

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ**

Электромеханический факультет

Кафедра ТОЭ

**Методическое пособие по курсу
«Электротехника и электроника»**

2006 г.

1. Неуправляемый однофазный выпрямитель

Цель работы – ознакомление с электрической схемой и работой однофазного двухполупериодного выпрямителя с индуктивно-резистивной нагрузкой.

1.1. Программа работы

Работа выполняется в три этапа:

а) Перед посещением лаборатории составляется бланк протокола, включающий:

- рисунок электрической схемы выпрямителя с заданными параметрами;
- Расчет выпрямленного напряжения и его пульсации при заданном сопротивлении R_1 и индуктивности L_1 нагрузки;
- Расчет внешней характеристики выпрямителя с построением графика.

б) При посещении лаборатории:

- составляется компьютерная модель схемы выпрямителя с заданными параметрами;
- производится моделирование переходного процесса при включении схемы;
- снимаются осциллограммы выпрямленного напряжения;
- снимается внешняя характеристика выпрямителя.

в) По окончании лабораторного занятия составляется отчет по работе.

1.2. Исходные данные для расчета

В работе рассматривается неуправляемый однофазный выпрямитель с индуктивно-резистивной нагрузкой мощностью 3,5 кВт (рис. 1.1). Напряжение к. з. трансформатора 10 %, активное сопротивление обмоток $R_T = 2$ Ом, номинальное напряжение вторичной полуобмотки – 380 В.

В таблице 1.1 даны варианты величины активного и индуктивного сопротивления нагрузки R_1 и L_1 для предварительного расчета.

Т а б л и ц а 1.1 варианты исходных данных для домашнего задания

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R_1, \text{Ом}$	200	150	100	75	50	200	150	100	80	60	40	20
$L_1, \text{Гн}$	2	1	1	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Рекомендуемая форма таблицы для представления результатов расчетов и измерений – таблица 1.2.

Т а б л и ц а 1.2. Внешняя характеристика выпрямителя
 $U_m =$, $L_T =$, $L_1 =$.

$R_1, \text{ Ом}$	Выпрямленный ток $I_d, \text{ А}$		Выпрямленное напряжение $U_d, \text{ В}$		Пульсация тока нагрузки $\delta I, \text{ А}$	
	Расчет- ный	Измерен- ный	Расчет- ное	Измерен- ное	Расчет- ное	Измерен- ное
∞						
500						
200						
100						
50						
20						
10						

1.3. Описание схемы выпрямителя и расчетные формулы

Выпрямитель (рис.1.1) питается от синусоидального источника напряжения $G1$, подключенного к зажимам 5 и 6 первичной обмотки трансформатора $T1$. К зажимам 3 и 4 вторичных полуобмоток подключены выпрямительные диоды $D1$ и $D2$. Полуобмотки соединены так, что на зажимах 3 и 4 напряжение имеет одинаковую величину, но противоположную полярность: когда на верхнем зажиме напряжение достигает положительного максимума, на нижнем напряжение проходит отрицательный максимум, и наоборот.

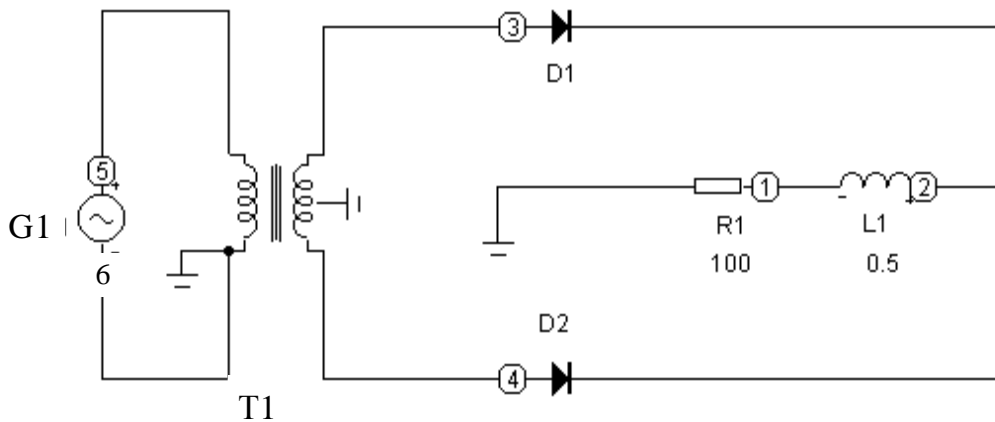


Рис. 1.1 Электрическая схема однофазного выпрямителя

Диоды проводят ток только при положительной полярности напряжения на аноде по отношению к катоду – в направлении, означенном стрелкой в его обозначении. Таким образом, диоды поочередно соединяют точку 2 нагрузки то с точкой 3, то с точкой 4, подавая на нагрузку положительные импульсы напряжения то с верхней, то с нижней полуобмотки. Форма напряжения на нагрузке показана на рис. 1.2 и рис. 1.3.

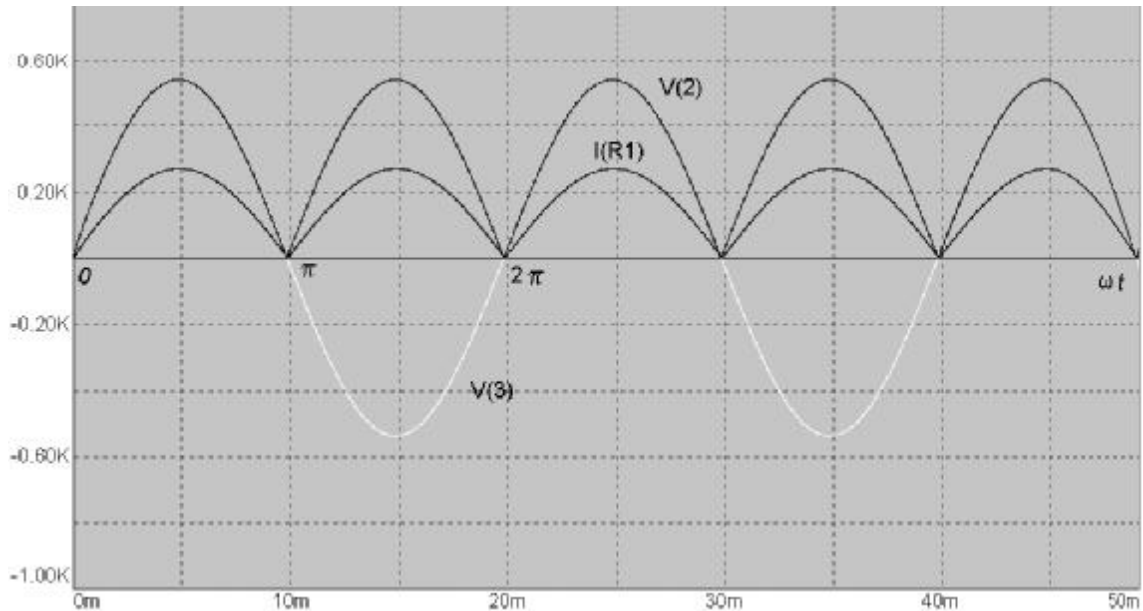


Рис. 1.2. Графики напряжения и тока выпрямителя с активной нагрузкой

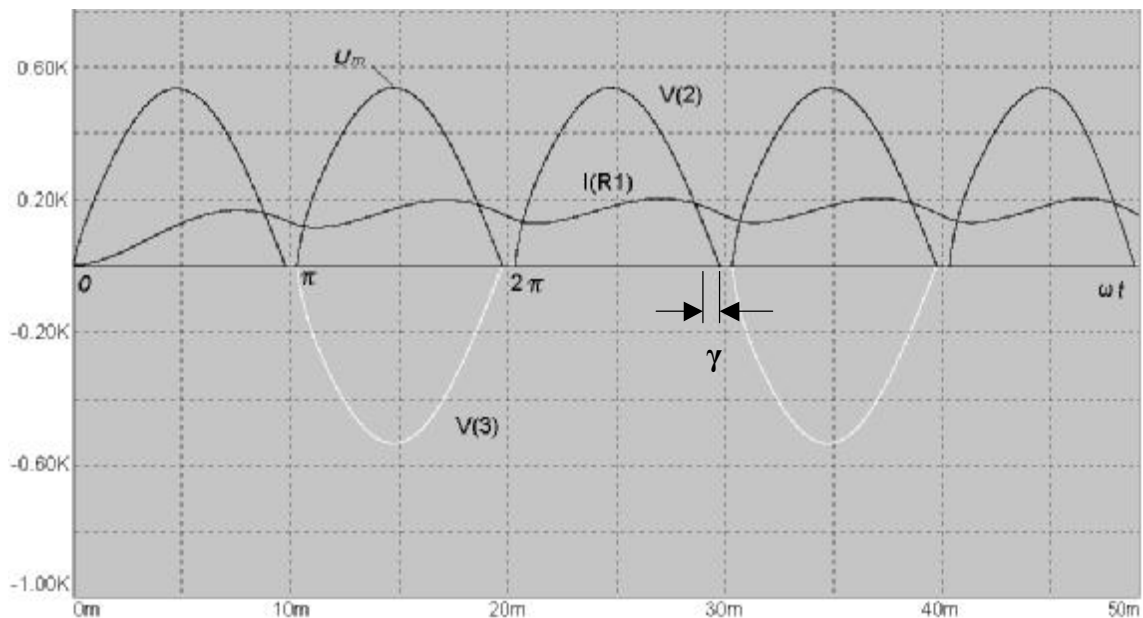


Рис. 1.3. Графики напряжения и тока выпрямителя с индуктивно-активной нагрузкой

Основной характеристикой выпрямленного напряжения является его среднее значение U_d

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^t u(t) dt . \quad (1.1)$$

Наибольшее напряжение U_{xx} выпрямитель дает на холостом ходу (при $R_1 = \infty$). Выпрямленное напряжение холостого хода U_{xx} в рассматриваемой схеме определяется формулой:

$$U_{xx} = \frac{2U_m}{\pi} , \quad (1.2)$$

где $U_m = U_T \sqrt{2}$ - амплитуда напряжения полуобмотки трансформатора.

Протекание тока нагрузки создает потерю напряжения на внутреннем сопротивлении выпрямителя ΔU_d . Зависимость напряжения U_d от тока нагрузки I_d называется внешней характеристикой выпрямителя:

$$U_d = U_{xx} - \Delta U_d(I_d) .$$

Потеря напряжения $\Delta U_d(I_d)$ зависит от активного сопротивления R_1 нагрузки, а также от индуктивного сопротивления обмоток трансформатора (сопротивления рассеивания) $x_T = \omega L_T$.

Снижение напряжения на индуктивности рассеивания L_T вызвано процессом коммутации тока в диодах при наличии индуктивного сопротивления нагрузки L_1 . При условии $2\omega L_1 \gg R_1$ диаграммы тока и напряжения в схеме имеют вид, показанный на рис. 1.3. Сильное сглаживание приводит к тому, что ток в нагрузке практически постоянен. Токи диодов при изменении полярности напряжения трансформатора стремятся измениться скачком, чтобы не нарушить постоянство тока нагрузки, однако индуктивность обмоток L_T тормозит этот процесс. Некоторое время оба диода оказываются открытыми одновременно, и в них начинает течь ток короткого замыкания одной полуобмотки на другую. Пока длится этот процесс (на протяжении угла γ на рис. 1.3), напряжение на нагрузке остается равным нулю. В результате *внешняя характеристика выпрямителя* приобретает вид:

$$U_d = \frac{2U_m}{\rho} - \frac{\nu L_T \cdot I_d}{\rho} , \quad I_d = \frac{2U_m}{\rho + \frac{\omega L_T}{R_1}} \quad (1.3)$$

Сопротивление рассеивания трансформатора ωL_T рассчитывается в предположении, что $R_T \ll L_T$, по формуле: $\omega L_T = \left(\frac{u_{кз}\%}{100} U_{ном} \right)^2 / P_{ном}$, где $u_{кз}\%$ - напряжение короткого замыкания в процентах, $U_{ном} = U_m / \sqrt{2}$ - номинальное напряжение вторичной обмотки (полуобмотки), $P_{ном} = 1,34 P_d$ -

номинальная мощность трансформатора; $P_d = U_d \cdot I_d$ – номинальная активная мощность нагрузки, R_T – активное сопротивление обмоток трансформатора.

Индуктивность нагрузки L_1 , свободно пропуская постоянную составляющую тока нагрузки I_d , создает индуктивное сопротивление переменной составляющей. За счет этого кривая тока нагрузки оказывается более гладкой по сравнению с напряжением в точке 2. Если требуется, чтобы ток нагрузки содержал минимальную величину переменной составляющей, последовательно с ней включают дополнительную индуктивность, играющую роль фильтра постоянной составляющей тока нагрузки. Качество сглаживания тока определяется соотношением между индуктивным сопротивлением $x_L = 2\omega L_1$, где $\omega = 314$ рад/с – угловая частота источника, и активным сопротивлением R_1 контура тока. При условии $2\omega L_1 \gg R_1$ в нагрузке течет практически постоянный ток; в ином случае кривая тока содержит пульсации δI , основная частота которых вдвое больше, чем частота источника питания.

Амплитуда пульсации тока нагрузки находится исходя из формы напряжения в точке 2. Учитывая только одну, основную частотную составляющую разложения в ряд Фурье кривой напряжения в точке 2 (ее частота равна 2ω , а амплитуда $\frac{4}{3p} U_m$), получим:

$$\delta I = I_{2m} = I_d \frac{2R_1}{3\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}. \quad (1.4)$$

1.4. Составление компьютерной модели схемы выпрямителя и проведение расчетов

Для выполнения работы используется пакет программ моделирования электрических схем «MICRO-CAP V» (демо-версия). Схема выпрямителя загружается в окно программы «SCHEMATIC» последовательностью команд: **Micro-Cap V, -File, -Open, -D:\MC5\DIRT.CIR, -File, -Save Us ...** [ввести свое название файла].

После загрузки на экране появляется изображение схемы с указанием ее параметров (рис.1.4). Подробнее о составлении схем в окне MC5 сказано в Приложении 1. Для приведения значений R_1 и L_1 в соответствие с заданными параметрами следует щелкнуть курсором по цифре, указывающей текущее значение параметра, а затем в открывшемся окне заменить его на новую величину. Нажатие на кнопку «ОК» подтверждает выбор нового значения и закрывает окно установки параметра. В нижней части экрана даны описания мат. Моделей элементов, используемых в схеме: диода и синусоидального источника. Описание модели трансформатора можно открыть, дважды нажав курсором на его изображение.

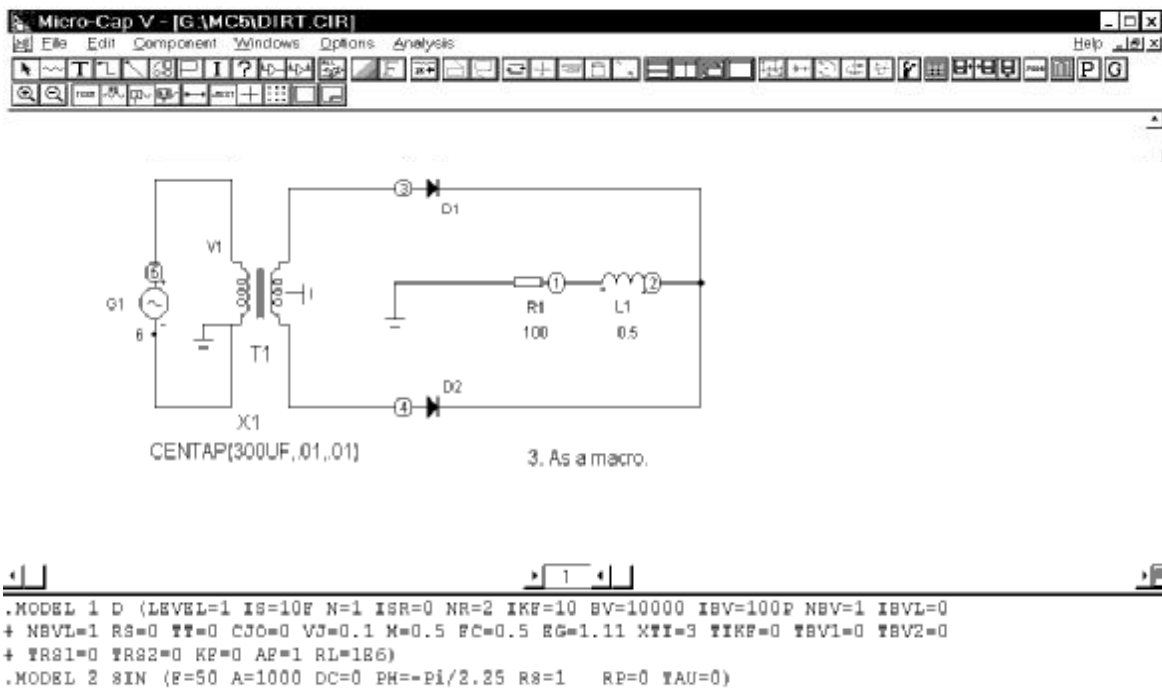


Рис. 1.4. Окно составления электрической схемы и описания ее элементов

Затем производится запуск программы расчета переходного процесса в схеме при подключении к источнику синусоидального напряжения $G1$ путем задания последовательности команд:

- **Analysis**
- **Transient analysis** [в открывшемся окне можно изменить список переменных, выводимых на график, их масштабы, а также интервал времени счета]
- **Run**

После выполнения расчета автоматически включается программа построения графиков рассматриваемых токов и напряжений и выводится окно с графиками рис. 1.5). На графиках обозначены: $V2$ – напряжение на нагрузке, I_{R1} - выпрямленный ток нагрузки, δI_{R1} - пульсация тока нагрузки, $V3$ – напряжение обмотки трансформатора. Возврат в окно схемы цепи задается командами:

- **Transient**
- **Exit Analysis**

Не рекомендуется изменять установленные масштабы напряжений и токов, а также величину интервала времени, на котором рассчитываются величины на графике.

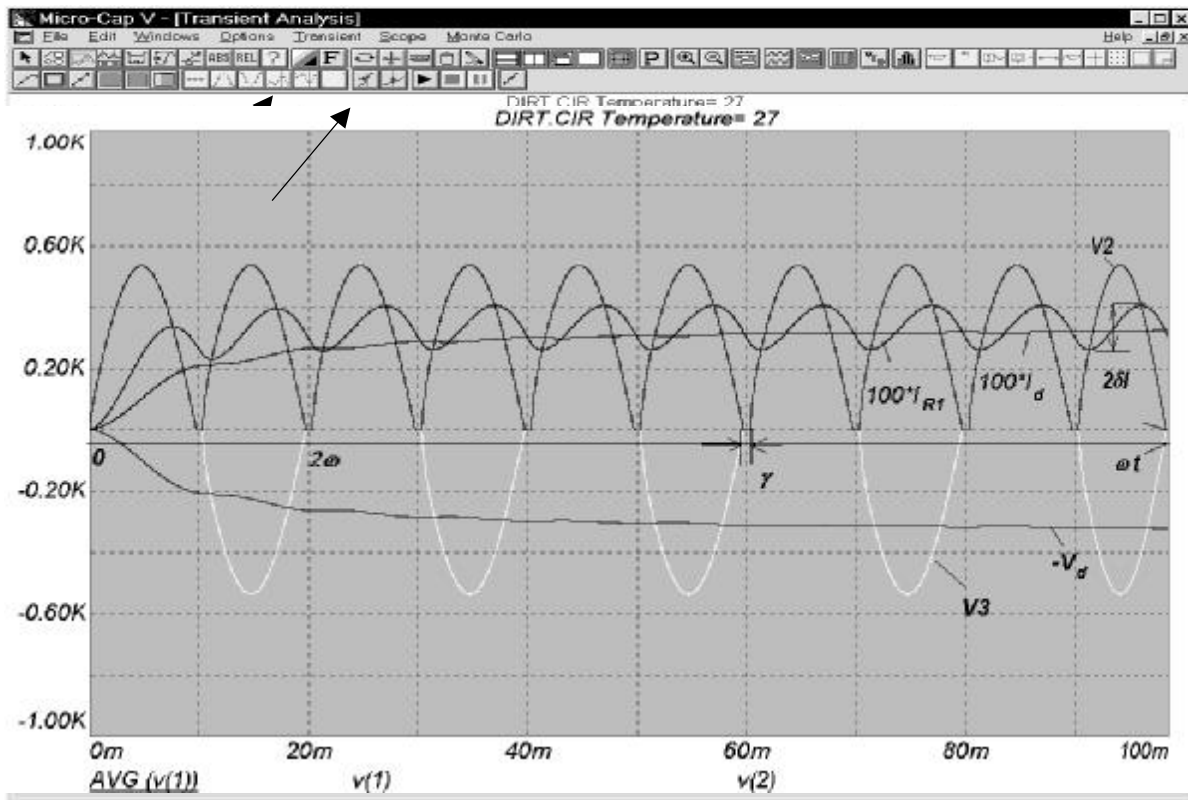


Рис. 1.5 Окно вывода результатов анализа переходного процесса

Для измерения мгновенных значений исследуемых величин удобно воспользоваться курсором в виде вертикальной линии, перемещаемой по рисунку графиков (кнопка включения курсора помечена стрелкой). В нижней части экрана появляются мгновенные значения указанных на графиках переменных в момент, соответствующий положению курсора на оси абсцисс.

Вывод графика на принтер производится командами **-File - Print**.

После получения осциллограмм напряжений и токов при заданных параметрах нагрузки возвращаемся к рисунку схемы выпрямителя с помощью команд: **- Transient - Exit Analysis**; задавая ряд других значений сопротивления нагрузки R_1 и повторяя расчет, фиксируем в таблице значения напряжения и тока нагрузки, а также измеренную величину пульсаций тока.

1.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) схему неуправляемого выпрямителя;
- б) таблицы расчетов и измерений внешней характеристики выпрямителя;
- в) снятые осциллограммы с расшифровкой их содержания и масштабов;
- г) выводы по работе.

2. Управляемый выпрямитель

Цель работы – ознакомление со способом управления током нагрузки в выпрямителе с помощью регулирования фазы отпирания управляемых вентилях.

2.1. Программа работы

- а) Перед началом работы:
 - нарисовать электрическую схему управляемого выпрямителя;
 - рассчитать регулировочную характеристику при заданных параметрах схемы и построить ее график.
- б) При посещении лаборатории:
 - создать компьютерный макет схемы и установить на нем заданные параметры элементов;
 - снять осциллограммы тока и напряжения на различных элементах схемы при заданных параметрах и угле регулирования $\alpha = \pi/6$;
 - снять регулировочные характеристики при активной нагрузке и при индуктивно-резистивной нагрузке.
- в) Составить отчет по работе.

2.2. Исходные данные для расчета

В работе рассматривается управляемый однофазный выпрямитель с индуктивно-резистивной нагрузкой мощностью $P_H = 3,5$ кВт (рис. 2.1).

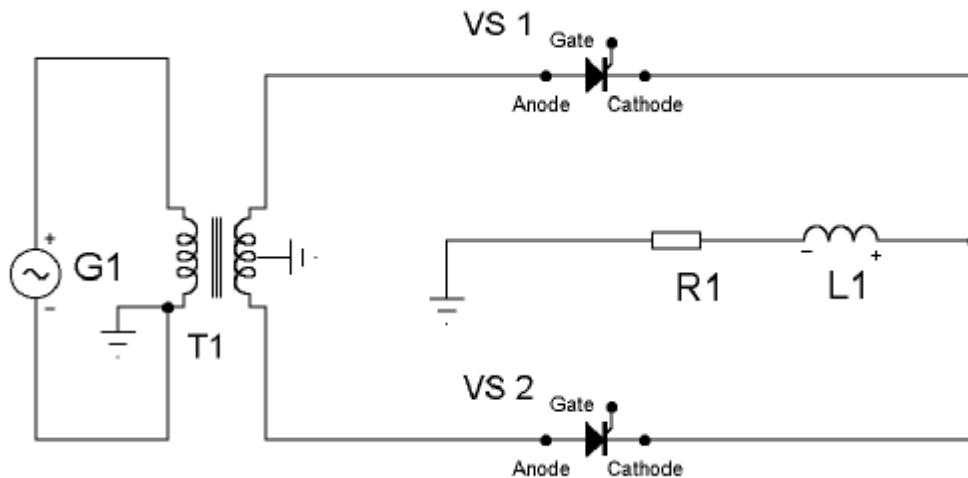


Рис. 2.1 Электрическая схема однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя с тиристорными ключами

Напряжение к. з. трансформатора $u_{кз} = 10 \%$, активное сопротивление обмоток $R_T = 2 \text{ Ом}$, номинальное напряжение вторичной полуобмотки – 380 В.

В таблице 2.1 даны варианты величины активного и индуктивного сопротивления нагрузки R_1 и L_1 для предварительного расчета.

Т а б л и ц а 2.1 варианты исходных данных для домашнего задания

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R_1, \text{Ом}$	200		100	75	50	200	150	100	80	60	40	20
$L_1, \text{Гн}$	2	1	1	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Рекомендуемая форма таблицы для представления результатов расчетов и измерений – таблица 2.2.

Т а б л и ц а 2.2. Внешняя характеристика выпрямителя

$U_m =$, $L_T =$, $L_1 =$, $R_1 =$.

Угол регулирования, α	Выпрямленный ток I_{cb} А			
	Расчетный		Измеренный	
	При $L_1=0$	При $L_1=\infty$	При $L_1=0$	При $L_1=$
$\pi/20$				
$2\pi/10$				
$3\pi/10$				
$4\pi/10$				
$5\pi/10$				
$6\pi/10$				
$7\pi/10$				
$8\pi/10$				
$9\pi/10$				
$\pi/2$				

2.3. Описание схемы управляемого выпрямителя и расчетные формулы

Управляемые вентили (тиристоры) позволяют регулировать величину выпрямленного тока в выпрямителе путем изменения фазы включения тиристора α (рис. 2.2) в течение каждой половины периода напряжения питания. При нулевой фазе α работа выпрямителя не отличается от работы неуправляемого выпрямителя (см. описание работы №1). Задержка отпирания

на угол α , обеспечиваемая специальной схемой управления тиристорами, приводит к снижению выпрямленного напряжения за счет уменьшения площади импульсов напряжения, приложенного к нагрузке, как показано на рис. 2.2. и рис. 2.3. Зависимость выпрямленного напряжения от величины угла управления α называется *регулирующей характеристикой* управляемого выпрямителя.

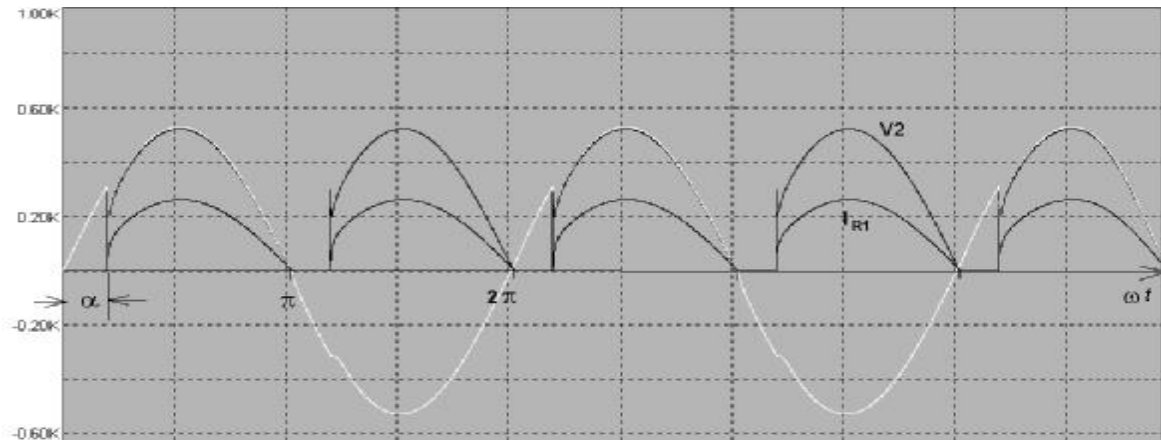


Рис. 2.2. Диаграммы тока и напряжения в схеме рис. 2.1 при активной нагрузке

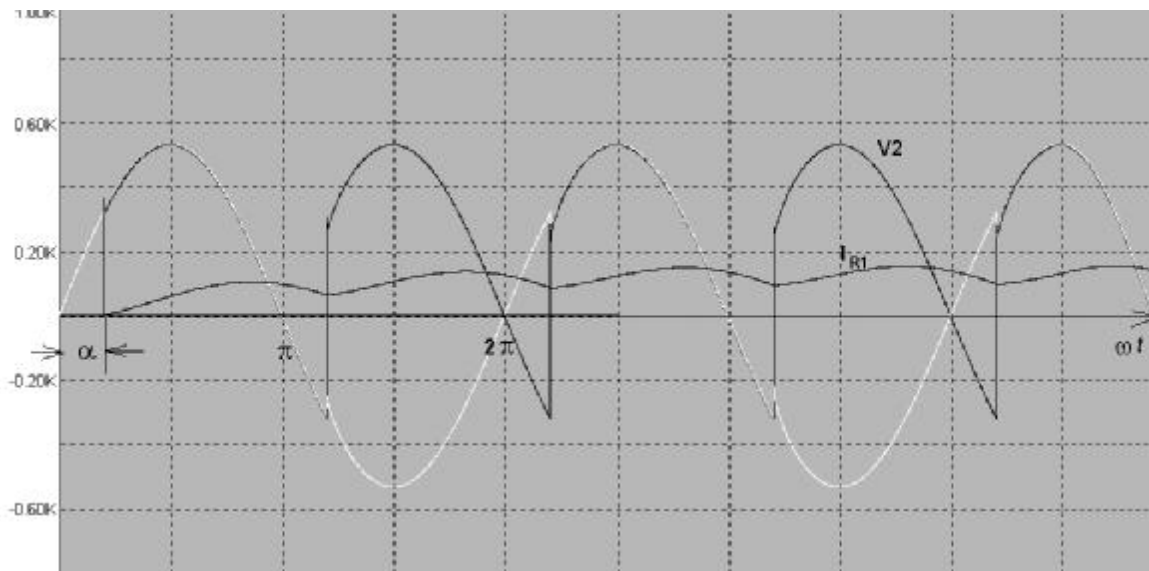


Рис. 2.3. . Диаграммы тока и напряжения в схеме рис. 2.1 при индуктивно-резистивной нагрузке

Если тиристоры работают в режиме неуправляемых вентилях (угол регулирования $\alpha = 0$) и индуктивность в цепи нагрузки отсутствует, то ток поочередно проходит в нагрузку от верхней и нижней полуобмоток трансформатора T в зависимости от того, на какой полуобмотке напряжение принимает положительную полярность. Среднее значение выпрямленного

тока I_d при $\alpha = 0$ рассчитаем без учета индуктивности L_T трансформатора, разделив постоянную составляющую выпрямленного напряжения U_d на сопротивление нагрузки:

$$U_d = \frac{2U_m}{\pi}, \quad I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{2U_m}{\pi R}.$$

Отпирание вентилей осуществляется подачей на управляющие электроды тиристоров в нужные моменты импульсов от специальной электронной схемы. При активной нагрузке (если индуктивность L_1 отсутствует), регулировочная характеристика выпрямителя определяется уравнениями:

$$U_d = \frac{U_m}{\pi}(1 + \cos \alpha); \quad I_d = \frac{U_m}{\pi R}(1 + \cos \alpha). \quad (2.1)$$

Диапазон регулирования $\alpha = 0 \div \pi$. Расчет регулировочной характеристики производится для заданного значения R_1 по (2.1). Результаты заносятся в табл. 2.2 и на график зависимости I_d от угла регулирования α .

При наличии индуктивности L_1 происходит сглаживание формы тока нагрузки – она приближается по форме к постоянной составляющей тока (рис. 2.3). В момент смены ветвей выпрямления ток в нагрузке не равен нулю. Индуктивность рассеивания трансформатора L_T препятствует мгновенному спаду тока в запирающемся вентиле и, соответственно, быстрому нарастанию тока в отпирающемся вентиле. В течение некоторого времени, называемого временем коммутации, оба вентиля оказываются открытыми, т. е. возникает режим короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора через вентили. Ток короткого замыкания ускоряет коммутацию, т. е. отпирание вступающего и запираение закончившего работу вентилей.

Ток короткого замыкания определяется выражением:

$$i_K(\omega t) = I_{Km}(1 - \cos \omega t) = \frac{U_m}{\omega L_T}(1 - \cos \omega t).$$

Коммутация заканчивается, когда мгновенное значение тока коммутации при угле γ достигнет величины тока нагрузки I_d , и запрется ранее работавший вентиль:

$$I_{Km}(1 - \cos \gamma) = I_d.$$

Из этих соотношений можно определить значение угла коммутации γ , как функцию сопротивления нагрузки R_1 и индуктивного сопротивления рассеяния обмоток трансформатора L_T :

$$\gamma = 2 \sqrt{\frac{I_d}{I_{Km}}} = 2 \sqrt{\frac{\nu L_T}{\pi R_1}}, \quad (2.2)$$

откуда следует, что угол коммутации возрастает с увеличением индуктивности рассеяния трансформатора L_T и с увеличением тока нагрузки I_d (при уменьшении сопротивления нагрузки R_1).

Короткое замыкание при коммутации приводит к некоторой потере напряжения, которая равна

$$\Delta u_\gamma = \frac{\omega L_T}{\pi} I_d.$$

При наличии индуктивности L_1 , за счет накопленной в ней энергии ток в нагрузке, если еще заперт очередной вентиль, продолжает протекать и при отрицательной полярности напряжения ранее работавшей ветви, вслед за положительным импульсом. Это уменьшает среднее выпрямленное напряжение U_d .

Если $\alpha = \pi/2$ и $\omega L_1 \gg R_1$, то $U_d = 0$, так как положительный и отрицательный импульсы напряжения будут равны по площади. Поэтому в таком выпрямителе диапазон углов регулирования $\alpha = 0 \div \pi/2$.

Регулировочная характеристика схемы с индуктивно-резистивной нагрузкой приобретает вид:

$$U_d = \frac{2U_m}{\pi} \cos \alpha - \frac{\omega L_T \cdot I_d}{p}. \quad (2.3)$$

2.4. Составление компьютерной модели схемы выпрямителя и проведение расчетов

Для выполнения работы используется пакет программ моделирования электрических схем «MICRO-CAP V» (демо-версия). Схема выпрямителя загружается в окно программы «SCHEMATIC» последовательностью команд: **-Micro-Cap V; -File; -Open; -D:\MC5\DIRN.CIR; -File; -Save Us ...** [ввести свое название файла].

После загрузки на экране появляется изображение схемы с указанием ее параметров (рис.2.4). Подробнее о составлении схем в окне MC5 сказано в Приложении 1. Для приведения значений R_1 и L_1 в соответствие с заданными параметрами следует щелкнуть курсором по цифре, указывающей текущее значение параметра, а затем в открывшемся окне заменить его на новую

величину. Нажатие на кнопку «ОК» подтверждает выбор нового значения и закрывает окно установки параметра.

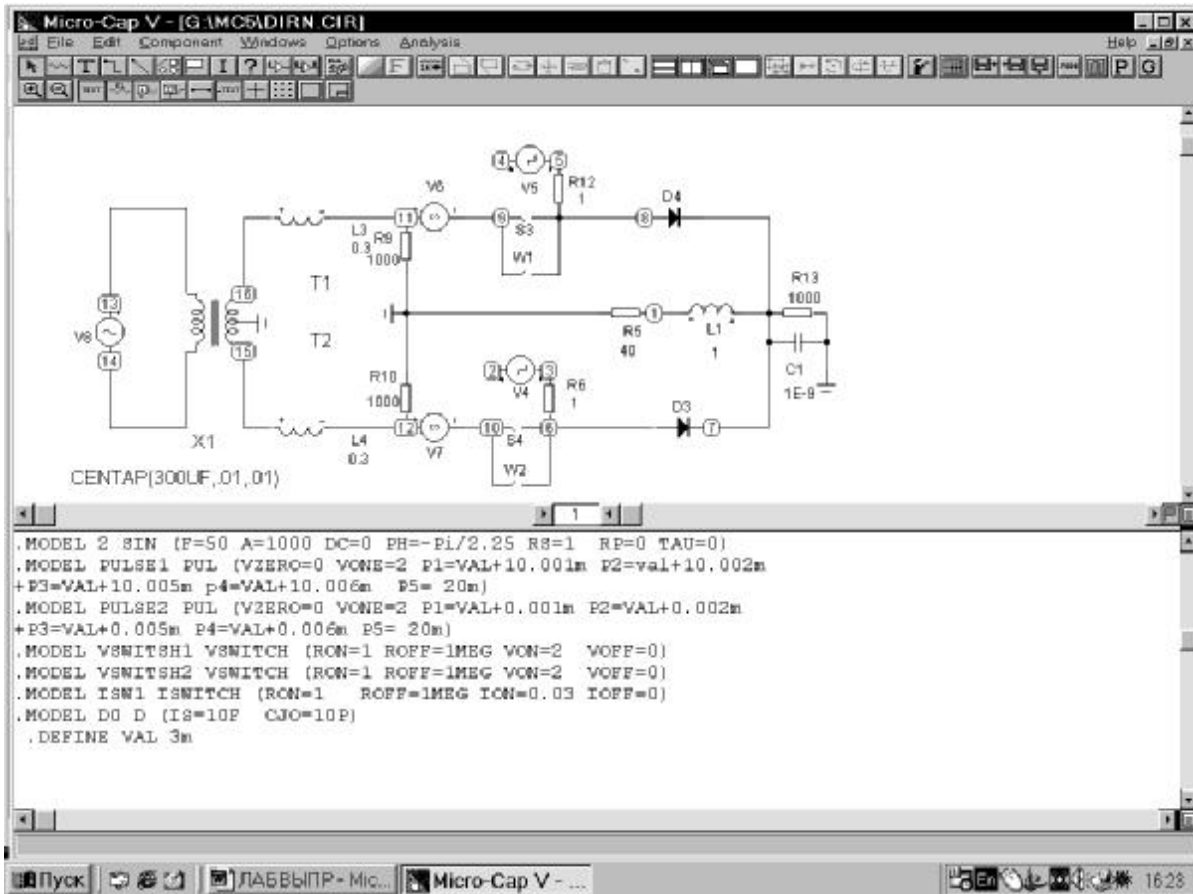


Рис. 2.4. Окно составления электрической схемы и описания ее элементов

Изменение угла регулирования α производится установкой в нижней строке списка параметров элементов схемы : `.DEFINE VAL ... m` величины VAL запаздывания момента включения тиристоров относительно начала полупериода синусоиды (в миллисекундах). Одна миллисекунда соответствует величине угла регулирования $\alpha = \pi/10$.

Затем производится запуск программы расчета переходного процесса в схеме при подключении к источнику синусоидального напряжения V8 путем задания последовательности команд: - **Analysis**; - **Transient analysis** [в открывшемся окне можно изменить список переменных, выводимых на график, их масштабы, а также интервал времени счета]; - **Run**.

После выполнения расчета автоматически включается программа построения графиков рассматриваемых токов и напряжений и выводится окно с графиками рис. 2.5).

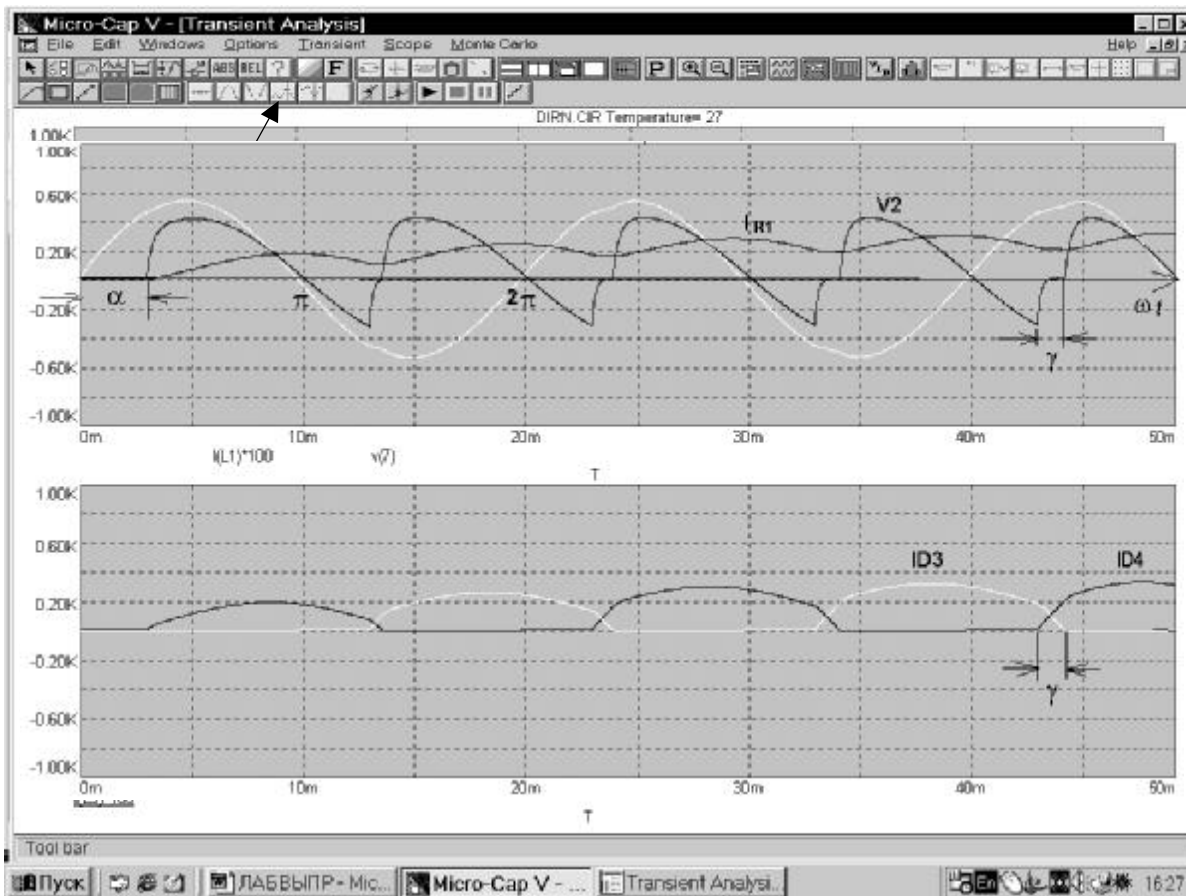


Рис. 2.5. Окно вывода результатов расчета переходного процесса включения цепи

Обозначения на графиках: V_2 – напряжение на нагрузке, I_{RT} – ток нагрузки (величина тока в амперах определяется делением на 100 значения, измеренного по левой шкале графика), ID_3 и ID_4 – токи в верхнем и нижнем вентилях, V_3 – напряжение обмотки трансформатора α – угол управления, γ – угол коммутации. Измерение выпрямленного тока I_d производится по среднему значению кривой I_{RT} на крайнем справа периоде этой кривой. Возврат в окно схемы цепи задается командами: **-Transient; -Exit Analysis.**

Для измерения мгновенных значений исследуемых величин удобно воспользоваться курсором в виде вертикальной линии, перемещаемой по рисунку графиков. Курсор выводится на экран нажатием кнопки, помеченной на рис.2.5 стрелкой. В нижней части экрана появляются мгновенные значения указанных на графиках переменных в момент, соответствующий положению курсора на оси абсцисс.

Вывод графика на принтер производится командами **-File - Print**.

После получения осциллограмм напряжений и токов при заданных параметрах нагрузки возвращаемся к рисунку схемы выпрямителя с помощью команд: **- Transient - Exit Analysis**; задавая ряд других значений угла α и повторяя расчет, фиксируем в таблице 2.2 значения выпрямленного

тока нагрузки. Не рекомендуется изменять установленные масштабы напряжений и токов на графике.

2.5. Содержание отчета

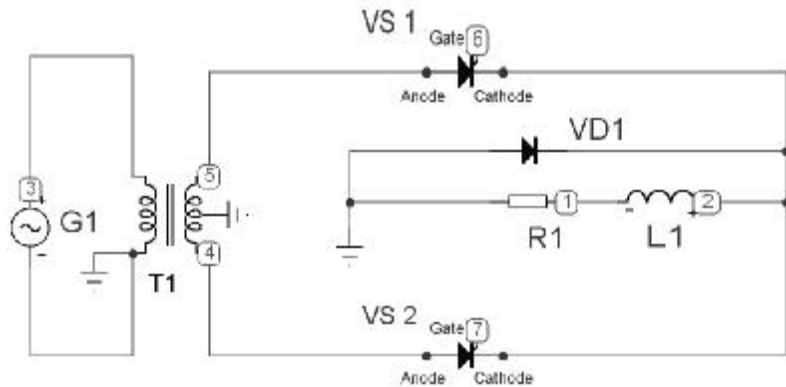
Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) таблицы с результатами расчетов и измерений
- в) график регулировочных характеристик для случаев активной и индуктивно-резистивной нагрузки;
- г) осциллограммы напряжения и тока при $\alpha = \pi/6$ и выводы по работе.

2.6. Дополнительное задание для исследования управляемого выпрямителя. Анализ работы схемы при наличии встречного диода

Управляемый выпрямитель приводит к уменьшению $\cos \varphi$ потребителя, так как угол сдвига φ между потребляемым током и питающим напряжением оказывается равным $\varphi = \alpha + \gamma/2$. Для уменьшения угла φ и обеспечения более плавной регулировки цепь нагрузки – катодный реактор шунтируют встречным неуправляемым вентилем VD (рис 2.6)

Рис. 2.6.
Схема управляемого выпрямителя со встречным диодом



Он обеспечивает путь замыкания тока I_d через нагрузку R_1 от индуктивного накопителя энергии L_1 , пока заперты вентили V 1 и V 2. Регулировочная характеристика при наличии встречного диода аналогична характеристике схемы с активной нагрузкой без реактора:

$$U_d = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \alpha); \quad I_d = \frac{U_m}{\pi R} (1 + \cos \alpha). \quad (3.2)$$

Диапазон регулирования при $2\omega L_1 \gg R_1$: $\alpha = 0 \div \pi$. Исходные данные для расчетов регулировочных характеристик приведены в табл. 2.1. Предлагается самостоятельно изменить схему, добавив в нее встречный диод VD1, и снять ее регулировочную характеристику.

3. Однофазный инвертор, ведомый сетью

Цель работы – Ознакомление со схемой и принципом действия мощного ведомого сетью инвертора.

3.1 Программа работы

а) Перед посещением лаборатории составляется бланк протокола, включающий:

- рисунок электрической схемы инвертора с заданными параметрами;
- определение диапазона углов регулирования и расчет регулировочной характеристики заданной схемы;
- график регулировочной характеристики.

б) При посещении лаборатории:

- составляется компьютерная модель схемы инвертора с заданными параметрами;
- производится моделирование переходного процесса при включении схемы;
- снимаются осциллограммы напряжения и токов на элементах схемы инвертора;
- снимается регулировочная характеристика инвертора.

в) По окончании работы составляется итоговый отчет.

3.2. Исходные данные для расчета

В работе исследуется инвертор напряжения, отдающий энергию в сеть переменного тока промышленной частоты от источника постоянного напряжения (аккумуляторной батареи). Схема инвертора представлена на рис. 3.1. Номинальное напряжение обмотки трансформатора со стороны источника постоянного напряжения – 380 В, номинальная мощность трансформатора – 3,5 кВт, напряжение к. з. трансформатора $u_{кз} = 10\%$, активное сопротивление обмоток – 2 Ом. В таблице 3.1 даны величины индуктивности дросселя инвертора L_1 и напряжение источника постоянного напряжения E_1 .

Т а б л и ц а 1.1 варианты исходных данных для домашнего задания

№ бригад.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$E_1, В$	200	250	300	275	150	200	175	275	125	250	300	225
$L_1, Гн$	2	1	1	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Рекомендуемая форма таблицы для записи результатов расчета и измерений – таблица 3.2.

Т а б л и ц а 3.2. Входная характеристика инвертора

$E_1 =$, $L_1 =$, $L_T =$.

Угол опережения, β	Выпрямленный ток I_d , А			
	Расчетный		Измеренный	
	При $L_1=0$	При $L_1=\infty$	При $L_1=0$	При $L_1=$
$\pi/20$				
$2\pi/10$				
$3\pi/10$				
$4\pi/10$				
$5\pi/10$				
$6\pi/10$				
$7\pi/10$				
$8\pi/10$				
$9\pi/10$				
$\pi/2$				

3.3. Описание схемы инвертора и расчетные формулы

Схема исследуемого инвертора представлена на рис. 3.1. Если э. д. с. E_1 аккумуляторной батареи $GB1$ направлена навстречу току I_d тиристорных ключей $VS1$ и $VS2$ (в сторону, обратную изображенной на рис. 3.1), то схема при небольших углах управления α работает как обычный выпрямитель: энергия сети переменного тока потребляется в нагрузку, происходит подзарядка аккумуляторной батареи $GB1$.

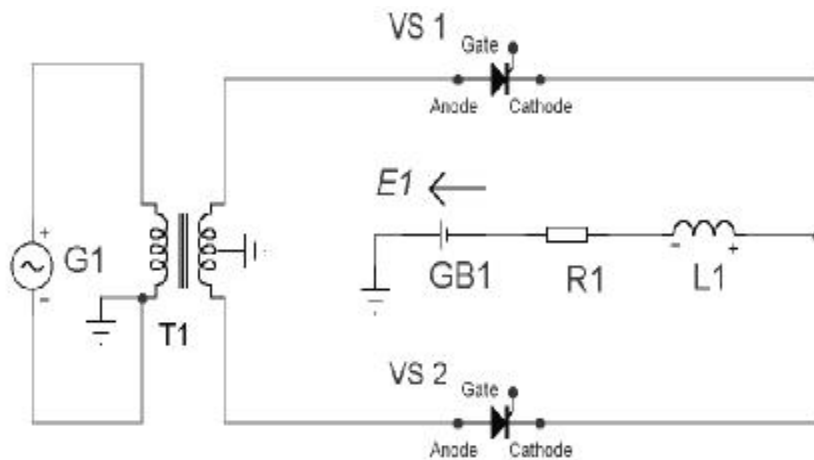


Рис. 3.1.
Электрическая
схема инвертора,
ведомого сетью

В этом режиме среднее значение выпрямленного напряжения определяется выражением :

$$U_{d\alpha} = \frac{2U_m}{\pi} \cos \alpha - \frac{I_{d\alpha} \omega L_T}{\pi} \quad (\alpha < \pi/2).$$

Это уравнение показывает, что с увеличением угла управления среднее значение выпрямленного напряжения снижается. При $\alpha = \pi/2$ первое слагаемое в формуле для $U_{d\alpha}$ равно нулю, а значение $U_{d\alpha}$ отрицательно. При $\alpha > \pi/2$ оба слагаемых отрицательны. Если при этом переключить полярность напряжения батареи и направить ее э. д. с., как показано на рисунке, то преобразователь перейдет в режим инвертора. Соответствующие графики напряжения и тока изображены на рис. 3.2.

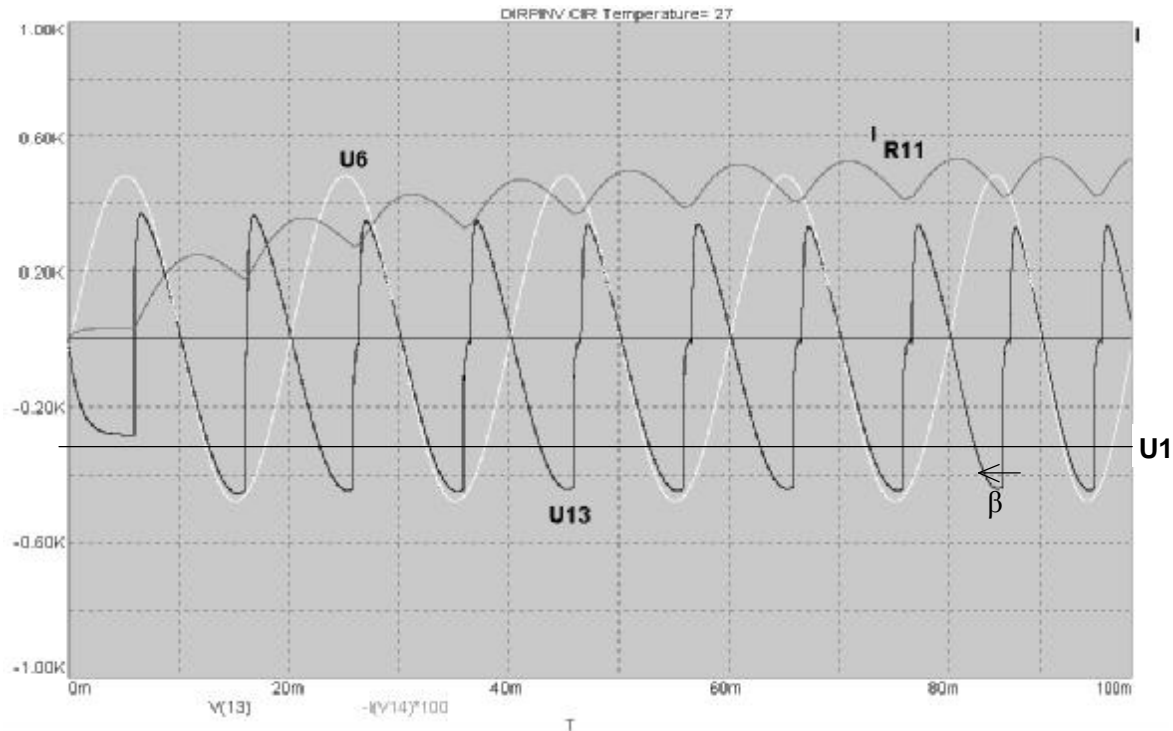


Рис. 3.2. Графики напряжения источника 50 Гц (U6), напряжения на дросселе (U13) и тока в батарее (I_{R11}) в инверторном режиме работы схемы.

Э. д. с. и ток в обмотке трансформатора в течение большей части полупериода не совпадают по направлению, а направление э. д. с. и тока в аккумуляторе совпадают, следовательно, энергия передается от аккумуляторной батареи в сеть переменного тока.

Инверторы обычно характеризуются не углами управления α , а углами опережения $\beta = \pi - \alpha$ (рис. 3.2).

Основные характеристики инвертора выражаются уравнениями:

$$I_{d\beta} = \frac{E_{Tm}}{\nu L_T} [\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta], \quad U_{d\beta} = -\frac{2E_{Tm}}{\pi} \cos \beta - \frac{\nu L_T I_{d\beta}}{\pi}.$$

Последнее уравнение называется входной характеристикой инвертора.

Запирание вентиля, проводящего ток, возможно лишь тогда, когда отпирание соседнего вентиля приводит к изменению полярности напряжения на вентиле с прямого на обратное. Длительность приложения обратного напряжения должна быть достаточной, чтобы успел завершиться процесс коммутации тока в вентилях и восстановилась способность вентиля выдерживать прямое напряжение. Если это условие не выполняется, вентиль не успеет запереться, и в результате оба вентиля окажутся в отпертом состоянии. Как видно из схемы инвертора, в этом случае произойдет короткое замыкание источника питания, и работа схемы будет нарушена.

Это определяет условие устойчивости работы инвертора: угол опережения β должен превышать сумму угла коммутации γ и угла $\delta = \omega t_{\text{выкл}}$, где $t_{\text{выкл}}$ – номинальное время выключения тиристора. Условие устойчивости: $\beta \geq \gamma + \delta$ с учетом уравнений (3.1) можно переписать в виде:

$$U_{d\beta} \geq -\frac{2E_{Tm}}{\pi} \cos \delta + \frac{\omega L_T I_{d\beta}}{\pi}. \quad (3.2)$$

Эту зависимость допустимой величины противо-э. д. с. инвертора от тока $I_{d\beta}$ называют ограничительной характеристикой инвертора.

3.4. Составление компьютерной модели схемы инвертора и проведение расчетов

Схема ведомого сетью инвертора загружается с помощью последовательности команд: **- Micro-Cap V; - File; - Open; -D:\MC5\DIRO.CIR; - File; - Save Us ...**[ввести свое название файла].

После загрузки на экране появляется изображение схемы с указанием ее параметров (рис. 3.3).

На схеме рис. 3.3 источником питания переменного тока является трансформатор $X1$, к первичной обмотке которого присоединен генератор синусоидального напряжения $V8 - V13$. Дроссели $L3$ и $L4$ воспроизводят индуктивность рассеивания трансформатора. Сопротивления $R9$ и $R10$ играют вспомогательную роль: замыкают контур источника, когда оба ключа разомкнуты. Макеты тиристорных ключей собраны из моделей выключателей. Выключатель $S1$ отпирается импульсами управляющего напряжения от источника $V9$ на короткое время – порядка 30 мкс. Выключатель $W2$, шунтирующий контакты выключателя $S1$, замыкает свои контакты при появлении тока в цепи $S1$ и удерживает их в течение всего времени, пока ток через них не снизится до нуля. Элемент $V11$ служит

датчиком тока, управляющего контактами W2. Диод D1 предотвращает протекание тока через выключатели в обратном направлении. Аналогично работает и схема макета второго тиристора.

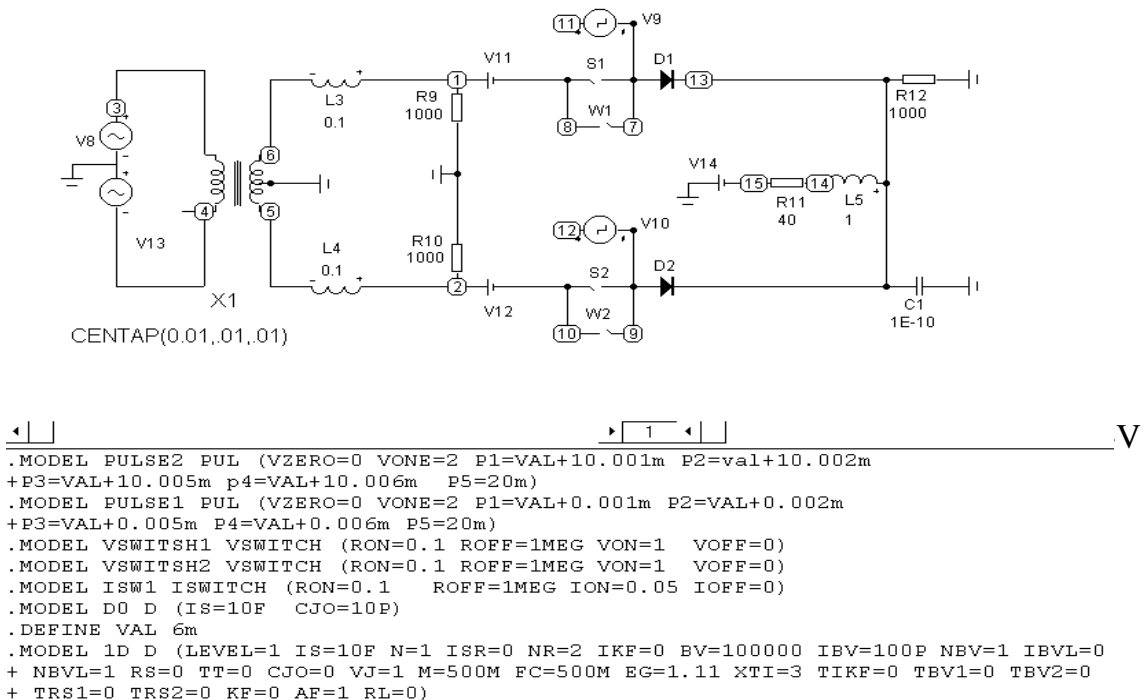


Рис. 3.3. Окно электрической схемы инвертора и описания ее элементов

Батарея V14 является источником постоянного напряжения, питающего в инверторном режиме цепь переменного тока. Нагрузка, потребляющая мощность этого источника, располагается в реальной цепи на стороне первичной обмотки трансформатора, однако для единообразия анализа выпрямительного и инверторного режима в модели схемы она представлена резистором R11, включенным последовательно с аккумуляторной батареей.

Для приведения значений R_1 и L_1 в соответствие с заданными параметрами следует щелкнуть курсором по цифре, указывающей текущее значение параметра, а затем в открывшемся окне заменить его на новую величину. Нажатие на кнопку «ОК» подтверждает выбор нового значения и закрывает окно установки параметра. Угол опережения β устанавливается путем замены величины VAL, указанной в строке .DEFINE VAL ... m описания элементов схемы (рис. 3.3), на новое значение, исходя из соотношения: $\beta = (10m - VAL)/\pi$, где VAL – величина задержки времени включения тиристорov в миллисекундах.

Запуск программы расчета переходного процесса в схеме производится путем задания последовательности команд: **-Analysis; -Transient analysis;** график, их масштабы, а также интервал времени счета]; **-Run.**

После выполнения расчета автоматически включается программа построения графиков рассматриваемых токов и напряжений и выводится окно с графиками (рис. 3.4).

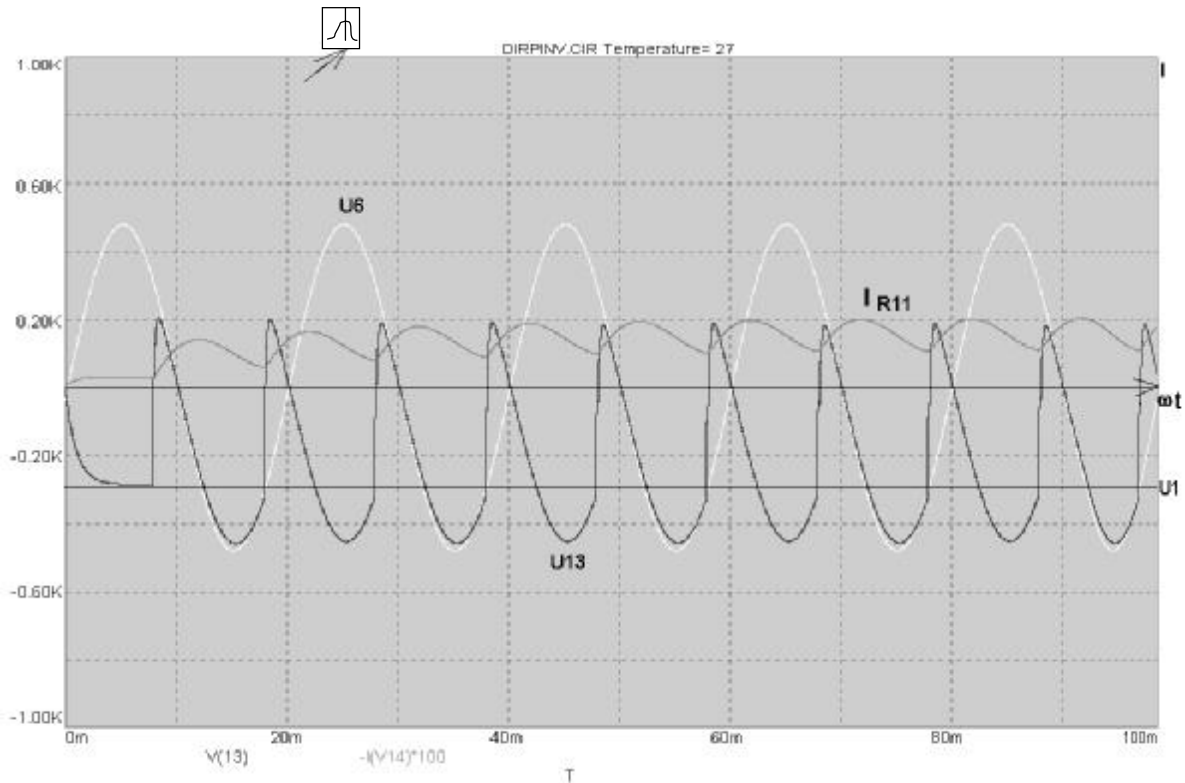


Рис. 3.4. Окно вывода результатов моделирования работы схемы инвертора ($\beta = 2\pi/10$; $E_1 = 300$ В)

Среднее значение тока ($I_{d\beta}$) измеряют как среднее между максимальным и минимальным значением кривой тока, измеренное на периодах, где переходный процесс включения инвертора практически завершился (в правой части графика). Если на графике не видно завершения переходного процесса, следует увеличить интервал времени счета и повторить расчет. Измерение мгновенных значений удобно производить с помощью курсора в виде вертикальной линии, вызываемого клавишей в меню окна графика, помеченной стрелкой на рис. 3.4. Цифры под графиком укажут мгновенные значения величин, выведенных на график, в момент времени, отмеченный курсором. После записи в таблицу измеренного значения тока, возвращаются в окно схемы инвертора командами: **-Transient**; **-Exit Analysis**. Задавая ряд других значений β повторяют процедуру расчета до заполнения таблицы результатов.

3.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) схему ведомого сетью инвертора;
- б) таблицы расчетов и измерений зависимости среднего значения тока инвертора от угла опережения;
- в) снятые осциллограммы с расшифровкой их содержания и масштабов;
- г) выводы по работе.

3.6. Дополнительное задание по исследованию характеристик инвертора

Одной из важных характеристик инвертора, определяющих допустимый предел тока нагрузки, является его входная характеристика – зависимость среднего тока I_d от среднего напряжения U_d в точке соединения катодов ключей. Примерный вид семейства входных характеристик вместе с внешними, характеризующими выпрямительный режим работы схемы, показан на рис. 3.5. Внешние характеристики задаются уравнениями (3.2), входные – уравнениями (3.1), ограничительные – уравнениями (3.3). Задание для углубленного анализа режима схемы – снять входную характеристику инвертора при заданных значениях параметров схемы и угле опережения $\beta = 3\pi / 10$.

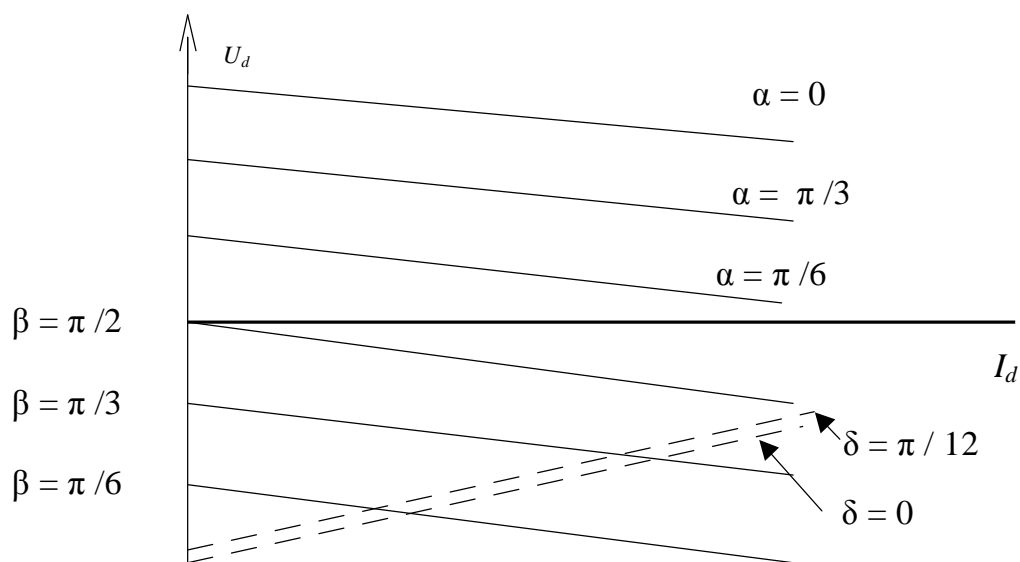


Рис. 3.5. Внешние ($\alpha = 0, \alpha = \pi/3, \alpha = \pi/6$), входные ($\beta = \pi/2, \beta = \pi/3, \beta = \pi/6$) и ограничительные (пунктир) характеристики ведомого сетью инвертора