете LTSpice и исследовать их работу.

Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

© Донской государственный
технический университет, 2018

© Синегубов А.П.

ЗНАКОМСТВО С ПАКЕТОМ LTspice

Цель

Изучить интерфейс **LTspice IV** и технологию создания и моделирования работы схем устройств силовой электроники с ее помощью на примере однополупериодного выпрямителя.

Пояснения



В настоящее время для моделирования аналогово-цифровых схем всё большее применение находит пакет **LTspice IV** корпорации *Linear Technology*. В состав пакета входят схемный редактор, программа моделирования (симуляции), система графического отображения результатов и база данных для большинства электронных компонентов (диодов, транзисторов, тиристоров, симисторов и т.д.) и многих пассивных компонентов. Пакет обеспечивает возможность создания и новых библиотечных элементов.





Пакет позволяет создавать схему исследуемого устройства, исследовать её работу, производить замеры напряжений, токов и мощностей, уточнять и оптимизировать результаты предварительных расчётов, экспериментально подбирать параметры элементов и режимы работы схемы.


1. Создание схемы

Для создания схем в LTspice служит редактор схем, который сохраняет введённую схему в специальном файле с расширением *asc*. Перед началом симуляции, из *asc*-файла извлекается описание схемы и автоматически генерируется *cir*-файл, который в дальнейшем используется симулятором.

В LTspice схема создаётся в схемном редакторе путём выбора в базе необходимых компонентов, их размещения в рабочем поле, последующего соединения и определения числовых параметров и типов компонентов.

Чтобы начать рисовать новую схему, нужно щёлкнуть левой кнопкой мышки по кнопке «», расположенной на панели инструментов, или выполнить команду <File (Файл) => New Schematic (Новая схема)>. Чтобы редактировать ранее созданную схему, следует щёлкнуть левой кнопкой мышки по кнопке «», расположенной на панели инструментов, или выполнить команду <File (Файл) => Open (Открыть)>, а затем выбрать входной файл с расширением *asc*.

Для выбора часто используемых компонентов, таких как резисторы, конденсаторы, индуктивности и диоды можно воспользоваться соответствующими кнопками, расположенными на панели инструментов «», «», «», «».

На схеме обязательно должен присутствовать символ "земля" — «», с которым должны быть связаны все остальные компоненты. "Подвешенные цепи", т. е. фрагменты схемы гальванически не связанные с символом "земля" недопустимы.

Для выбора остальных компонентов необходимо выполнить команду <Edit (Редактировать) => Component (Компонент)>, которая вызывает диалоговое окно <Select Component Symbol> (рис. 3). Аналогичное действие производит нажатие функциональной клавиши <F2>, а также щелчок левой кнопкой мышки по кнопке «D», расположенной на панели инструментов. Выбрав требуемый компонент, нужно щёлкнуть левой кнопкой мышки по кнопке «OK», после чего компонент переносится на рабочее поле в окне редактора схем.

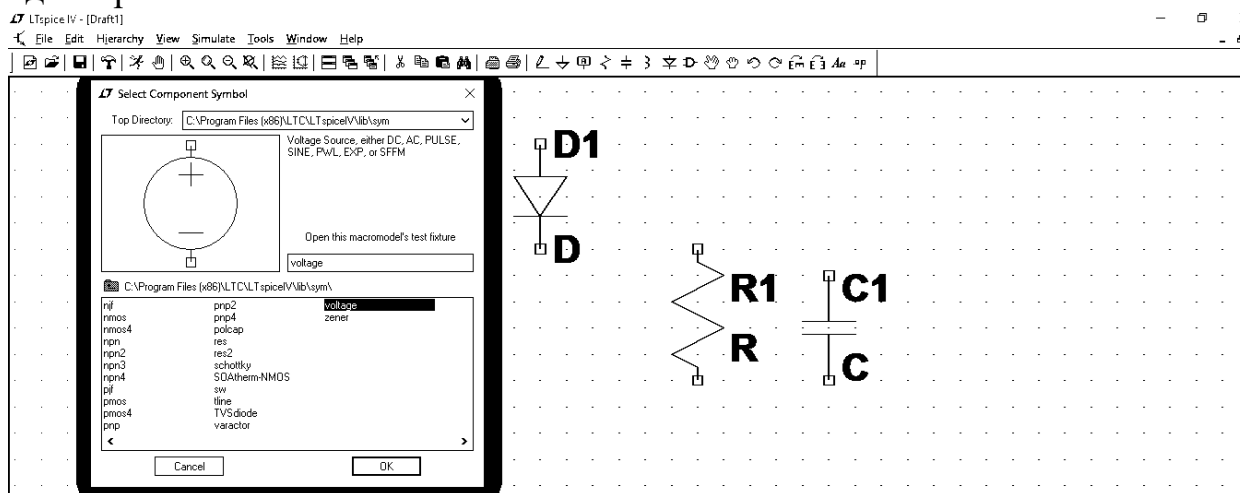


Рис. 3. Выбор компонентов из диалогового окна «Select Component Symbol».

Необходимое пространственное положение компонента можно обеспечить, вращая его комбинацией клавиш <Ctrl>+<R>. Также на панели инструментов есть специальные кнопки «E» и «E», предназначенные для вращения и зеркального отображения выбранного компонента.

Рис. 4. Вид меню Edit на панели команд.

Задание 1: Создание схемы однополупериодного выпрямителя.

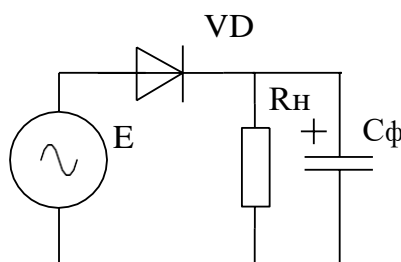


Рис. 5. Принципиальная схема однополупериодного выпрямителя.

Порядок работы

1. Для того чтобы начать рисовать новую схему, щёлкните левой кнопкой мышки по кнопке «E».
2. Выберите в библиотеке и разместите в рабочем поле компоненты схемы однополупериодного выпрямителя.

Для выбора резистора, конденсатора, диода и «земли» воспользуйтесь соответствующими кнопками на панели инструментов «R», «C», «D», «GND». Выбранный компонент будет «привязан» к указателю мыши. Установите его

мышью в нужном месте рабочего поля и щёлкните левой клавишей мыши. Если в схеме компонентов этого типа больше нет, щёлкните правой клавишей мыши и можете переходить к размещению следующего компонента.

Для выбора источника ЭДС щёлкните левой кнопкой мыши по кнопке «D» на панели инструментов. Выбрав в появившемся диалоговом окне компонент «voltage» (рис. 3), щёлкните левой кнопкой мыши по кнопке «ОК», после чего перенесите компонент на рабочее поле в окне редактора схем (рис. 6).

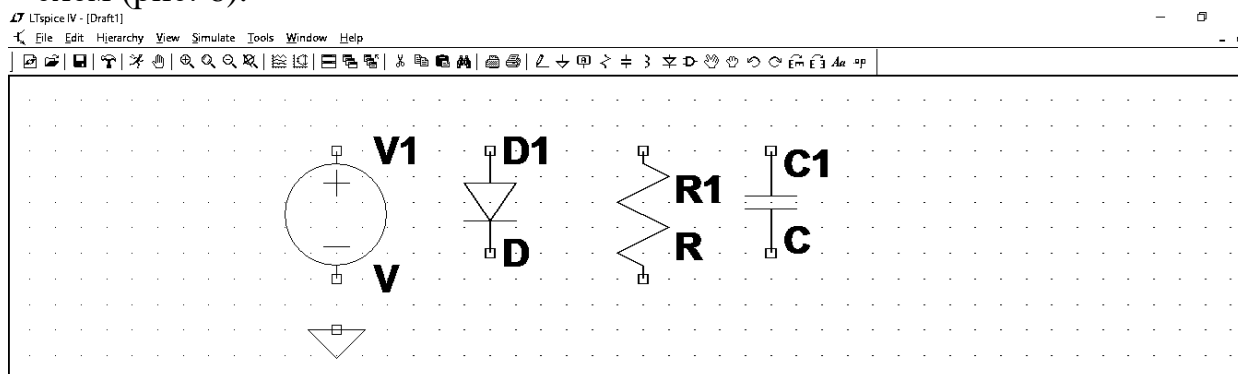





Рис. 6. Размещение компонентов в окне редактора схем LTspice.

3. Задайте необходимое пространственное положение компонентов схемы.

Изменение пространственного положения компонентов осуществляется с помощью кнопки «», вид которой после щелчка по ней приобретает указатель мыши. Наведите указатель на интересующий компонент, щёлкните левой клавишей мыши, переместите компонент в нужное место и ещё раз щёлкните левой клавишей мыши.

Поворот диода, после его выделения с помощью щелчка по нему указателем мыши «», осуществляется нажатием комбинацией клавиш <Ctrl>+<R> (см. рис. 7).

4. Нарисуйте связи между компонентами в соответствии со схемой выпрямителя (рис. 5).

Для этого активизируйте кнопку карандаша «» на панели инструментов. Курсор мыши приобретёт форму перекрещивающихся линий. Наведите его на вывод компонента и щёлкните левой клавишей мыши. Переместите до точки изгиба линии связи и опять щёлкните левой клавишей. Переместите курсор до вывода компонента, с которым рисуете связь, и вновь щёлкните левой клавишей. Связь установлена.

Повторите операции до соединения всех компонентов в соответствии со схемой. После этого щёлкните правой клавишей мыши. Результат показан на рисунке 7.

5. Определите числовые параметры и типы компонентов.

Величины входящих в схему сопротивлений и индуктивностей могут быть заданы в окне свойств элемента, которое появляется при наведении указателя мыши на интересующий элемент и щелчке правой клавиши мыши. Для этого подводим курсор к редактируемому компоненту. При совмещении курсора с

позицией компонента, курсор меняет своё начертание и из крестика превращается в указательный палец. Теперь, после щелчка правой кнопкой мыши, появляется соответствующее окно, в котором можно определить числовые параметры компонента.

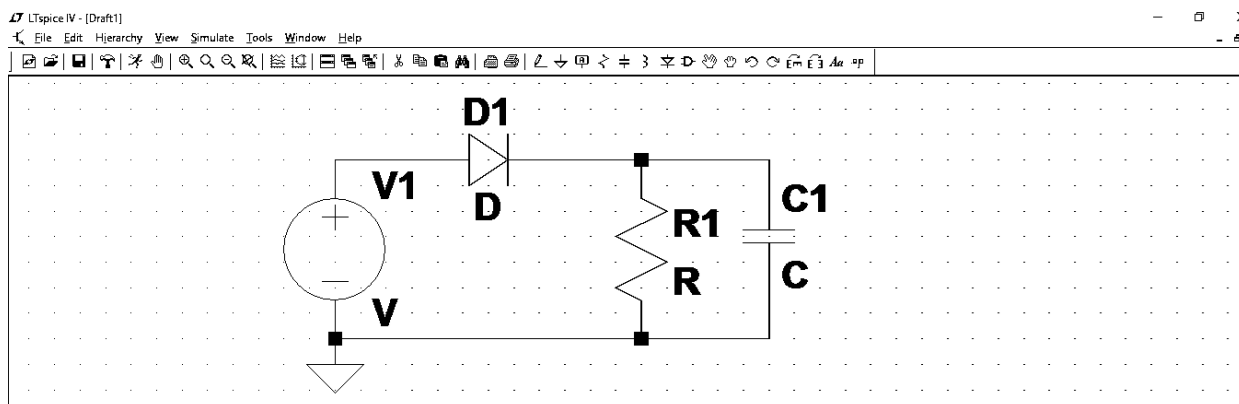
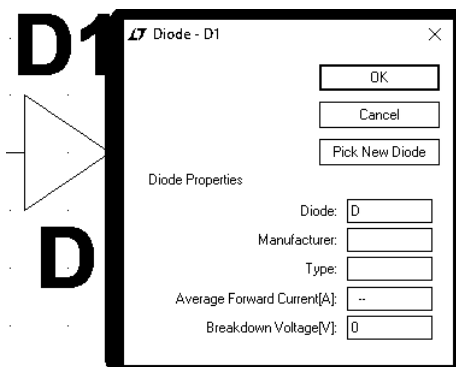


Рис. 7. Схема однополупериодного выпрямителя в LTSpice.

На рис. 8 показан выбор диода. В появившемся после щелчка правой кнопкой мыши окне (рис. 8,а) нажимаем кнопку «Pick New Diode» и в появившемся окне «Select Diode» выбираем диод типа RF05VA1S, имеющий прямой допустимый ток 0,5 А и допустимое обратное напряжение – 100 В (рис. 8,б).

а)



б)

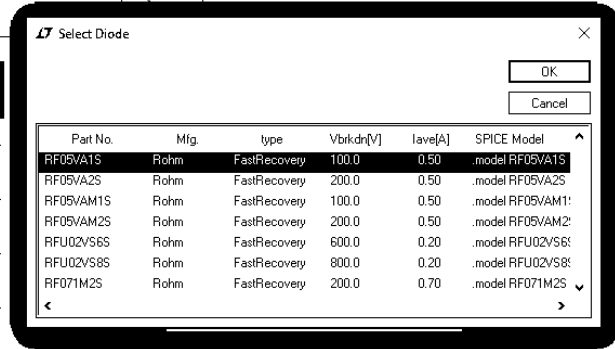


Рис. 8. Определение типа диода.

Выбор типа и параметров источника ЭДС выполняется аналогично. После щелчка правой клавишей мыши на источнике V1 в появившемся окне «Voltage Source-V1» нажимаем кнопку «Advanced» и в открывшемся окне «Independent Voltage Source-V1» устанавливаем: источник синусоидального напряжения с постоянным смещением - 0 В, амплитудой $U_m=50$ В, частотой $f=50$ Гц, задержкой – 0, коэффициентом затухания – 0, фазовым сдвигом $\varphi=0^\circ$ и числом циклов - 5, как это показано на рис. 9.

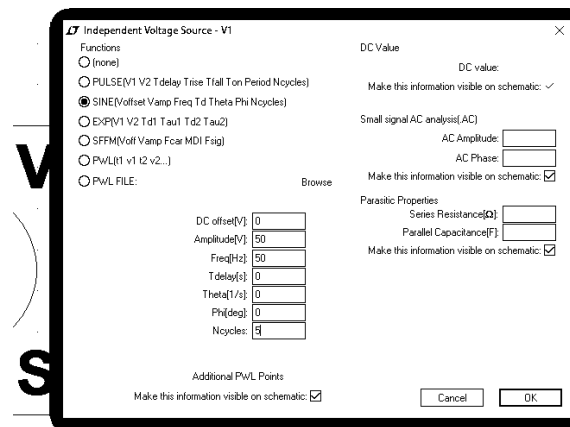


Рис. 9. Определение типа и параметров источника ЭДС.

Величину сопротивления нагрузки R1 задаём 200 Ом ($I_m = U_m / R1 = 50 / 200 = 0,25$ А < 0,5 А, т.е. ток через диод при таком сопротивлении нагрузки меньше допустимого). Тип сопротивления не определяем.

Ёмкость сглаживающего конденсатора C1 задаём вначале 0 мкФ, тип не определяем. Затем установим 20 и 200 мкФ, чтобы исследовать её сглаживающее влияние на выходное напряжение. Постоянная времени разряда ёмкости $\tau = R1 \cdot C1 = 200 \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 40$ мс = 2 Т, где Т – длительность периода питающей ЭДС, $T = 1/f = 20$ мс, т.е. сглаживание будет не идеальным.

Результат после определения типов и параметров элементов показан на рис. 10.

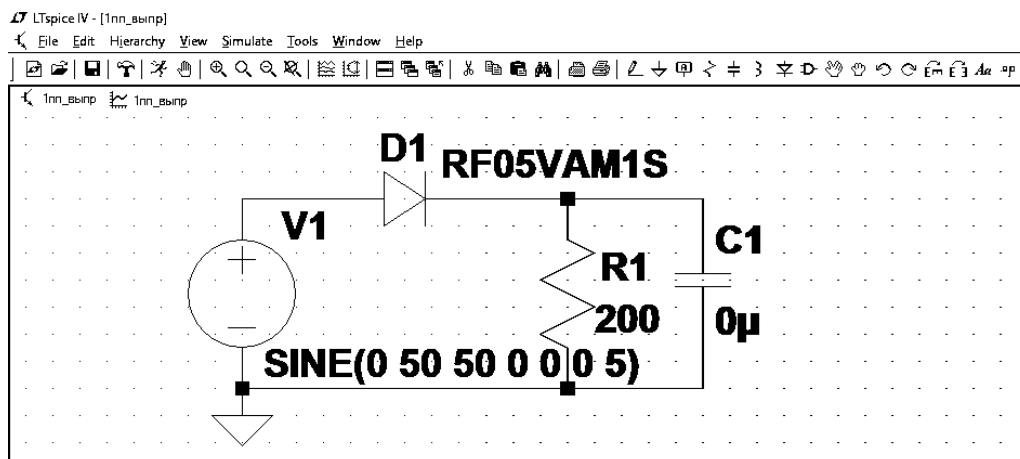


Рис. 10. Результирующая схема однополупериодного выпрямителя.

6. Сохраните схему в папке Сил_эл-ка\Пр_раб\Пр_p1 на Вашей флэшке под именем: «1пп_выпр.asc».

2. Имитационное моделирование работы схемы


Программа LTspice позволяет выполнять разнообразные исследования электронных схем:


1. Transient — выполняется анализ переходных процессов. Исследуется поведение схемы после подачи питания;
2. AC Analysis — расчёт частотных характеристик;
3. DC sweep — выполняется анализ режима по постоянному току при изменении постоянного напряжения или тока;
4. Noise — Расчёт уровня внутреннего шума;

5. DC Transfer — определяется переходная функция по постоянному току;
6. DC op pnt — определяется режим схемы по постоянному току (рабочая точка).

В правой части строки подсказки стартового окна LTspice (рис. 1) отображается алгоритм работы вычислителя SPICE симулятора. Пользователю доступны два алгоритма работы вычислителя:

- Normal;
- Alternate.

По умолчанию устанавливается алгоритм Normal, который несколько быстрее алгоритма Alternate. Однако алгоритм Alternate обеспечивает большую внутреннюю точность и устойчивость процесса вычислений. Благодаря этому, для многих схем, алгоритм Alternate способен обеспечить и большую скорость моделирования. Так что если симулятор надолго "задумывается", то первое, что стоит сделать, — это изменить алгоритм работы вычислителя. Для этого надо щёлкнуть левой кнопкой мышки по кнопке  на панели инструментов или выполнить команду "Simulate (Моделирование) => Control Panel (Панель управления)". В возникшем после этого окне "Control Panel" надо выбрать вкладку "SPICE" и в строке "Solver" установить требуемый алгоритм.


Для проведения анализа переходных процессов следует воспользоваться командой "Simulate (Моделирование) => Run", или щёлкнем левой кнопкой мышки по кнопке -Run» на панели инструментов. После этого активизируется окно «Edit Simulation Command» (Редактирование команды моделирования), в котором, по умолчанию, выбрана вкладка «Transient». На этой вкладке, как минимум, нужно определить время остановки анализа переходного процесса (Stop Time). Это необходимо сделать только при первом запуске моделирования. Все последующие запуски производятся согласно установленным значениям. При необходимости редактирования, окно "Edit Simulation Command" можно вызвать командой <Simulate (Моделирование) => Edit Simulation Cmd (Редактирование команды моделирования)> или щёлкнув правой кнопкой мышки по директиве «.tran» в рабочем поле редактора схем. Кроме времени окончания анализа переходного процесса (Stop Time), в окне "Edit Simulation Command", выбрав вкладку "Transient", можно определить:

- Time to Start Saving Data - время начала записи результатов моделирования;
- Maximum Timestep - максимальный шаг интегрирования.


Если шаг интегрирования не указан, то программа сама выбирает для него максимально возможное значение.

В окне "Edit Simulation Command" присутствуют дополнительно опции, позволяющие более тонкую настройку процесса моделирования, но нас они пока не интересуют.

После определения времени остановки автоматически начнется анализ переходного процесса, окно со схемой «<имя>.asc» сожмётся, а на освободившееся место будет вставлено окно плоттера «<имя>.raw», которое пока выглядит как пустой прямоугольник. Моделирование будет автоматически завершено после достижения времени остановки. При необходимости, процесс

можно остановить и раньше комбинацией клавиш <Ctrl>+<H> или щёлкнув левой кнопкой мышки по кнопке «» на панели инструментов.

Чтобы посмотреть форму напряжения на произвольном узле схемы, надо приблизить к нему курсор мыши. Оказавшись в районе проводника, курсор трансформируется в щуп красного цвета. Для вывода диаграммы напряжения на плоттер необходимо щёлкнуть левой кнопкой мыши. По умолчанию плоттер показывает напряжение на выбранном узле, относительно "земли". Чтобы увидеть напряжение между узлами, следует щёлкнуть левой кнопкой мышки по первому узлу и, не отпуская кнопки мышки, переместить курсор ко второму узлу. По мере перемещения, щуп сначала окрасится в серый цвет, а затем, в районе второго узла, в чёрный цвет. После этого отпускаем левую кнопку мыши.


Чтобы увидеть токи в компонентах схемы, достаточно навести курсор на компонент или подвести к одному из выводов компонента, имеющего более двух выводов. Курсор трансформируется в токовые клещи .

Аналогично току, можно посмотреть диаграмму мгновенной мощности, выделяемой на компоненте. Для этого нужно нажать клавишу <Alt> и, удерживая её, щёлкнуть левой кнопкой мышки по компоненту или по выводу компонента. Теперь курсор будет похож на градусник.

Вычислить среднее значение мощности, а также средние и действующие значения напряжений и токов можно только после окончания моделирования. Усреднение производится за весь период времени, отображаемый в окне плоттера. Чтобы воспользоваться функцией усреднения, достаточно нажать клавишу <Ctrl> и, удерживая её, щёлкнуть левой кнопкой мышки по интересующему выражению. Для напряжений и токов рассчитываются среднее (Average) и действующее (RMS) значения. Для мощности рассчитывается средняя (Average) мощность и энергия (Integral) за отображаемый период времени.

Задание 2: Исследование работы однополупериодного выпрямителя.

1. Запустите анализ переходного процесса.

Для этого щёлкните по кнопке «-Run» на панели инструментов и в появившемся окне “Edit Simulation Command” в строке “Stop Time” введите «60m». Время остановки процесса моделирования установлено равным 60 мс, т.е. 3 периода процесса выпрямления. В строке “Syntax” появилась директива для симулятора — .tran 60m. После щелчка левой кнопкой мышки по кнопке «ОК», директива “.tran 60m” будет скопирована в окно редактора схем, где ее надо разместить в любом выбранном месте. После этого автоматически начнется анализ переходного процесса, окно со схемой «1пп_выпр.asc» сожмётся, а на освободившееся место будет вставлено окно плоттера «1пп_выпр.raw», которое пока выглядит как пустой прямоугольник.

2. Исследуйте процессы в схеме выпрямителя.

Для получения временной диаграммы напряжения на входе выпрямителя приблизьте курсор мыши к выводу «+» источника ЭДС V1. Оказавшись в районе проводника, курсор трансформируется в щуп красного цвета. Для

вывода диаграммы напряжения на плоттер необходимо щёлкнуть левой кнопкой мыши (зависимость 1 на рис. 12). По умолчанию плоттер показывает напряжение на выбранном узле, относительно "земли".

Для получения временной диаграммы напряжения на выходе выпрямителя приблизьте курсор мыши к выводу сопротивления нагрузки R1, соединённому с анодом диода D1, и после того, как курсор трансформируется в щуп красного цвета, щёлкните левой кнопкой мыши (зависимость 2 на рис. 12).

Для получения временной диаграммы тока в цепи нагрузки наведите курсор мыши на вывод сопротивления R1 или на само сопротивление и после того, как курсор трансформируется в токовые клещи, щёлкните левой кнопкой мыши (зависимость 3 на рис.12).

Каждой диаграмме присваивается название в виде выражения, отображаемое в верхней части плоттера и окрашенное тем же цветом, например, для входного напряжения выпрямителя - V[N001]. При наведении указателя мыши на название и щелчке правой клавишей мыши цвет данной диаграммы можно изменить. Изменение цвета диаграмм бывает необходимо для того, чтобы они были отчётливо видны при распечатке отчёта на монохромном принтере.

3. Выполните измерения электрических величин.

Наведите указатель мыши на название «V[N001]», нажмите клавишу <Ctrl> и, удерживая её, щёлкните левой кнопкой мышки по названию «V[N001]». В появившемся окне «Waveform:V(n001)» считаем величину среднего значения входного напряжения Average:-276.55 μ V (т.е. практически 0 В) и действующего значения RMS: 35.351V.

Повторите операции для определения среднего и действующего значений выходного напряжения (V[n002]). Получите: Average:15.552V, RMS:24.519V.

Определите среднее и действующее значения тока в сопротивлении нагрузки (название: I[R1]). Получите: Average: 77.762mA, RMS: 122.6mA (см. рис. 12)

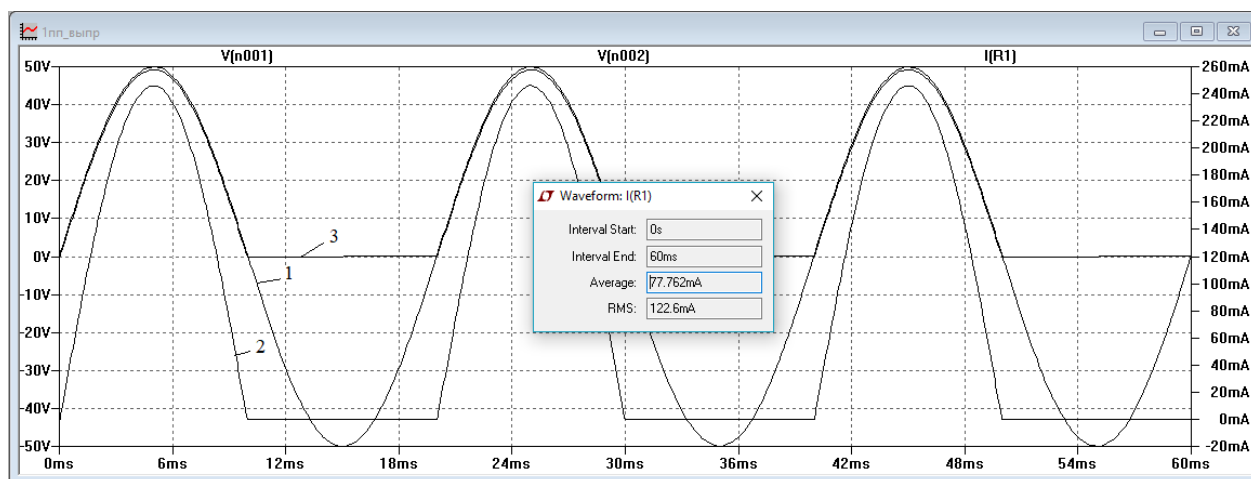


Рис. 12. Определение среднего и действующего значений тока в сопротивлении нагрузки.

4. Сохраните результат в папке Сил_эл-ка\Лаб_раб\Л_p1 на Вашей флэшке. Кроме того, для оформления отчёта сделайте “Print Screen” экранов с основными результатами Вашей работы.
5. Вернувшись к п. 1.5 повторите исследования процессов и измерения величин при ёмкости сглаживающего конденсатора C1= 20 мкФ и 200 мкФ.

6. Вычислите коэффициент пульсации выходного напряжения при всех 3-х значений ёмкости сглаживающего конденсатора $C_1 = 0, 20$ и 200 мкф.

$$K_{\text{Пу}} = \frac{U_{d\text{max}} - U_{d\text{min}}}{2U_d},$$

где $U_{d\text{max}}$, $U_{d\text{min}}$ соответственно максимальное и минимальное значения выходного напряжения, определяемые по полученным временным диаграммам;

U_d – среднее значение выходного напряжения, определённое при выполнении его измерения.

Отчёт по работе должен содержать:

- основные сведения о пакете LTspice (для чего служит, что входит в пакет и т.п.);
- описание технологии создания схемы выпрямителя и созданную схему;
- описание процесса исследования работы выпрямителя и его результаты;
- выводы, отражающие как результаты знакомства с пакетом, так и анализа полученных результатов.

Вопросы

1. Для чего служит и что включает в себя пакет LTspice?
2. Назовите основные этапы создания схемы устройства.
3. Поясните содержание каждого этапа создания схемы, его смысл.
4. Продемонстрируйте в пакете LTspice выполнение каждого этапа создания схемы.
5. Назовите основные этапы исследования работы устройства
6. Поясните содержание каждого этапа исследования работы схемы, его смысл.
7. Продемонстрируйте в пакете LTspice выполнение каждого этапа исследования.
8. Поясните работу однополупериодного выпрямителя.
9. Как влияет величина ёмкости сглаживающего конденсатора на форму и величины среднего и действующего значений выходного напряжения, на его коэффициент пульсаций?

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Цель работы

Исследовать работу однополупериодного выпрямителя при различном характере нагрузки: активной, активно-ёмкостной, активно-индуктивной и при работе выпрямителя на противоЭДС.

Пояснения к работе

Выпрямителями называются устройства, предназначенные для преобразования переменного напряжения в постоянное.

1. Работа выпрямителя на активную нагрузку

Рассмотрим простейшую схему выпрямления с одним вентильным элементом, называемую однополупериодной (рис. 1,а). Трансформатор Т служит для получения необходимого нагрузке выпрямителя уровня напряжения U_2 и гальванической развязки от питающей сети. В тех случаях, когда величину напряжения питающей сети изменять не требуется, выпрямитель может питаться от сети без трансформатора Т.

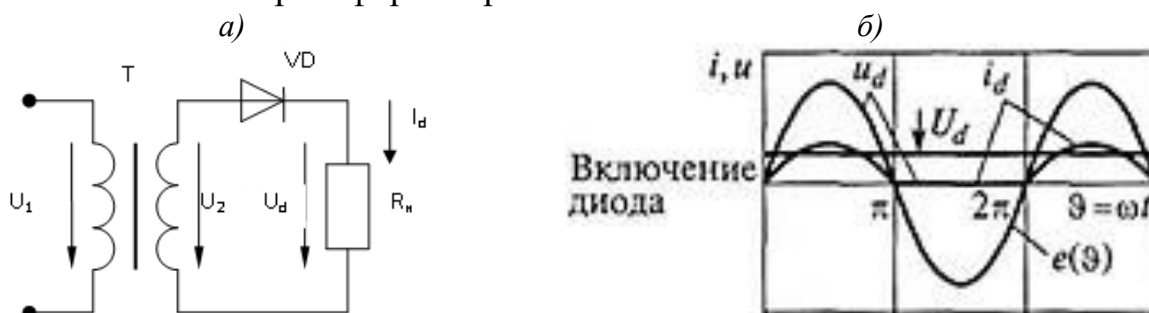


Рис. 1. Схема однофазного однополупериодного выпрямителя (а) и временные диаграммы токов и напряжений (б).

На временных диаграммах (рис. 1,б) в качестве временного параметра использован угол $\psi = \omega t$, где ω — круговая частота источника переменного напряжения, т.е. входное напряжение $u_2(\psi) = e(\psi) = E_m \sin \psi$.

Ток i_d начинает протекать сразу же, как только к диоду будет приложено прямое напряжение, т. е. с момента $\psi = 0$ до момента $\psi = \pi$. При этом напряжение u_2 , за исключением небольшого падения на открытом диоде ($\sim 1, \dots, 2$ В), прикладывается к сопротивлению нагрузки. Ток в нагрузке R_n повторяет форму входного напряжения на проводящем интервале диода от 0 до π . В момент $\psi = \pi$ напряжение на диоде становится равным нулю, и он выключается. Следующий полупериод к диоду VD будет приложено отрицательное напряжение, и он будет находиться в непроводящем состоянии. Напряжение на нагрузке на интервале от π до 2π равно нулю. С момента $\psi = 2\pi$ процессы периодически повторяются.

При активной нагрузке форма тока i_d повторяет форму питающего напряжения и длительность протекания тока через диод $\lambda = \pi$. В этом случае напряжение на нагрузке не имеет отрицательных участков

Полезной частью напряжения на нагрузке выпрямителя является его постоянная составляющая или среднее значение за период

$$U_d = u_{d \max} / \pi = 0,318 u_{d \max}. \quad (1)$$

Качество выпрямленного напряжения можно оценивать по отношению амплитуды переменной составляющей к среднему значению выпрямленного напряжения. Это отношение называют коэффициентом пульсации $K_{\text{пу}}$, он характеризует переменную составляющую напряжения $U_{\text{п}}$ на стороне постоянного тока:

$$K_{\text{пу}} = \frac{u_{d \max} - u_{d \min}}{2U_d}. \quad (2)$$

Задание 1: Исследование работы однополупериодного выпрямителя на активную нагрузку.

Порядок работы

1. Создайте схему выпрямителя с активной нагрузкой (рис. 2). В этой схеме в цепь источника ЭДС введено сопротивление $R2=1$ Ом, имитирующее внутреннее сопротивление источника и соединительных проводов. Амплитуда ЭДС установлена равной 10 В.

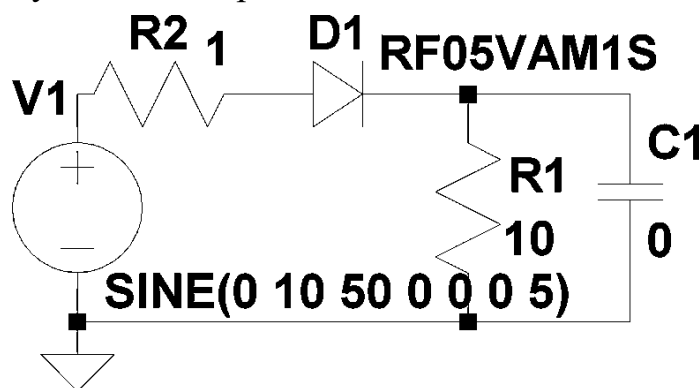


Рис. 2. Схема исследований работы на активную нагрузку.

2. Исследуйте процессы в схеме выпрямителя. Получите временные диаграммы напряжений на выходе источника ЭДС, на нагрузке, на диоде и тока в цепи нагрузки. Обратите внимание на напряжение на диоде в проводящем полупериоде.
3. По полученным временным диаграммам определите максимальное $u_{d \max}$ и $u_{d \min}$ минимальные значения выходного напряжения. Измерьте среднее значение выходного напряжения U_d и по выражению (2) вычислите коэффициент пульсации.
4. Снимите и постройте внешнюю характеристику выпрямителя. Для этого поочерёдно задайте величины сопротивления нагрузки из таблицы 1 и измерьте средние значения тока нагрузки и напряжения на ней.

Таблица 1.

$R1, \text{ Ом}$	10	20	50	100	200	500	10000
$I_d, \text{ А}$							
$U_d, \text{ В}$							

2. Работа выпрямителя с ёмкостным фильтром

Простейшим методом сглаживания пульсаций является применение конденсатора, включенного параллельно сопротивлению нагрузки R_H (см. рис. 3). Включение конденсатора существенно изменяет условия работы диода.

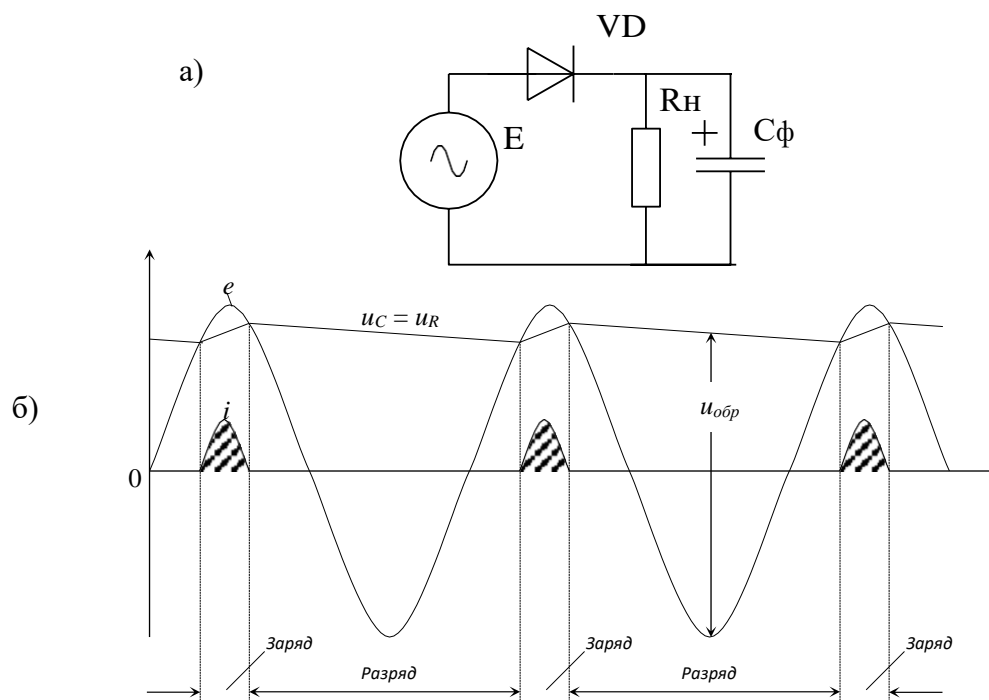


Рис. 3. Сглаживание пульсаций с помощью конденсатора

Во время некоторой части положительного полупериода, когда напряжение на диоде прямое, через диод проходит ток, заряжающий конденсатор до напряжения, приближающегося к амплитудному значению - E_m . В то время, когда ток через диод не проходит, конденсатор разряжается через нагрузку R_H и создает на ней напряжение, которое постепенно снижается. В каждый следующий положительный полупериод конденсатор подзаряжается и его напряжение снова возрастает.

Заряд конденсатора через сравнительно малое сопротивление диода происходит быстро. Разряд на большое сопротивление нагрузки совершается гораздо медленнее. Вследствие этого напряжение на конденсаторе и включенной параллельно ему нагрузке пульсирует незначительно. Кроме того, конденсатор резко повышает постоянную составляющую выпрямленного напряжения. При отсутствии конденсатора $U_d \approx 0,3E_m$, а при наличии конденсатора достаточно большой емкости U_d приближается к E_m и может быть $(0,8 \div 0,95) E_m$ и даже выше. Таким образом, в однополупериодном выпрямителе конденсатор повышает выпрямленное напряжение примерно в 3 раза. Чем больше постоянная времени цепи разряда $\tau_p = C_\Phi \times R_H$, тем медленнее разряжается конденсатор, тем меньше пульсации и тем ближе U_d к E_m . Если нагрузку вообще отключить (режим холостого хода, или $R_H = \infty$), то на конденсаторе получается постоянное напряжение без всяких пульсаций, равное E_m .

Работу выпрямителя со сглаживающим конденсатором поясняет рис. 2,б,

на котором показаны временные диаграммы ЭДС источника e , тока через диод i и напряжение на конденсаторе u_C , равное напряжению на нагрузке u_R .

Напряжение конденсатора приложено плюсом к катоду и минусом к аноду диода. Поэтому напряжение на диоде u_D равно разности э. д. с. источника и напряжения конденсатора:

$$u_D = e - u_C. \quad (3)$$

Так как u_C близко к E_m , то u_D становится прямым только в течение части положительного полупериода, когда ЭДС e превышает u_C (вблизи амплитудного значения E_m). В эти небольшие промежутки времени через диод проходит ток в виде импульсов, подзаряжающих конденсатор. Остальную часть периода u_D обратное, ток отсутствует и конденсатор разряжается на нагрузку R_H .

Максимальное обратное напряжение на диоде получается при отрицательной амплитуде ЭДС, когда $e = E_m$. Поскольку напряжение конденсатора также близко к E_m то наибольшее обратное напряжение близко к $2E_m$. Если цепь нагрузки разомкнута (холостой ход), то максимальное обратное напряжение точно равно $2E_m$. Таким образом, применение конденсатора удваивает обратное напряжение по сравнению с его величиной при отсутствии конденсатора. Поэтому диод надо подбирать так, чтобы он выдержал это обратное напряжение.

Если сопротивление R_H мало, то необходима чрезмерно большая емкость конденсатора, т. е. сглаживание пульсаций одним конденсатором практически осуществить нельзя. Приходится включать дополнительный сглаживающий фильтр, состоящий из дросселя с большим индуктивным сопротивлением (или еще более сложный фильтр).

Задание 2: Исследование работы однополупериодного выпрямителя с ёмкостным фильтром

1. В схеме выпрямителя рис. 2 установите величину $R_1=200$ Ом и поочередно задайте величину ёмкости конденсатора $C_1 = 100$, а затем 500 мкФ.

Постоянная времени разряда ёмкости $\tau_1=R_1 \cdot C_1= 200 \cdot 100 \cdot 10^{-6}=20$ мс= T , где T – длительность периода питающей ЭДС, $T=1/f=20$ мс. $\tau_2=R_1 \cdot C_1= 200 \cdot 500 \cdot 10^{-6}=100$ мс= $5T$.

2. Исследуйте сглаживающее влияние ёмкости на выходное напряжение. Получите временные диаграммы напряжений на выходе источника ЭДС, на нагрузке и тока в цепи нагрузки при обоих значениях ёмкостей.
3. По полученным временным диаграммам определите при каждой величине ёмкости конденсатора C_1 максимальное u_{dmax} и u_{dmin} минимальные значения выходного напряжения. Измерьте среднее значение выходного напряжения U_d и по выражению (2) вычислите коэффициент пульсации.

Сравните коэффициенты пульсации, определённые при $C_1=0$, 100 и 500 мкФ.

4. Снимите и постройте внешнюю характеристику выпрямителя при $C1=500$ мкФ. Для этого поочерёдно задайте величины сопротивления нагрузки из таблицы 2 и измерьте средние значения тока нагрузки и напряжения на ней.

Внешнюю характеристику постройте на том же рисунке, где изображена характеристика при активной нагрузке выпрямителя, и сравните эти характеристики.

Таблица 2.

$R1, \text{ Ом}$	10	20	50	100	200	500	10000
$I_d, \text{ А}$							
$U_d, \text{ В}$							

3. Работа выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку

Принципиальная схема и временные диаграммы, иллюстрирующие работу схемы, показаны на рис. 4, а—г. При введении в нагрузку, кроме резистора R_H , реактора с индуктивностью L_d ток $i_d = i_H$ будет определяться уравнением:

$$E_{\max} \sin \vartheta = i_d R_d + \omega L_d \frac{di_d}{dt}. \quad (4)$$

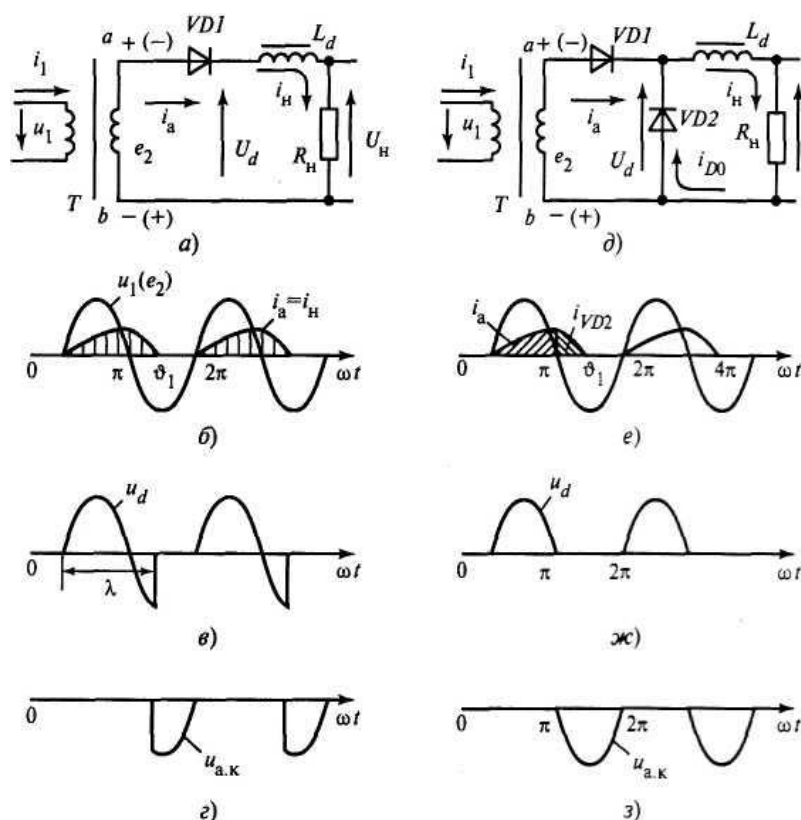


Рис. 4. Работа выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку.

Вентиль пропускает ток на интервале $\lambda > \pi$ (рис. 4,б), т.е. и при отрицательном напряжении на вторичной обмотке трансформатора. Это

объясняется тем, что в индуктивности L на интервале $0—\pi$ запасается электромагнитная энергия. При уменьшении тока нагрузки на индуктивности возникает ЭДС самоиндукции такой полярности, что значение отрицательного потенциала катода вентиля становится больше отрицательного потенциала анода. Диод проводит ток до тех пор пока ток нагрузки не упадет до нуля, поэтому на выходе выпрямителя напряжение u_d изменяется по закону изменения напряжения на вторичной обмотке трансформатора e_2 (рис. 4,б) в течение всего времени проводящего состояния диода, и на входе фильтра появляются участки отрицательного напряжения.

Длительность протекания тока λ зависит от соотношения активной и реактивной составляющих нагрузки. В этом случае среднее значение напряжения на выходе выпрямителя

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\lambda} \sqrt{2} E_2 \sin \vartheta \, d\vartheta = \frac{\sqrt{2} E_2 (1 - \cos \lambda)}{2\pi}. \quad (5)$$

Итак, при активно-индуктивной нагрузке длительность протекания тока через вентиль $\lambda > \pi$ и ток протекает при отрицательном напряжении на обмотке трансформатора.

В результате этого:

- на нагрузке возникают временные интервалы, в которых напряжение имеет отрицательный знак, что приводит к уменьшению среднего значения U_d (рис. 4,б);

- в кривой напряжения на вентиле (рис. 4,з) наблюдается скачок обратного напряжения. При протекании прямого тока на $p-n$ переходе диода накапливается заряд, при скачке обратного напряжения возникает импульс обратного тока через диод. Это приводит к появлению перенапряжений на индуктивностях схемы, что может привести к выходу из строя диодов.

Эффективным способом исключения вышеназванных явлений является включение обратного (нулевого) диода $VD2$ (рис. 4,д). На интервале $0—\pi$ ток нагрузки протекает через диод $VD1$, диод $VD2$ находится под обратным напряжением и ток не проводит. При $\vartheta > \pi$ диод $VD1$ запирается, ЭДС самоиндукции дросселя создает условия для отпирания диода $VD2$ и энергия, накопленная в катушке индуктивности, отдается в нагрузку (рис. 4,е). В этом случае напряжение на выходе выпрямителя не имеет отрицательных участков, т.е. на выходе выпрямителя будет такое же значение напряжения, как и при активной нагрузке, а также на вентиле не будет бросков обратного напряжения (рис. 4,ж, з).

Задание 3: Исследование работы однополупериодного выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку

1. Создайте схему выпрямителя с активно-индуктивной нагрузкой (рис. 5). В этой схеме в цепь сопротивления $R1$ введена индуктивность $L1=3$ Гн. В её параметрах задано параллельное сопротивление 100000 Ом.

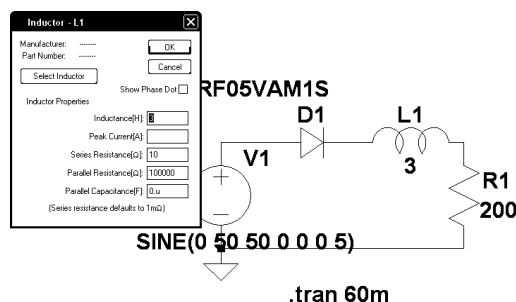


Рис. 5. Выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой

2. Исследуйте процессы в схеме. Получите временные диаграммы напряжений на выходе источника ЭДС, на катоде диода, на нагрузке и тока в цепи нагрузки при значениях индуктивности 3 и 0,3 Гн ($\omega L/R1 = 314 \cdot 3/200 = 4,71$). Обратите внимание на то, что при данном характере нагрузки диод остаётся открытым и после смены полярности питающего напряжения, что является причиной появления отрицательных полуволн напряжения на его катоде. Сравните длительность открытого состояния диода при разной величине индуктивности.

3. Введите в схему обратный диод (рис. 6)

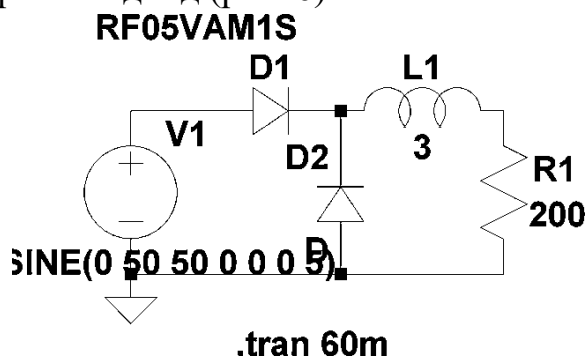


Рис. 6. Схема с обратным диодом.

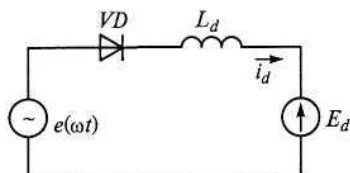
Исследуйте процессы в схеме при $L1=3$ Гн.

4. Работа выпрямителя на противоЭДС

Практический интерес может представлять также нагрузка в виде источника ЭДС постоянного тока, включенного с обратной для вентильного ключа полярностью. Такие схемы выпрямления называются схемами с противоЭДС в цепи нагрузки. Они применяются в устройствах заряда аккумуляторных батарей, в системах рекуперации электроэнергии из источника постоянного тока в сеть переменного тока и др.

Конденсатор фильтра большой емкости на выходе выпрямителя в некоторых режимах работы может рассматриваться как источник противоЭДС. На рис. 7,а представлена схема однополупериодного выпрямителя с диодом VD и противоЭДС E_d . В момент $t = t_1$ напряжение на диоде VD становится прямым, и он начинает проводить ток i_d , направленный встречно источнику

противоЭДС E_d . Подключение источника с напряжением $e(\omega t)$ к источнику противоЭДС E_d может вызвать неограниченный рост тока i_d . Для ограничения этого тока в цепь постоянного тока включен реактор с индуктивностью L_d .



а)

б)

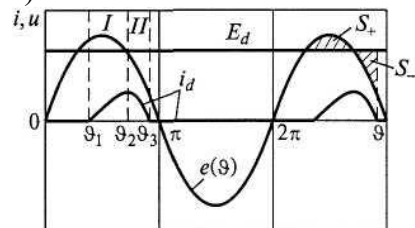


Рис. 7. Однополупериодная схема выпрямления с противоЭДС в нагрузке:
а — схема; б — диаграммы токов и напряжений

Задание 4: Исследование работы однополупериодного выпрямителя на противоЭДС

1. Создайте схему и исследуйте процессы в ней.

Отчёт по работе должен содержать:

- исследуемые схемы;
- временные диаграммы процессов;
- результаты измерений и построенные характеристики;
- выводы.

Вопросы

1. Поясните работу однополупериодного выпрямителя на активную нагрузку.
2. Как определяется коэффициент пульсации выпрямленного напряжения?
3. Объясните характер внешней характеристики выпрямителя при активной нагрузке.
4. Как влияет величина ёмкости сглаживающего конденсатора на форму и величины среднего и действующего значений выходного напряжения, на его коэффициент пульсаций?
5. Объясните причины изменения внешней характеристики выпрямителя при подключении сглаживающего конденсатора.
6. В каких случаях для сглаживания выходного напряжения выпрямителя применяется конденсатор, а в каких – дроссель?
7. Поясните особенности работы однополупериодного выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку.
8. Для чего в схему выпрямителя вводится обратный диод?
9. Поясните особенности работы однополупериодного выпрямителя на противоЭДС.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ДВУХПОЛУПЕРИОДНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы

Исследовать работу однофазных двухполупериодных выпрямителей при различном характере нагрузки: активной, активно-ёмкостной и при работе выпрямителя на противоЭДС.

Пояснения к работе

Задание 1: Исследование работы двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом на активную нагрузку.

Порядок работы

- Создайте схему выпрямителя с активной нагрузкой (рис. 1). Особенностью схемы является наличие трансформатора со средней точкой. Для его создания берём три индуктивности L1 и L2, L3, которые будут имитировать индуктивность первичной и вторичных обмоток трансформатора. В *SPICE* принята модель, согласно которой связь между обмотками определяется фиктивным схемным компонентом, который называется коэффициентом связи K между обмотками. Если $K=1$, то связь между обмотками - полная.

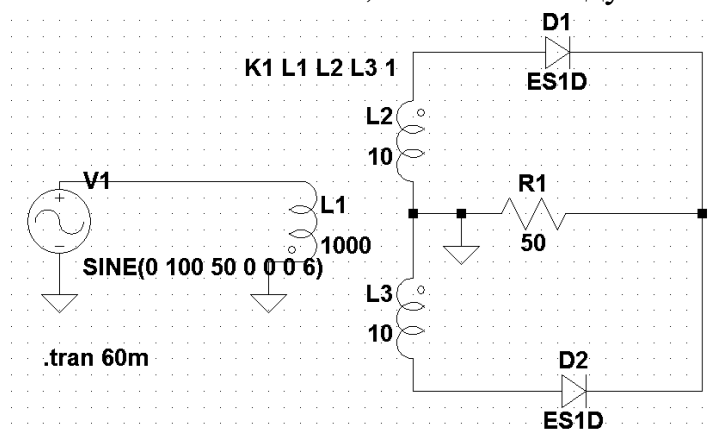



Рис. 1. Схема выпрямителя при работе на активную нагрузку

Коэффициент связи K размещается непосредственно на схеме в виде *SPICE* директивы. Для его размещения щёлкните левой кнопкой мышки по кнопке «*SPICE Directive*» . В результате появится окно ввода текста (рис. 2).

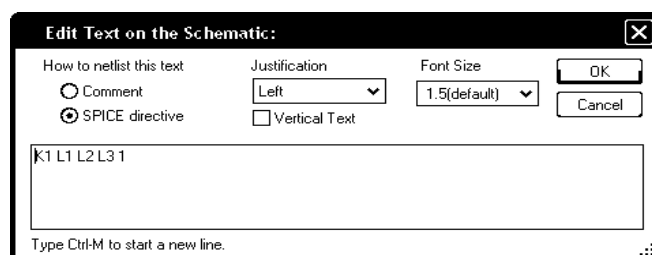


Рис. 2. Создания связи между индуктивностями

Щёлкнув левой кнопкой мышки по кнопке «ОК», переносим введённую строчку в окно редактора схем (рис. 1).

Коэффициент трансформации трансформатора задаётся путём выбора соотношения между величинами индуктивностей первичной L_1 и вторичных L_2 обмоток

$$K_T = W_1/W_2 = U_1/U_2 = \sqrt{L_1/L_2} = \sqrt{1000/10} = 10.$$

6. Исследуйте процессы в схеме выпрямителя. Получите временные диаграммы напряжений на вторичной обмотке трансформатора, на нагрузке и тока в цепи нагрузки.
7. По полученным временным диаграммам определите максимальное u_{dmax} и минимальное u_{dmin} значения выходного напряжения. Измерьте среднее значение выходного напряжения U_d и вычислите коэффициент пульсации.

Задание 2: Исследование работы двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом и с ёмкостным фильтром.

Порядок работы

1. Создайте схему выпрямителя с ёмкостным фильтром (рис. 3). Постоянная времени цепи разряда ёмкости $\tau_1 = R_1 \cdot C_1 = 50 \cdot 500 \cdot 10^{-6} = 25 \text{ мс} = 1,25T$.

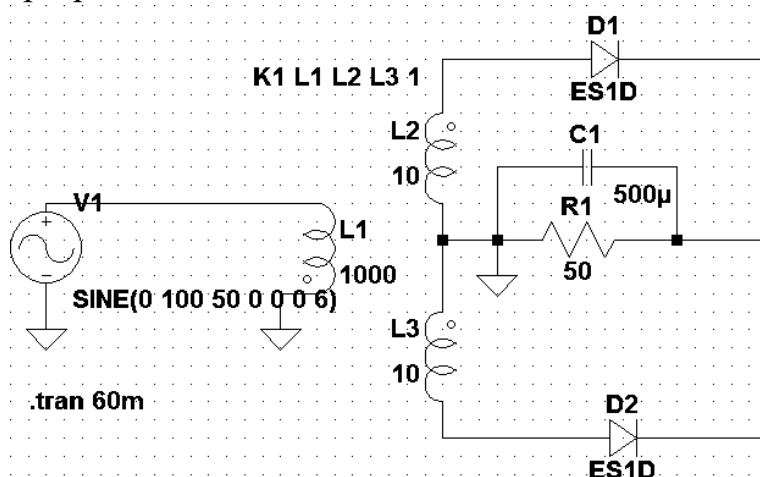


Рис. 3. Схема выпрямителя с ёмкостным фильтром

2. Исследуйте процессы в схеме выпрямителя. Получите временные диаграммы напряжений на вторичной обмотке трансформатора и на нагрузке.
3. По полученным временным диаграммам определите максимальное u_{dmax} и минимальное u_{dmin} значения выходного напряжения. Измерьте среднее значение выходного напряжения U_d и вычислите коэффициент пульсации.

Задание 3: Исследование работы однофазного мостового выпрямителя при работе на активную нагрузку.

1. Создайте схему выпрямителя с активной нагрузкой (рис. 4). В мостовой схеме трансформатор двух обмоточный. Коэффициент связи обмоток оставляем равным $K=1$, $K_T=10$.

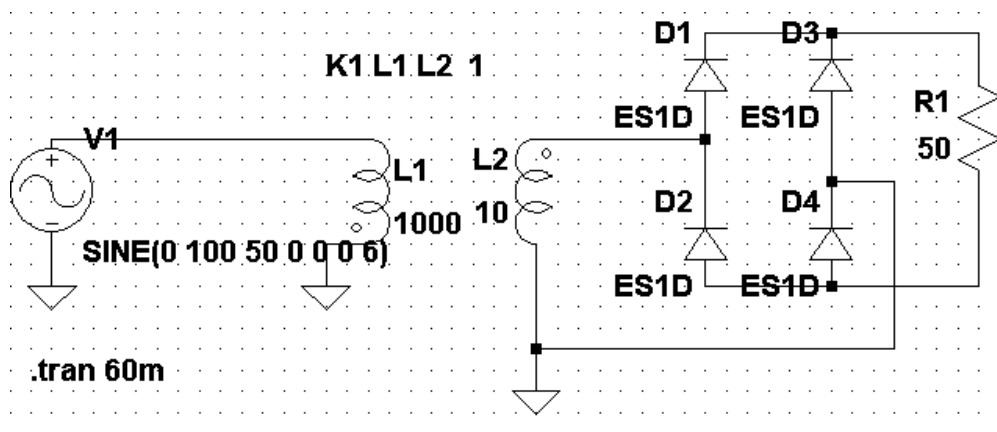


Рис. 4. Схема мостового выпрямителя с активной нагрузкой

- Исследуйте процессы в схеме выпрямителя. Получите временные диаграммы напряжений на вторичной обмотке трансформатора, на нагрузке и тока в цепи нагрузки.

Задание 4: Исследование работы двухполупериодного мостового выпрямителя с ёмкостным фильтром.

- Создайте схему выпрямителя с ёмкостным фильтром (рис. 5).

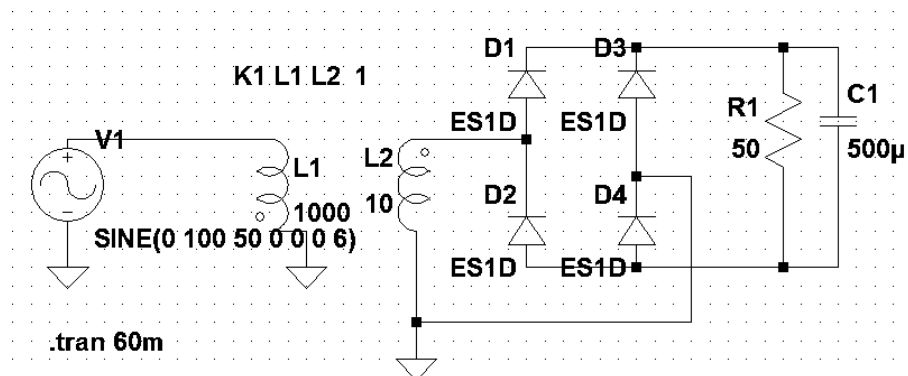


Рис. 5. Схема мостового выпрямителя с ёмкостным фильтром

- Исследуйте процессы в схеме выпрямителя. Получите временные диаграммы напряжений на вторичной обмотке трансформатора и на нагрузке.

Задание 5: Исследование работы двухполупериодного мостового выпрямителя на противоЭДС.

- Создайте схему выпрямителя с противоЭДС (рис. 6).

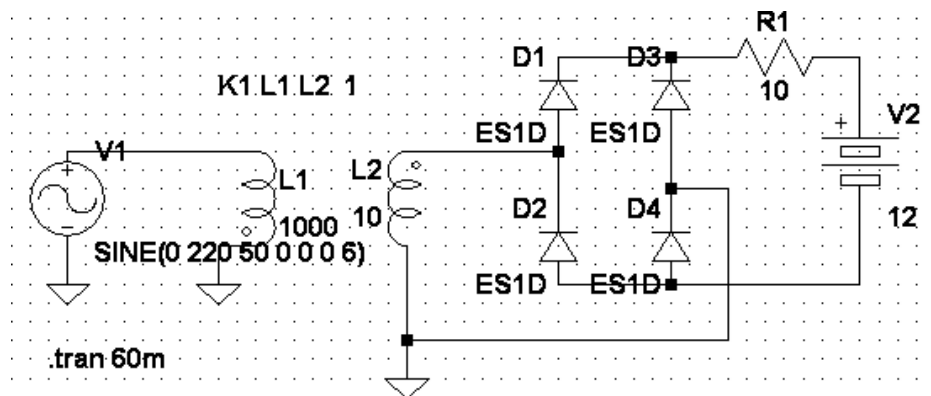


Рис. 6. Схема мостового выпрямителя с противоЭДС.

2. Исследуйте процессы в схеме выпрямителя. Получите временные диаграммы напряжений на вторичной обмотке трансформатора, на выходе выпрямителя и тока в цепи противоЭДС.
3. По полученным временным диаграммам определите, чем определяется величина тока заряда аккумуляторной батареи.

Отчёт по работе должен содержать:

- исследуемые схемы;
- временные диаграммы процессов;
- результаты измерений;
- выводы.

Вопросы

1. Поясните работу двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом на активную нагрузку.
2. Поясните работу двухполупериодного мостового выпрямителя на активную нагрузку.
3. Как влияет величина ёмкости сглаживающего конденсатора на форму и величину среднего значения выходного напряжения и на его коэффициент пульсаций?
4. Сравните схемы выпрямителей с нулевым выводом и мостовую.
5. В чём заключаются особенности работы выпрямителей на противоЭДС.

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы

Исследовать работу однофазных управляемых выпрямителей при различном характере нагрузки: активной и активно-индуктивной.

Пояснения к работе

При изучении управляемых выпрямителей важно иметь возможность исследовать процессы в схеме выпрямителя, снимать регулировочные характеристики при разном характере нагрузки. Представляется целесообразным вначале провести исследование однополупериодного выпрямителя, при этом основное внимание сосредоточить на изучении принципа действия и исследовании процессов в схеме.

Задание 1: Исследование работы однополупериодного управляемого выпрямителя на активную и активно-индуктивную нагрузку.

Порядок работы

Создайте схему выпрямителя (рис. 1).

Следует обратить внимание, что в схеме использовано два источника напряжения. В свойствах источника $V2$ задано, что он является источником синусоидального напряжения частотой 50 Гц с амплитудой 100 В и начальной фазой - 0° . Этот источник является для выпрямителя питающим. Источник $V1$ задан как импульсный источник напряжения амплитудой 10 В, длительностью периода 20 мс, длительностью импульса 0,5 мс и временем задержки импульса t_z относительно начала периода 4 мс. Он формирует управляющий сигнал на тиристор. Изменением времени задержки может регулироваться угол открытия тиристора α .

Для проведения анализа процессов достаточно щёлкнуть левой кнопкой мыши по иконке Run на панели инструментов. После этого активизируется окно Edit Simulation Command (Редактирование команды моделирования), в котором, по умолчанию, выбрана вкладка Transient. На этой вкладке, как минимум, нужно определить время остановки анализа процесса (Stop Time). В нашем примере установлено время 30 мс, т.е. 1,5 периода.

На рис. 1 показаны также осциллограммы напряжений на входе (1) и выходе (3) выпрямителя и тока в цепи управляющего электрода тиристора (2) при активно-индуктивном характере нагрузки. Каждой осциллограмме присваивается название в виде выражения, отображаемое в верхней части плоттера тем же цветом, например $V[N001]$.

Вычислить средние и действующие значения напряжений и токов можно, если нажав клавишу $\langle Ctrl \rangle$ и, удерживая её, щёлкнуть левой кнопкой мышки по названию интересующей осциллограммы. Для напряжений и токов рассчитываются среднее (*Average*) и действующее (*RMS*) значения за весь период измерения.

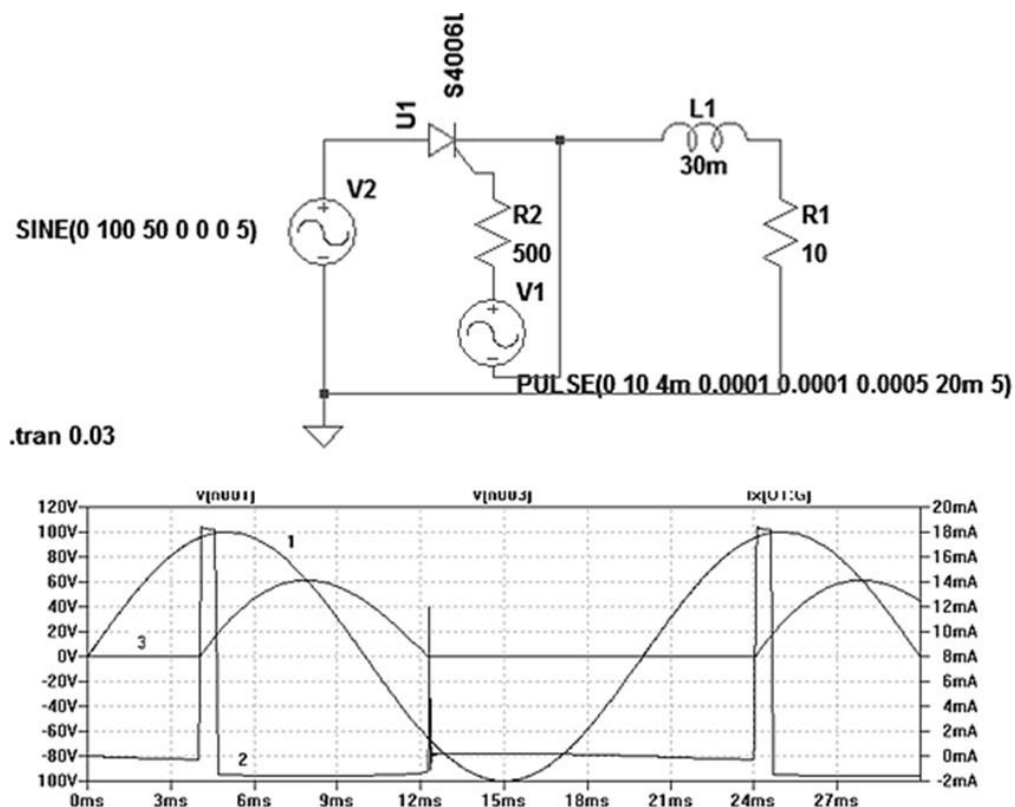


Рис. 1. Схема однополупериодного управляемого выпрямителя в *LTSpice* и осциллограммы напряжений на входе (1) и выходе выпрямителя (3) и тока в цепи управления тиристора (2)

Изменяя время задержки импульса управления относительно начала периода и выполняя измерение среднего значения выходного напряжения выпрямителя можем получить данные, необходимые для построения регулировочной характеристики выпрямителя.

Для активной и активно-индуктивной нагрузки:

1. Исследуйте процессы в схеме выпрямителя. Получите временные диаграммы напряжений на выходе источника ЭДС, на нагрузке, на тиристоре и тока в цепи нагрузки.
2. По полученным временным диаграммам определите максимальное u_{dmax} и минимальное значения выходного напряжения. Измерьте среднее значение выходного напряжения U_d и по выражению (2) вычислите коэффициент пульсации.
3. Снимите и постройте регулировочную характеристику выпрямителя. Для этого поочередно задайте из таблицы 1 и измерьте средние значения тока нагрузки и напряжения на ней.

Таблица 1.

$\alpha, ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180
$t_z, \text{мс}$	0	1,67	3,33	5	6,67	8,33	10
$U_d, \text{В}$							

Задание 2: Исследование работы двухполупериодного управляемого выпрямителя на активную и активно-индуктивную нагрузку.

На рис.2 представлена схема двухполупериодного управляемого выпрямителя со средней точкой и осциллограммы напряжений на его входе (1), выходе (2) и тока в цепи нагрузки (3) в переходном режиме. Характер нагрузки – активно-индуктивный, $\omega L_4/R_1 = 314 \cdot 0,2/5 = 12,56 > 5$, что обеспечивает достаточно хорошее сглаживание тока нагрузки.

Особенностью схемы является наличие трансформатора со средней точкой, двух тиристоров U1, U2 и двух источников управляющих сигналов V2, V3. Каждый источник управляющих импульсов формирует импульс на своём полупериоде работы схемы. Для V2 длительность задержки импульса задана 2 мс ($\alpha=36^\circ$), а для V3 – 12 мс ($180^\circ+36^\circ$). Качественно процесс соответствует активно-индуктивному характеру нагрузки, что видно по появлению в выпрямленном напряжении отрицательных полуволн и достаточно хорошо сглаженному току нагрузки.

После небольшой корректировки полученные схемы управляемых выпрямителей могут быть исследованы и при работе на противоЭДС и в инверторном режиме.

Для данной схемы выпрямителя повторите те же исследования, что и для однополупериодной схемы.

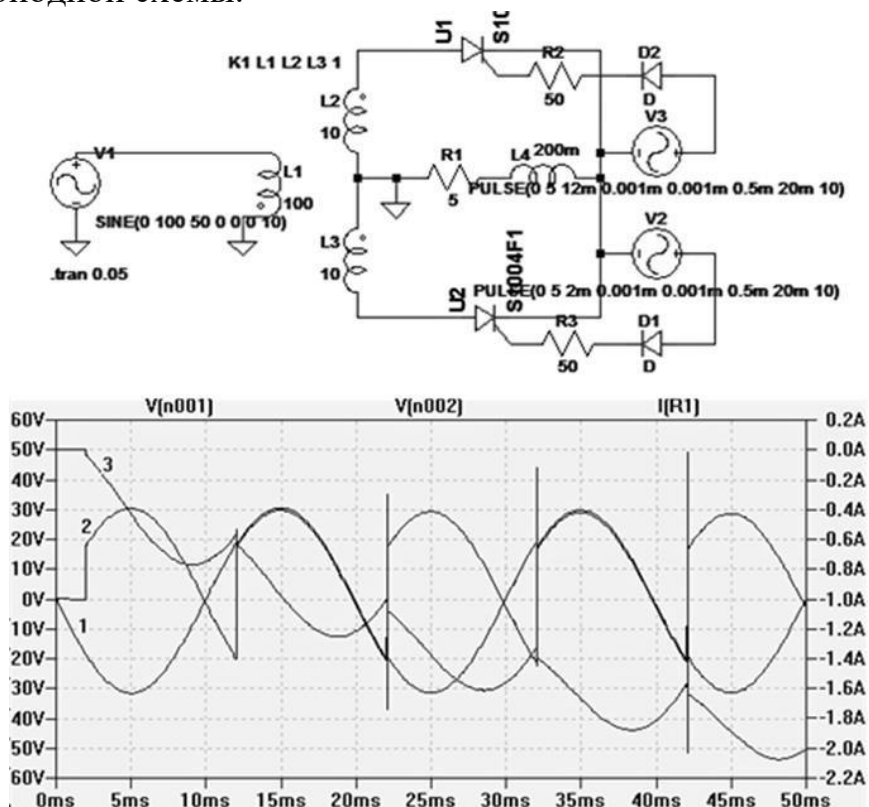


Рис. 2. Схема управляемого двухполупериодного выпрямителя со средней точкой и осциллограммы напряжений на его входе (1), выходе (2) и тока в цепи нагрузки (3)

Задание 3: Исследование работы однополупериодного управляемого выпрямителя в режиме инвертора

На рис. 3 показана схема однополупериодного инвертора.

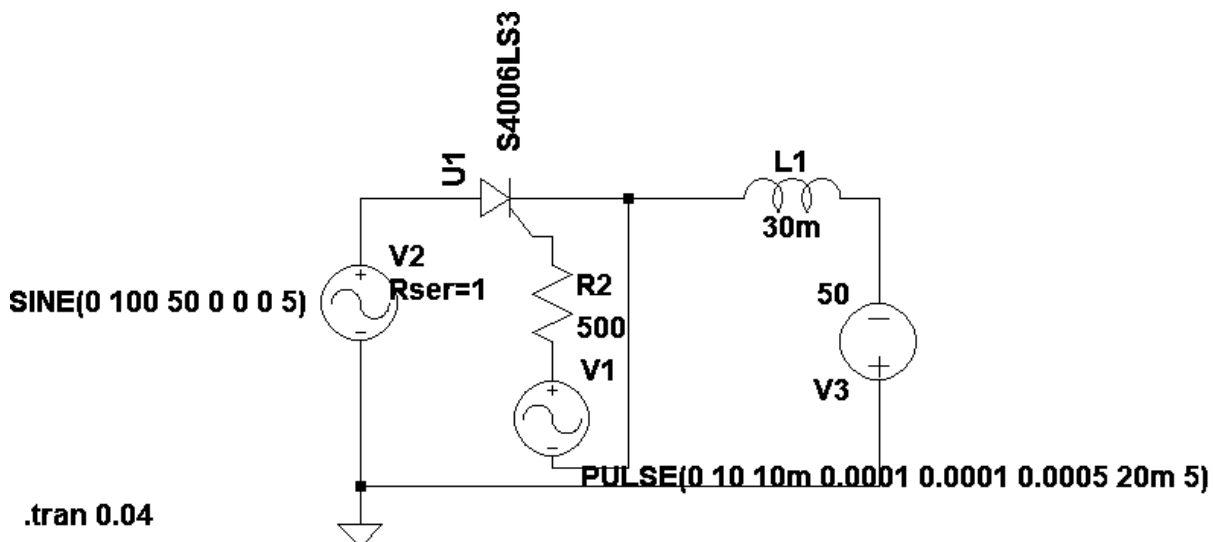


Рис. 3. Однополупериодный управляемый выпрямитель в режиме инвертора

Исследуйте процессы в схеме инвертора. Получите временные диаграммы напряжений на выходе источника ЭДС, на источнике постоянного напряжения, и тока в его цепи. По знакам напряжения на источнике постоянного напряжения и тока в его цепи определите направление мощности и сделайте вывод о режиме работы схемы.

Отчёт по работе должен содержать:

- исследуемые схемы;
- временные диаграммы процессов;
- результаты измерений;
- регулировочные характеристики выпрямителей;
- выводы.

Вопросы

1. Поясните работу однополупериодного управляемого выпрямителя на активную нагрузку.
2. Поясните работу однополупериодного управляемого выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку.
3. Объясните характер регулировочной характеристики выпрямителя
4. Поясните работу двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом на активную нагрузку.
5. Поясните, как перевести схему в инверторный режим?
6. Как определить режим работы схемы?

ЛИТЕРАТУРА

1. Сохор Ю.Н. Моделирование устройств в пакете LTspice/SwCad Ext: учебно-методическое пособие / Ю.Н. Сохор; Псковск. гос. политехн. ин-т – Псков: Издательство ППИ, 2008. – 165 с.
2. Описание системы моделирования LTspice.//Интернет ресурс –Режим доступа: <http://ltspice.linear-tech.com/software/scad3.pdf> / (дата обращения 10.09.2016).
3. Розанов Ю.К. Электронные устройства электромеханических систем: учеб. пособие / Ю.К Розанов, Е.М. Соколова; М.: Изд. Центр «Академия», 2004 – 272 с.
4. Попков О.З. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие / О.З. Попков; М.: Издательский дом МЭИ, 2007 – 200 с.