

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. И. РАЗЗАКОВА**

Кафедра «Электроэнергетика» им. Дж. Апышева

**ИЗУЧЕНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ
НА ПЕРСОНАЛЬНОМ КОМПЬЮТЕРЕ**

Методические указания к лабораторным работам по курсу
«Энергетическая электроника» для студентов направления
551700 «Электроэнергетика» всех форм обучения

Бишкек 2010

Рассмотрены
на заседании кафедры
«Электроэнергетика»
Прот. № 6 от 20.01.10.

Одобрены
Методическим советом
ЭФ
Прот. № 5 от 21.01.10.

УДК 0211.312.

Составитель МОЛДОБАЕВА Т.Р.

Изучение выпрямительных устройств на персональном компьютере: Методические указания к лабораторным работам по курсу «Энергетическая электроника» для студентов направления 551700 «Электроэнергетика» всех форм обучения / КГТУ им. И. Раззакова; Сост. Т.Р. Молдобаева. Б.: ИЦ «Техник», 2010. – 38 с.

Излагаются краткие теоретические сведения и методические указания по выполнению лабораторных работ и контрольные вопросы.

Предназначены для студентов направления 551700 «Электроэнергетика».

Рис.: 14, библиогр.: 3 наименов.

Рецензент доц., к.т.н. Джунуев Т.А.

Изучение выпрямительных устройств на персональном компьютере
Методические указания к лабораторным работам по курсу
«Энергетическая электроника» для студентов направления
551700 «Электроэнергетика» всех форм обучения

Составитель *Молдобаева Т.Р.*

Тех. редактор *Субанбердиева Н.Е.*

Подписано к печати 02.07.2010 г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆.
Бумага офс. Печать офс. Объем 2,4 п.л. Тираж 50 экз. Заказ 208. Цена 41 сом.
Бишкек, ул. Сухомлинова, 20. ИЦ «Техник» КГТУ им. И.Раззакова, т.: 54-29-43
e-mail: beknur@mail.ru

Введение

Выпрямительное устройство - это электронный преобразователь *переменного* электрического напряжения в *знакопостоянное*, полярность которого не изменяется в процессе его использования. Неуправляемые выпрямители выполняются на базе диодов, управляемые – на базе тиристоров или других управляемых вентильных приборов.

Принцип электронного силового выпрямления основан на использовании свойств силовых электронных вентильных приборов проводить однонаправленный ток для преобразования переменного тока в постоянный без существенных потерь энергии. Процессы при выпрямлении определяются:

- видом вентильного прибора и способом его управления;
- характером нагрузки на стороне постоянного тока;
- техническими характеристиками источника энергии переменного тока.

Выпрямительное устройство предназначается для электропитания потребителей, которые по своему принципу действия не могут использовать переменное напряжение (например, все электронные схемы, включающие полупроводниковые или ламповые элементы усиления или преобразования, ванны для нанесения на поверхность изделия гальванопокрытий и пр.).

Выпрямительные устройства применяются:

- *в бытовой технике* (телевизоры, радиоприемники, магнитофоны, компьютеры и пр.);
- *в промышленности* (управляемые электроприводы, электролизные установки и пр.);
- *на транспорте* (контактные сети, электроприводы подвижного состава и пр.) и т.д.

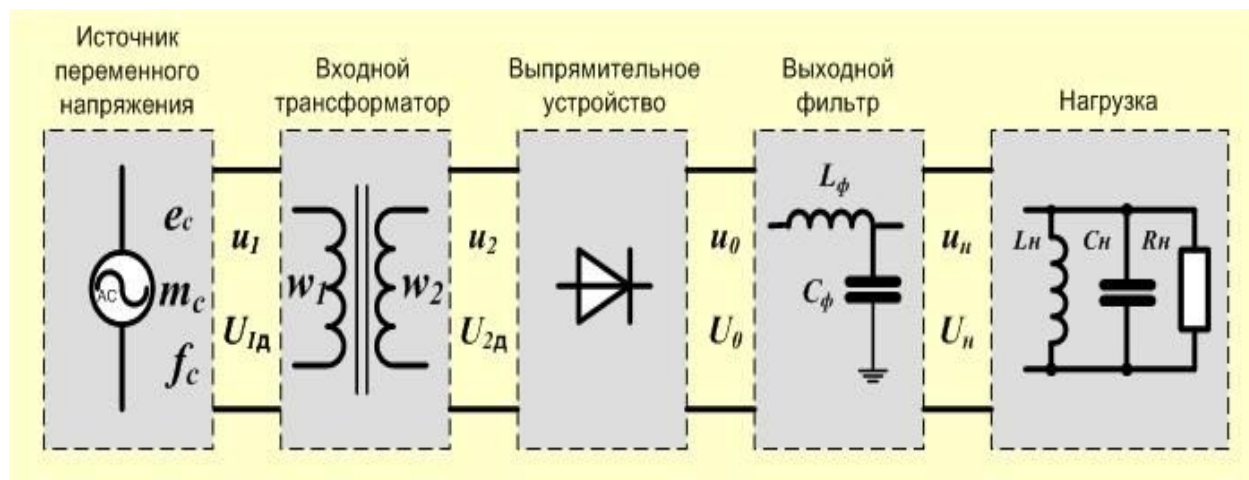
Обобщенная структура выпрямительного устройства

Источник переменного напряжения представляет собою *источник электродвижущей силы e_c , частотой f_c , с числом фаз m_c* (обычно 1 или 3) и заданной *формой* напряжения (обычно синусоидальной).

В качестве первичного источника переменного напряжения, как правило, используется *однофазная* или *трехфазная* городская или промышленная *сеть* электроснабжения с соотношением фазного и линейного напряжения 220/380 В и частотой 50 Гц.

Часто в качестве первичного источника переменного напряжения используются электронные (статические) *преобразователи частоты и напряжения*, которые, как правило, имеют форму выходного напряжения, отличную от синусоидальной, что накладывает свои особенности на анализ работы выпрямительных устройств.

В общем случае, для нормального функционирования выпрямительного устройства необходимо совокупное использование ряда дополнительных устройств:



Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя устанавливают сглаживающие фильтры. Эффективность сглаживающего фильтра оценивают по его способности уменьшать пульсацию, т.е. по значению коэффициента сглаживания S_c .

Коэффициентом сглаживания называют отношение коэффициентов пульсации входного (до фильтра) k'_i и выходного (после фильтра) k''_i напряжений:

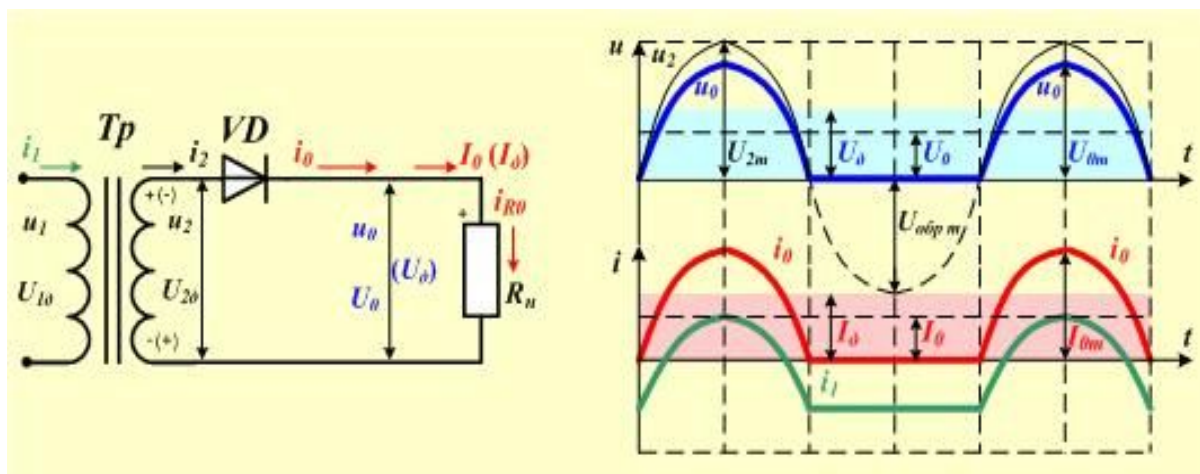
$$S_{\bar{n}} = k'_i / k''_i .$$

Сглаживающие фильтры подразделяются на пассивные и электронные (активные). Пассивные фильтры обычно состоят из реакторов и конденсаторов. Электронные фильтры содержат электронные элементы, например транзисторы.

Цель работы: исследование схем выпрямителей с помощью виртуального и физического моделирования и изучение работы выпрямителей на персональном компьютере с помощью специальных программ, в частности, программы «Pilab» МЭИ г. Москвы.

Лабораторная работа 1

Однофазный однополупериодный выпрямитель



В однофазном однополупериодном выпрямителе ток во вторичной обмотке трансформатора i_2 и нагрузке R_n будет протекать только при положительной полуволне переменного вторичного напряжения u_2 , когда выпрямительный диод VD находится в проводящем состоянии (значки +/- без скобок).

Во втором полупериоде переменного напряжения (значки +/- в скобках) диод VD находится в закрытом состоянии, к нему приложено **обратное напряжение** и ток в нагрузке и вторичной обмотке трансформатора не протекает. При этом происходит **подмагничивание** сердечника трансформатора постоянной составляющей выпрямленного тока I_0 , что приводит к необходимости увеличивать установленную мощность трансформатора. Кроме того, происходит существенное **искажение формы тока в первичной обмотке трансформатора i_1** (по сравнению с синусоидальной - см. диаграмму), что негативно сказывается на других потребителях сети.

По названным причинам однофазный однополупериодный выпрямитель на практике обычно не используется, но он удобен как базовый вариант для сравнения параметров различных схем выпрямительных устройств.

Параметры однофазного однополупериодного выпрямителя имеют следующие значения:

- **Среднее значение выпрямленного напряжения:**

$$U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{0m} \sin \alpha t dt = U_{0m} / \pi = 0.45 U_{2\phi}$$

- **Действующее значение выпрямленного напряжения:**

$$U_{0\Delta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} u_0^2 dt} = U_{0m} / 2$$

- **Среднее значение выпрямленного тока:**

$$I_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_{0m} \sin \alpha t dt = I_{0m} / \pi = 0.45 I_{2\theta}$$

- **Действующее значение выпрямленного тока:**

$$I_{0\delta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_0^2 dt} = I_{0m} / 2$$

- **Коэффициент преобразования выпрямителя:**

$$k_{\text{пр}} = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = U_0 / U_{2\theta} = 0.45$$

- **Коэффициент формы тока:**

$$k_{\phi i} = I_{0\delta} / I_0 = 1.57$$

- **Коэффициент пульсации тока нагрузки** (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению):

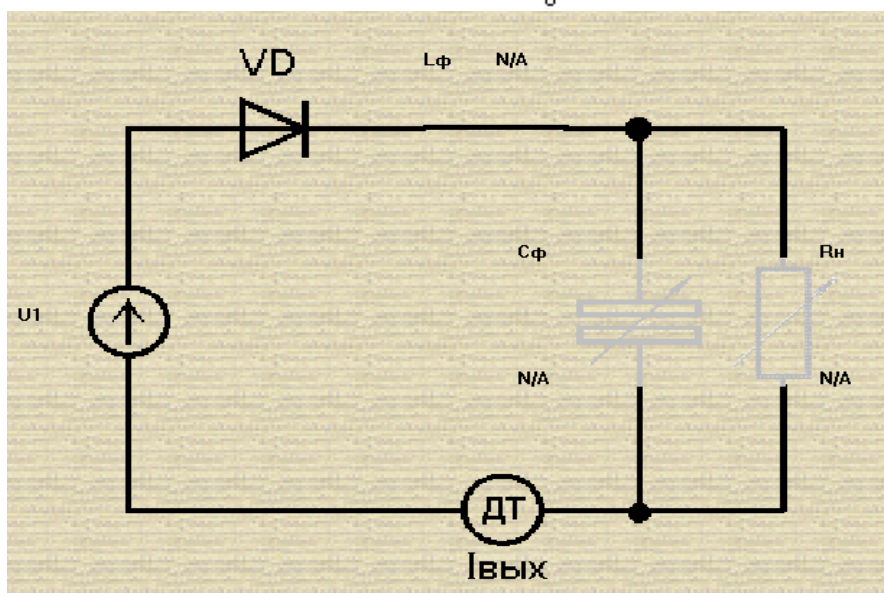
$$k_{\text{пи}} = I_{\delta} / I_0 = \sqrt{k_{\phi i}^2 - 1} = 1.21$$

- **Коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению:**

$$k_u = U_{\text{обр } m} / U_0 = U_{0m} / U_0 = 3.14$$

- **Коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования)** - отношение мощности постоянного тока к среднему значению мощности нагрузки:

$$\eta = P_0 / P_{\text{ср(н)}} = U_0 I_0 / \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_0 i_0 dt = 0.405$$



Задание 1: Исследовать выходные показатели выпрямительного устройства методом моделирования.

Вызов программы моделирования осуществляется нажатием кнопки "Моделирование" на панели инструментов главного клиентского интерфейса после ввода заданных ниже параметров:

- **Подайте** на вход переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m=5\text{ В}$ и частотой $f_c=500\text{ Гц}$ на холостом ходу (**нагрузка не включена**);
- **Замерьте** величину выходного напряжения (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** нагрузку $R_n=1\text{ кОм}$ (или наиболее близкое значение из числа доступных);
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** емкость фильтра $C_\phi=1\text{ мкф}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** дополнительно индуктивность фильтра $L_\phi=15\text{ мГн}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента.

Задание 2: Экспериментально исследовать выходные показатели выпрямительного устройства.

Вызов программы экспериментального исследования осуществляется нажатием кнопки "Эксперимент" на панели инструментов главного клиентского интерфейса после ввода заданных ниже параметров:

- **Подайте** на вход переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m=5\text{ В}$ и частотой $f_c=500\text{ Гц}$ на холостом ходу (**нагрузка не включена**);
- **Замерьте** величину выходного напряжения (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** нагрузку $R_n=1\text{ кОм}$ (или ближайшее значение из числа доступных номиналов);
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** емкость фильтра $C_\phi=1\text{ мкф}$;

- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** дополнительно индуктивность фильтра $L_{\phi} = 15 \text{ мГн}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования.

Задание 3: Провести обработку результатов моделирования и эксперимента.

На панели инструментов **полностью открытого окна просмотра результатов** нажмите кнопку "Обработка результатов". В запущившейся программе обработки результатов выполните следующие действия:

- **Сравните** результаты моделирования всех исследованных режимов в одном графическом окне, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и проследите изменение формы и величины напряжения и тока нагрузки;
- **Сравните** результаты эксперимента всех исследованных режимов в одном графическом окне, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и проследите изменение формы и величины напряжения и тока нагрузки;
- **Сравните** результаты моделирования и эксперимента в одном графическом окне для каждого исследованного режима отдельно, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и объясните различия;
- **Определите** экспериментальные значения параметров выпрямительного устройства (используя соответствующие средства панели инструментов) в базовом варианте схемы выпрямительного устройства ($U_m=5 \text{ В}$, $f_c=500 \text{ Гц}$, $R_n=1 \text{ кОм}$, фильтр отключен):
 - среднее значение выпрямленного напряжения;
 - действующее значение выпрямленного напряжения;
 - среднее значение выпрямленного тока;
 - действующее значение выпрямленного тока;
 - коэффициент преобразования выпрямителя;
 - коэффициент формы тока (отношение действующего значения выпрямленного тока к среднему выпрямленному значению);
 - коэффициент пульсации тока нагрузки (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению);
 - коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению;
 - коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования);

- **Сравните** полученные экспериментальные значения параметров выпрямительного устройства с их теоретическими значениями и объясните отличия.
- **Запишите** свои выводы и наблюдения в электронный протокол.

Задание 4: Защита работы

Ответьте на следующие вопросы, записывая ответы в электронный протокол:

- что произойдет с током нагрузки, если в базовом варианте схемы выпрямительного устройства напряжение увеличится в два раза ($u_m = 10 \text{ В}$)?
- что произойдет с током нагрузки, если в базовом варианте схемы выпрямительного устройства частота синусоидального напряжения увеличится в два раза ($f_c = 1000 \text{ Гц}$)?
- что произойдет с током нагрузки, если сопротивление нагрузки увеличится в два раза ($R_n = 2 \text{ кОм}$)?
- что произойдет с током нагрузки, если емкость фильтра увеличится ($C_\phi = 10 \text{ мкф}$)?
- что произойдет с током нагрузки, если индуктивность фильтра отключить ($L_\phi = 0$)?
- что произойдет с током нагрузки, если форма напряжения будет не синусоидальной, а прямоугольной (меандр)?

Проверьте правильность Ваших ответов в режиме моделирования или эксперимента, задав условия контрольного вопроса.

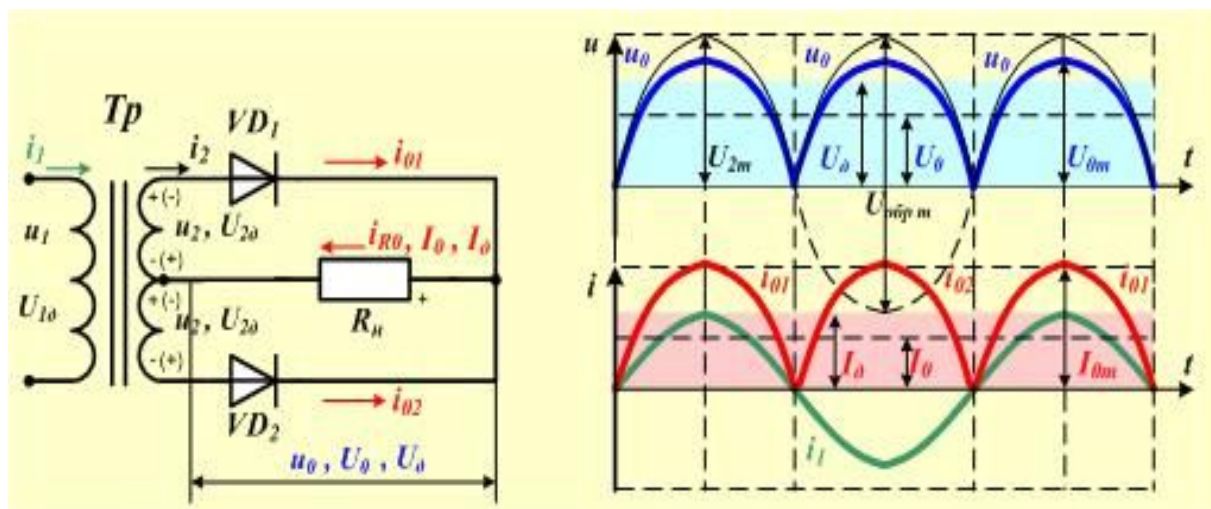
Задание 5: Сохранение отчета.

На панели инструментов главного клиентского интерфейса нажмите кнопку "Протокол", а затем:

- **Проверьте** правильность фиксации всех Ваших действий электронной системой контроля;
- **Сохраните** файл отчета, нажав кнопку "Сохранить" панели инструментов окна протокола.

Лабораторная работа 2

Однофазный двухполупериодный выпрямитель



В однофазном двухполупериодном выпрямителе вторичная обмотка трансформатора выполняется в виде двух одинаковых **полуобмоток**, причем конец одной полуобмотки соединяется с началом другой и эта средняя точка подключается к одному полюсу нагрузки. На свободные концы полуобмоток включаются выпрямительные диоды VD_1 и VD_2 , общая точка которых подключается к другому полюсу нагрузки.

При положительной полуволне напряжения на вторичной обмотке u_2 (значки +/- без скобок) ток i_2 будет протекать только по верхней полуобмотке, через диод VD_1 (i_{01}), который в течение этого полупериода находится в проводящем состоянии, через нагрузку R_n (i_{R0}) к средней точке трансформатора.

При отрицательной полуволне напряжения на вторичной обмотке u_2 (значки +/- в скобках) ток i_2 будет протекать только по нижней полуобмотке, через диод VD_2 (i_{02}), который в течение этого полупериода находится в проводящем состоянии, через нагрузку R_n (i_{R0}) к средней точке трансформатора.

Таким образом, ток через нагрузку будет протекать в течение двух полупериодов, но в одном и том же направлении, т.е. не будет изменять своего знака.

Хотя по каждой вторичной полуобмотке трансформатора ток протекает только в течение одного полупериода, **подмагничивания трансформатора не происходит**, т.к. обе полуобмотки находятся на общем сердечнике, где происходит сложение магнитных потоков в разные полупериоды. Поскольку они одинаковы по величине и противоположны по фазе, то постоянная составляющая потока подмагничивания отсутствует. По этой же причине не происходит искажения тока i_1 в первичной обмотке трансформатора.

Недостатком данной схемы выпрямления является удвоение величины **максимального обратного напряжения** $U_{обр\ m}$, которое прикладывается к закрытому диоду.

Параметры однофазного двухполупериодного выпрямителя имеют следующие значения:

- **Среднее значение выпрямленного напряжения:**

$$U_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{0m} \sin \alpha t dt = 2U_{0m} / \pi = 0.9 U_{2\phi}$$

- **Действующее значение выпрямленного напряжения:**

$$U_{0\phi} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_0^2 dt} = \sqrt{2} U_{0m} / 2$$

- **Среднее значение выпрямленного тока:**

$$I_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_{0m} \sin \alpha t dt = 2I_{0m} / \pi = 0.9 I_{2\phi}$$

- **Действующее значение выпрямленного тока:**

$$I_{0\phi} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_0^2 dt} = \sqrt{2} I_{0m} / 2$$

- **Коэффициент преобразования выпрямителя:**

$$k_{\text{пр}} = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = U_0 / U_{2\phi} = 0.9$$

- **Коэффициент формы тока:**

$$k_{\phi i} = I_{0\phi} / I_0 = 1.11$$

- **Коэффициент пульсации тока нагрузки** (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению):

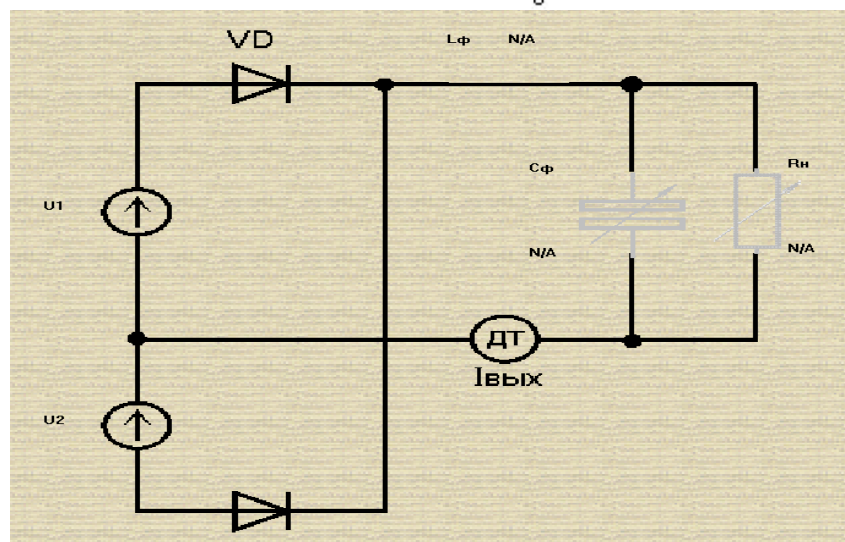
$$k_{ni} = I_{\phi} / I_0 = \sqrt{k_{\phi i}^2 - 1} = 0.482$$

- **Коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению:**

$$k_u = U_{\text{обр } m} / U_0 = 2U_{0m} / U_0 = 3.14$$

- **Коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования)** - отношение мощности постоянного тока к среднему значению мощности нагрузки:

$$\eta = P_0 / P_{\text{ср(н)}} = U_0 I_0 / \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_0 i_0 dt = 0.81$$



Задание 1: Исследовать выходные показатели выпрямительного устройства методом моделирования.

Вызов программы моделирования осуществляется нажатием кнопки "Моделирование" на панели инструментов главного клиентского интерфейса после ввода заданных ниже параметров:

- **Подайте** на вход переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m=5\text{ В}$ и частотой $f_c=500\text{ Гц}$ на холостом ходу (**нагрузка не включена**);
- **Замерьте** величину выходного напряжения (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** нагрузку $R_n=1\text{ кОм}$ (или наиболее близкое значение из числа доступных);
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** емкость фильтра $C_\phi=1\text{ мкФ}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** дополнительно индуктивность фильтра $L_\phi=15\text{ мГн}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента.

Задание 2: Экспериментальное исследование выходных показателей выпрямительного устройства.

Вызов программы экспериментального исследования осуществляется нажатием кнопки "Эксперимент" на панели инструментов главного клиентского интерфейса после ввода заданных ниже параметров:

- **Подайте** на вход переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m=5\text{ В}$ и частотой $f_c=500\text{ Гц}$ на холостом ходу (**нагрузка не включена**);
- **Замерьте** величину выходного напряжения (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** нагрузку $R_n=1\text{ кОм}$ (или ближайшее значение из числа доступных номиналов);
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);

- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** емкость фильтра $C_{\phi} = 1 \text{ мкФ}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** дополнительно индуктивность фильтра $L_{\phi} = 15 \text{ мГн}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования.

Задание 3: Провести обработку результатов моделирования и эксперимента.

На панели инструментов **полностью открытого окна просмотра результатов** нажмите кнопку "**Обработка результатов**". В запущившейся программе обработки результатов выполните следующие действия:

- **Сравните** результаты моделирования всех исследованных режимов в одном графическом окне, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и проследите изменение формы и величины напряжения и тока нагрузки;
- **Сравните** результаты эксперимента всех исследованных режимов в одном графическом окне, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и проследите изменение формы и величины напряжения и тока нагрузки;
- **Сравните** результаты моделирования и эксперимента в одном графическом окне для каждого исследованного режима отдельно, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и объясните различия;
- **Определите** экспериментальные значения параметров выпрямительного устройства (используя соответствующие средства панели инструментов) в базовом варианте схемы выпрямительного устройства ($U_m = 5 \text{ В}$, $f_c = 500 \text{ Гц}$, $R_n = 1 \text{ кОм}$, фильтр отключен):
 - среднее значение выпрямленного напряжения;
 - действующее значение выпрямленного напряжения;
 - среднее значение выпрямленного тока;
 - действующее значение выпрямленного тока;
 - коэффициент преобразования выпрямителя;
 - коэффициент формы тока (отношение действующего значения выпрямленного тока к среднему выпрямленному значению);
 - коэффициент пульсации тока нагрузки (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению);

- коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению;
- коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования);
- **Сравните** полученные экспериментальные значения параметров выпрямительного устройства с их теоретическими значениями и объясните отличия;
- **Запишите** свои выводы и наблюдения в электронный протокол.

Задание 4: Защита работы.

Ответьте на следующие вопросы, записывая ответы в электронный протокол:

- Что произойдет с током нагрузки, если в базовом варианте схемы выпрямительного устройства напряжение увеличится в два раза ($u_m = 10 \text{ В}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если в базовом варианте схемы выпрямительного устройства частота синусоидального напряжения увеличится в два раза ($f_c = 1000 \text{ Гц}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если сопротивление нагрузки увеличится в два раза ($R_n = 2 \text{ кОм}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если емкость фильтра увеличится ($C_\phi = 10 \text{ мкф}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если индуктивность фильтра отключить ($L_\phi = 0$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если форма напряжения будет не синусоидальной, а прямоугольной (меандр)?

Проверьте правильность Ваших ответов в режиме моделирования или эксперимента, задав условия контрольного вопроса.

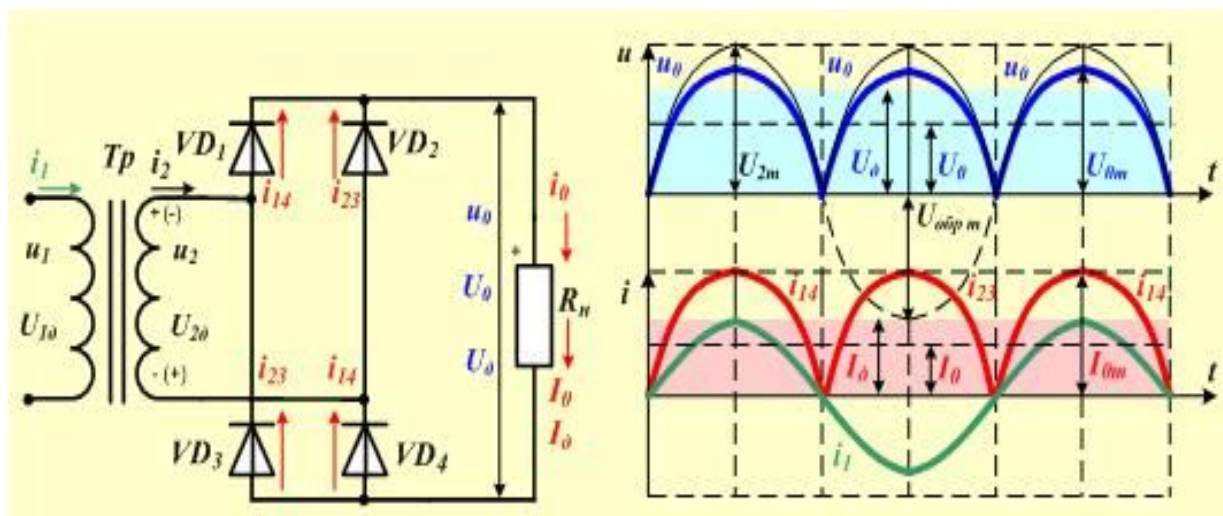
Задание 5: Сохранение отчета.

На панели инструментов главного клиентского интерфейса нажмите кнопку "Протокол", а затем:

- **Проверьте** правильность фиксации всех Ваших действий электронной системой контроля;
- **Сохраните** файл отчета, нажав кнопку "Сохранить" панели инструментов окна протокола.

Лабораторная работа 3

Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель



Мостовой выпрямитель (мост Греча) является одним из вариантов однофазного двухполупериодного выпрямительного устройства, которое при одной вторичной обмотке трансформатора обеспечивает двухполупериодное выпрямление за счет соответствующего подключения четырех выпрямительных диодов $VD1 - VD4$.

При положительной полуволне напряжения на вторичной обмотке u_2 (значки +/- без скобок) ток i_{14} будет протекать по контуру: начало вторичной обмотки трансформатора, диод $VD1$, нагрузка R_n , диод $VD4$, конец вторичной обмотки трансформатора.

При отрицательной полуволне напряжения на вторичной обмотке u_2 (значки +/- в скобках) ток i_{23} будет протекать по контуру: конец вторичной обмотки трансформатора, диод $VD2$, нагрузка R_n , диод $VD3$, начало вторичной обмотки трансформатора.

Таким образом, ток через нагрузку, а также через вторичную обмотку трансформатора будет протекать в течение двух полупериодов, но в нагрузке он не меняет знака, а в обмотке трансформатора меняет, поэтому **подмагничивания трансформатора и искажения тока i_1 в первичной обмотке трансформатора не происходит.**

Недостатком данной схемы выпрямления является необходимость использования увеличенного числа выпрямительных диодов.

Параметры однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя имеют следующие значения:

- **Среднее значение выпрямленного напряжения:**

$$U_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{0m} \sin \alpha t dt = \frac{2}{\pi} U_{0m} = 0.9 U_{20}$$

- **Действующее значение выпрямленного напряжения:**

$$U_{0\delta} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_0^2 dt} = \frac{\sqrt{2}}{2} U_{0m}$$

- **Среднее значение выпрямленного тока:**

$$I_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_{0m} \sin \alpha t dt = \frac{2}{\pi} I_{0m} = 0.9 I_{2\delta}$$

- **Действующее значение выпрямленного тока:**

$$I_{0\delta} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_0^2 dt} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{0m}$$

- **Коэффициент преобразования выпрямителя:**

$$k_{np} = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = U_0 / U_{2\delta} = 0.9$$

- **Коэффициент формы тока:**

$$k_{\phi i} = I_{0\delta} / I_0 = 1.11$$

- **Коэффициент пульсации тока нагрузки** (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению):

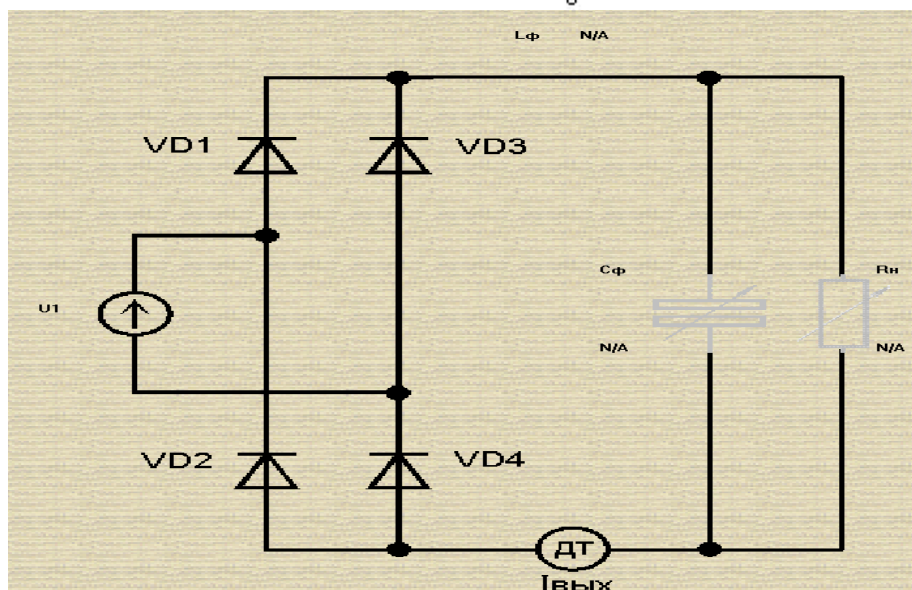
$$k_{mi} = I_{\delta} / I_0 = \sqrt{k_{\phi i}^2 - 1} = 0.482$$

- **Коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению:**

$$k_u = U_{\text{обр } m} / U_0 = U_{0m} / U_0 = 1.57$$

- **Коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования)** - отношение мощности постоянного тока к среднему значению мощности нагрузки:

$$\eta = P_0 / P_{\text{ср(н)}} = U_0 I_0 / \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_0 i_0 dt = 0.81$$



Задание 1: Исследовать выходные показатели выпрямительного устройства методом моделирования.

Вызов программы моделирования осуществляется нажатием кнопки "Моделирование" на панели инструментов главного клиентского интерфейса после ввода заданных ниже параметров:

- **Подайте** на вход переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m=5\text{ В}$ и частотой $f_c=500\text{ Гц}$ на холостом ходу (**нагрузка не включена**);
- **Замерьте** величину выходного напряжения (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** нагрузку $R_n=1\text{ кОм}$ (или наиболее близкое значение из числа доступных);
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** емкость фильтра $C_\phi=1\text{ мкФ}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** дополнительно индуктивность фильтра $L_\phi=15\text{ мГн}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента.

Задание 2: Экспериментальное исследование выходных показателей выпрямительного устройства.

Вызов программы экспериментального исследования осуществляется нажатием кнопки "Эксперимент" на панели инструментов главного клиентского интерфейса после ввода заданных ниже параметров:

- **Подайте** на вход переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m=5\text{ В}$ и частотой $f_c=500\text{ Гц}$ на холостом ходу (**нагрузка не включена**);
- **Замерьте** величину выходного напряжения (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** нагрузку $R_n=1\text{ кОм}$ (или ближайшее значение из числа доступных номиналов);
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);

- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** емкость фильтра $C_{\phi} = 1 \text{ мкФ}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** дополнительно индуктивность фильтра $L_{\phi} = 15 \text{ мГн}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования.

Задание 3: Провести обработку результатов моделирования и эксперимента.

На панели инструментов **полностью открытого окна просмотра результатов** нажмите кнопку "Обработка результатов". В запущившейся программе обработки результатов выполните следующие действия:

- **Сравните** результаты моделирования всех исследованных режимов в одном графическом окне, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и проследите изменение формы и величины напряжения и тока нагрузки;
- **Сравните** результаты эксперимента всех исследованных режимов в одном графическом окне, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и проследите изменение формы и величины напряжения и тока нагрузки;
- **Сравните** результаты моделирования и эксперимента в одном графическом окне для каждого исследованного режима отдельно, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и объясните различия;
- **Определите** экспериментальные значения параметров выпрямительного устройства (используя соответствующие средства панели инструментов) в базовом варианте схемы выпрямительного устройства ($U_m = 5 \text{ В}$, $f_c = 500 \text{ Гц}$, $R_n = 1 \text{ кОм}$, фильтр отключен):
 - среднее значение выпрямленного напряжения;
 - действующее значение выпрямленного напряжения;
 - среднее значение выпрямленного тока;
 - действующее значение выпрямленного тока;
 - коэффициент преобразования выпрямителя;
 - коэффициент формы тока (отношение действующего значения выпрямленного тока к среднему выпрямленному значению);
 - коэффициент пульсации тока нагрузки (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению);

- коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению;
- коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования);
- **Сравните** полученные экспериментальные значения параметров выпрямительного устройства с их теоретическими значениями и объясните отличия;
- **Запишите** свои выводы и наблюдения в электронный протокол.

Задание 4: Защита работы.

Ответьте на следующие вопросы, записывая ответы в электронный протокол:

- Что произойдет с током нагрузки, если в базовом варианте схемы выпрямительного устройства напряжение увеличится в два раза ($u_m = 10 \text{ В}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если в базовом варианте схемы выпрямительного устройства частота синусоидального напряжения увеличится в два раза ($f_c = 1000 \text{ Гц}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если сопротивление нагрузки увеличится в два раза ($R_n = 2 \text{ кОм}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если емкость фильтра увеличится ($C_\phi = 10 \text{ мкф}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если индуктивность фильтра отключить ($L_\phi = 0$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если форма напряжения будет не синусоидальной, а прямоугольной (меандр)?

Проверьте правильность Ваших ответов в режиме моделирования или эксперимента, задав условия контрольного вопроса.

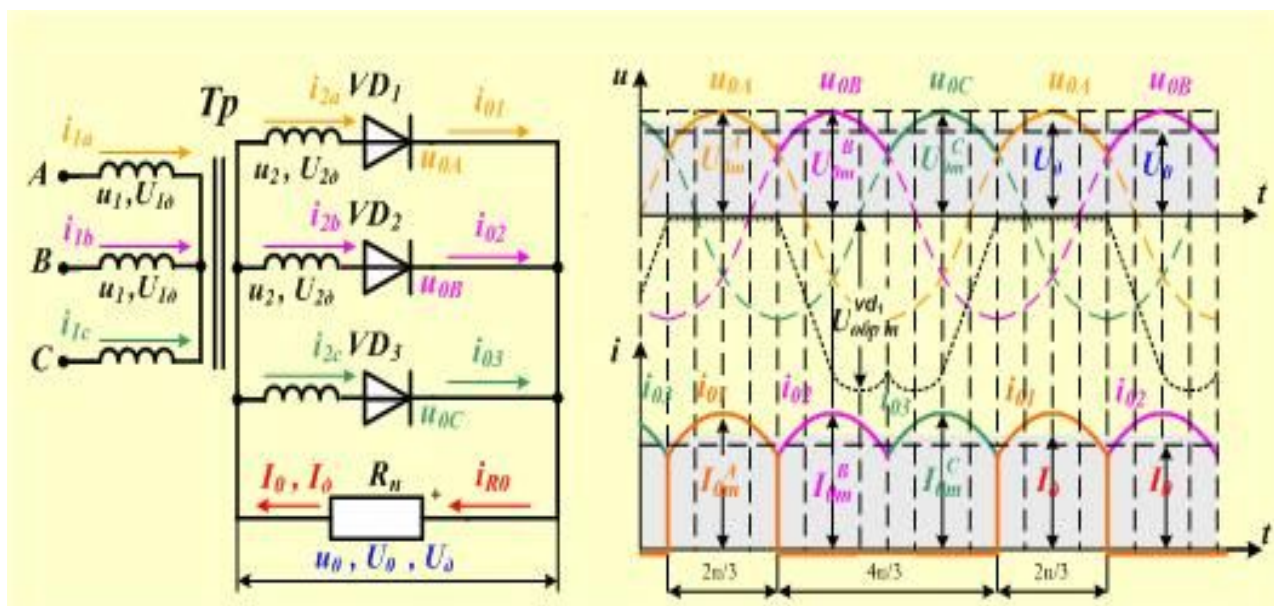
Задание 5: Сохранение отчета.

На панели инструментов главного клиентского интерфейса нажмите кнопку "Протокол", а затем:

- **Проверьте** правильность фиксации всех Ваших действий электронной системой контроля;
- **Сохраните** файл отчета, нажав кнопку "Сохранить" панели инструментов окна протокола.

Лабораторная работа 4

Трехфазный однополупериодный выпрямитель



Использование многофазных (в частности 3-х фазных) выпрямителей позволяет значительно снизить **коэффициент пульсации** выпрямленного напряжения за счет сдвига фаз первичного источника переменного напряжения. При этом **частота пульсаций возрастает в три раза** по сравнению с частотой первичного источника переменного напряжения, что упрощает процедуру фильтрации выпрямленного напряжения.

При положительном полупериоде напряжения в фазе *A* ток через диод VD_1 будет протекать не в течение всего полупериода, а только в той его части, когда u_{0A} будет больше u_{0B} и u_{0C} , т.е. в течение $1/3$ периода ($2\pi/3$). В оставшуюся часть периода ($4\pi/3$) диод VD_1 закрыт и к нему приложено обратное напряжение, изменяющееся по закону текущего изменения линейного напряжения u_{bc} , причем **максимальное значение обратного напряжения $U_{обр\ m}$** равно амплитуде линейного напряжения, а по фазе оно совпадает вначале с моментом перехода через нуль напряжения u_{0c} , а затем напряжения u_{0b} (см. диаграмму).

Аналогично будет протекать процесс в фазах *B* и *C* (см. диаграмму токов и напряжений).

При отрицательных полупериодах в каждой фазе токи в нагрузке и вторичных обмотках трансформатора протекать не будут, что приведет к **подмагничиванию трансформатора** постоянной составляющей тока в обмотках и ухудшению его показателей.

Поскольку в данной схеме выпрямления нагрузка подключена параллельно **фазным** напряжениям вторичных обмоток трансформатора, то расчет параметров выпрямительного устройства ведется по отношению к фазному вторичному напряжению.

Параметры трехфазного однополупериодного выпрямителя имеют следующие значения:

- **Среднее значение выпрямленного напряжения:**

$$U_0 = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} U_{0m} \sin \alpha t dt = \frac{3}{2\pi} \sqrt{3} U_{0m} = 0.827 U_{0m} = 1.17 U_{2\delta}$$

- **Действующее значение выпрямленного напряжения:**

$$U_{0\delta} = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} u_0^2 dt} = 0.86 U_{0m}$$

- **Среднее значение выпрямленного тока:**

$$I_0 = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} I_{0m} \sin \alpha t dt = \frac{3}{2\pi} \sqrt{3} I_{0m} = 0.827 I_{0m} = 1.17 I_{2\delta}$$

- **Действующее значение выпрямленного тока:**

$$I_{0\delta} = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} i_0^2 dt} = 0.86 I_{0m}$$

- **Коэффициент преобразования выпрямителя:**

$$k_{np} = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = U_0 / U_{2\delta} = 1.17$$

- **Коэффициент формы тока:**

$$k_{\phi i} = I_{0\delta} / I_0 = 1.04$$

- **Коэффициент пульсации тока нагрузки** (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению):

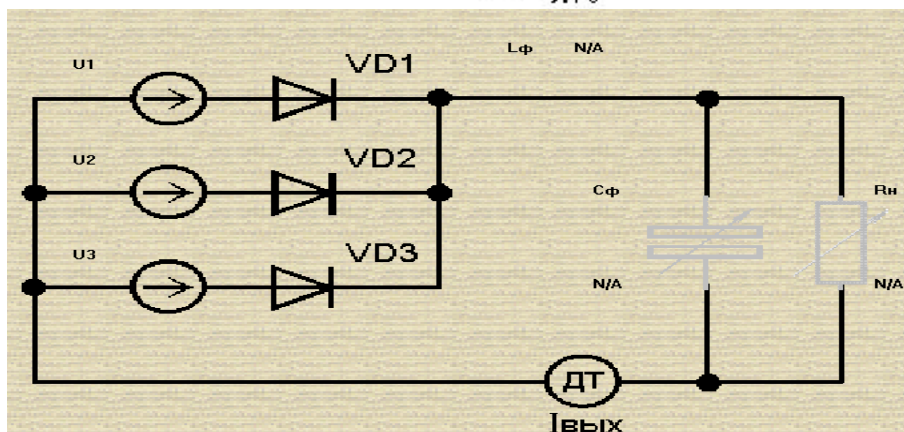
$$k_{ni} = I_{\delta} / I_0 = \sqrt{k_{\phi i}^2 - 1} = 0.286$$

- **Коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению:**

$$k_u = U_{\text{обр } m} / U_0 = \sqrt{3} U_{2m} / U_0 = \frac{\sqrt{3}}{\sin \pi/3} \frac{\pi}{3} U_0 / U_0 = 2.09$$

- **Коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования)** - отношение мощности постоянного тока к среднему значению мощности нагрузки:

$$\eta = P_0 / P_{\text{ср(н)}} = U_0 I_0 / \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} u_0 i_0 dt = 0.97$$



Задание 1: Исследовать выходные показатели выпрямительного устройства методом моделирования.

Вызов программы моделирования осуществляется нажатием кнопки "Моделирование" на панели инструментов главного клиентского интерфейса после ввода заданных ниже параметров:

- **Подайте** на вход переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m=5\text{ В}$ и частотой $f_c=500\text{ Гц}$ на холостом ходу (**нагрузка не включена**);
- **Замерьте** величину выходного напряжения (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** нагрузку $R_n=1\text{ кОм}$ (или наиболее близкое значение из числа доступных);
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** емкость фильтра $C_\phi=1\text{ мкФ}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** дополнительно индуктивность фильтра $L_\phi=15\text{ мГн}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента.

Задание 2: Экспериментальное исследование выходных показателей выпрямительного устройства

Вызов программы экспериментального исследования осуществляется нажатием кнопки "Эксперимент" на панели инструментов главного клиентского интерфейса после ввода заданных ниже параметров:

- **Подайте** на вход переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m=5\text{ В}$ и частотой $f_c=500\text{ Гц}$ на холостом ходу (**нагрузка не включена**);
- **Замерьте** величину выходного напряжения (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** нагрузку $R_n=1\text{ кОм}$ (или ближайшее значение из числа доступных номиналов);
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);

- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** емкость фильтра $C_{\phi} = 1 \text{ мкФ}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** дополнительно индуктивность фильтра $L_{\phi} = 15 \text{ мГн}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования.

Задание 3: Провести обработку результатов моделирования и эксперимента.

На панели инструментов **полностью открытого окна просмотра результатов** нажмите кнопку "**Обработка результатов**". В запущившейся программе обработки результатов выполните следующие действия:

- **Сравните** результаты моделирования всех исследованных режимов в одном графическом окне, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и проследите изменение формы и величины напряжения и тока нагрузки;
- **Сравните** результаты эксперимента всех исследованных режимов в одном графическом окне, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и проследите изменение формы и величины напряжения и тока нагрузки;
- **Сравните** результаты моделирования и эксперимента в одном графическом окне для каждого исследованного режима отдельно, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и объясните различия;
- **Определите** экспериментальные значения параметров выпрямительного устройства (используя соответствующие средства панели инструментов) в базовом варианте схемы выпрямительного устройства ($U_m = 5 \text{ В}$, $f_c = 500 \text{ Гц}$, $R_n = 1 \text{ кОм}$, фильтр отключен):
 - среднее значение выпрямленного напряжения;
 - действующее значение выпрямленного напряжения;
 - среднее значение выпрямленного тока;
 - действующее значение выпрямленного тока;
 - коэффициент преобразования выпрямителя;
 - коэффициент формы тока (отношение действующего значения выпрямленного тока к среднему выпрямленному значению);
 - коэффициент пульсации тока нагрузки (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению);

- коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению;
- коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования);
- **Сравните** полученные экспериментальные значения параметров выпрямительного устройства с их теоретическими значениями и объясните отличия;
- **Запишите** свои выводы и наблюдения в электронный протокол.

Задание 4: Защита работы.

Ответьте на следующие вопросы, записывая ответы в электронный протокол:

- Что произойдет с током нагрузки, если в базовом варианте схемы выпрямительного устройства напряжение увеличится в два раза ($u_m = 10 \text{ В}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если в базовом варианте схемы выпрямительного устройства частота синусоидального напряжения увеличится в два раза ($f_c = 1000 \text{ Гц}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если сопротивление нагрузки увеличится в два раза ($R_n = 2 \text{ кОм}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если емкость фильтра увеличится ($C_\phi = 10 \text{ мкф}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если индуктивность фильтра отключить ($L_\phi = 0$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если форма напряжения будет не синусоидальной, а прямоугольной (меандр)?

Проверьте правильность Ваших ответов в режиме моделирования или эксперимента, задав условия контрольного вопроса.

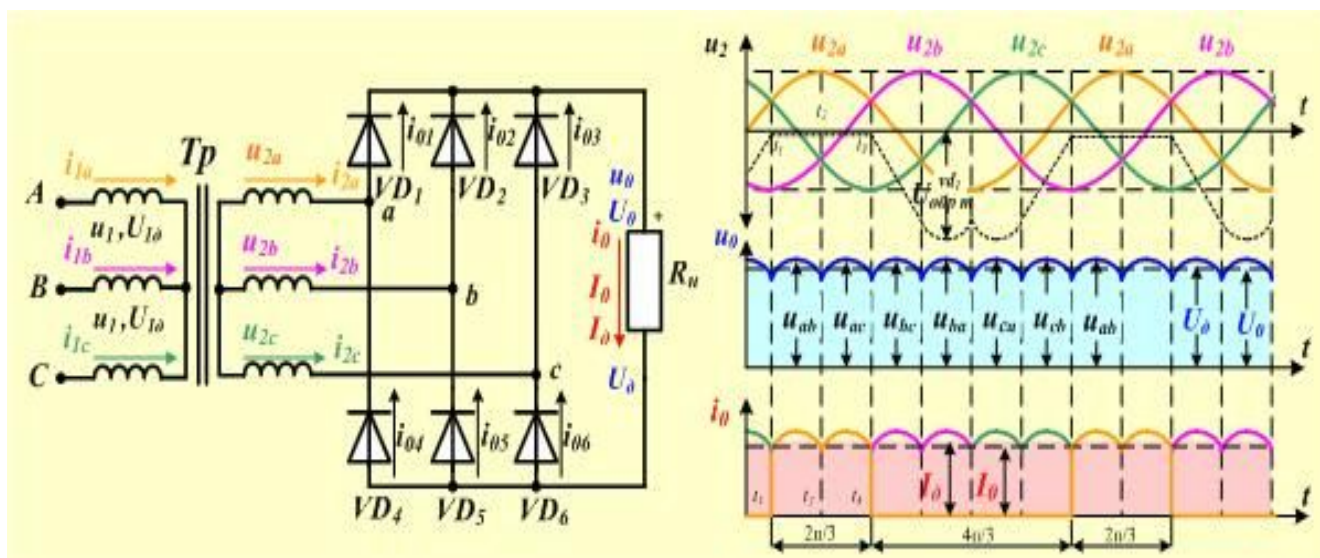
Задание 5: Сохранение отчета.

На панели инструментов главного клиентского интерфейса нажмите кнопку "Протокол", а затем:

- **Проверьте** правильность фиксации всех Ваших действий электронной системой контроля;
- **Сохраните** файл отчета, нажав кнопку "Сохранить" панели инструментов окна протокола.

Лабораторная работа 5

Трехфазный двухполупериодный выпрямитель



Трехфазный двухполупериодный выпрямитель (мост Ларионова) отличается самыми лучшими показателями по пульсациям выпрямленного напряжения и тока за счет выпрямления обоих полупериодов в каждой фазе. При этом **частота пульсаций возрастает в шесть раз** по сравнению с частотой первичного источника переменного напряжения, что упрощает процедуру фильтрации выпрямленного напряжения.

При положительном полупериоде напряжения в фазе *A* ток через диод *VD₁* будет протекать не в течение всего полупериода, а только в той его части, когда *u_{2a}* будет больше *u_{2b}* и *u_{2c}*, т.е. в течение 1/3 периода ($2\pi/3$). Причем с момента открытия диода *t₁* и до момента *t₂* ток нагрузки будет протекать под воздействием линейного напряжения *u_{ab}* по контуру: точка *a* - *VD₁* - *R_n* - *VD₅* - точка *b*, а с момента *t₂* и до момента *t₃* ток нагрузки будет протекать под воздействием линейного напряжения *u_{ac}* по контуру: точка *a* - *VD₁* - *R_n* - *VD₆* - точка *c*.

В оставшуюся часть периода ($4\pi/3$) диод *VD₁* закрыт и к нему приложено обратное напряжение, изменяющееся по закону текущего изменения линейного напряжения *u_{bc}*, причем **максимальное значение обратного напряжения *U_{обр m}*** равно амплитуде линейного напряжения, а по фазе оно совпадает вначале с моментом перехода через нуль напряжения *u_{2c}*, а затем напряжения *u_{2b}* (см. диаграмму).

Аналогично будет протекать процесс в фазах *B* и *C* (см. диаграмму токов и напряжений).

Для удобства сравнения различных схем выпрямления, при определении параметров данного выпрямительного устройства они **приводятся к фазным напряжениям** вторичной обмотки трансформатора.

Параметры трехфазного двухполупериодного выпрямителя имеют следующие значения:

- **Среднее значение выпрямленного напряжения:**

$$U_0 = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} U_{0m} \sin \alpha t dt = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} U_{0m} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} U_{\frac{\phi}{2\delta}} = 2.34 U_{\frac{\phi}{2\delta}}$$

- Действующее значение выпрямленного напряжения:

$$U_{0\delta} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} u_0^2 dt} = 2.342 U_{0m}$$

- Среднее значение выпрямленного тока:

$$I_0 = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} I_{0m} \sin \alpha t dt = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} I_{0m} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} I_{0m} = 2.34 I_{0m}$$

- Действующее значение выпрямленного тока:

$$I_{0\delta} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} i_0^2 dt} = 2.342 I_{0m}$$

- Коэффициент преобразования выпрямителя:

$$k_{np} = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = U_0 / U_{\frac{\phi}{2\delta}} = 2.34$$

- Коэффициент формы тока:

$$k_{\phi i} = I_{0\delta} / I_0 = 1.001$$

- Коэффициент пульсации тока нагрузки (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению):

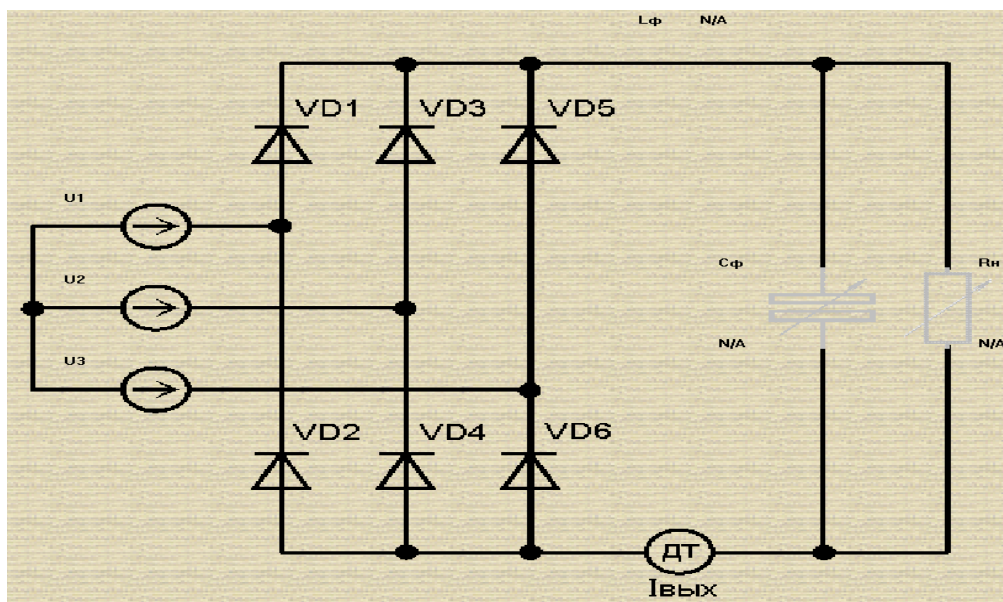
$$k_{\eta i} = I_{\delta} / I_0 = \sqrt{k_{\phi i}^2 - 1} = 0.0045$$

- Коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению:

$$k_u = U_{\text{обр м}} / U_0 = \sqrt{6} U_{0m} / U_0 = 1.48$$

- Коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования) - отношение мощности постоянного тока к среднему значению мощности нагрузки:

$$\eta = P_0 / P_{\text{ср(н)}} = U_0 I_0 / \frac{3}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} u_0 i_0 dt = 0.998$$



Задание 1: Исследовать выходные показатели выпрямительного устройства методом моделирования

Вызов программы моделирования осуществляется нажатием кнопки "Моделирование" на панели инструментов главного клиентского интерфейса после ввода заданных ниже параметров:

- **Подайте** на вход переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m = 5 \text{ В}$ и частотой $f_c = 500 \text{ Гц}$ на холостом ходу (**нагрузка не включена**);
- **Замерьте** величину выходного напряжения (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** нагрузку $R_n = 1 \text{ кОм}$ (или наиболее близкое значение из числа доступных);
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** емкость фильтра $C_\phi = 1 \text{ мкФ}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** дополнительно индуктивность фильтра $L_\phi = 15 \text{ мГн}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента.

Задание 2: Экспериментальное исследование выходных показателей выпрямительного устройства

Вызов программы экспериментального исследования осуществляется нажатием кнопки "Эксперимент" на панели инструментов главного клиентского интерфейса после ввода заданных ниже параметров:

- **Подайте** на вход переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m = 5 \text{ В}$ и частотой $f_c = 500 \text{ Гц}$ на холостом ходу (**нагрузка не включена**);
- **Замерьте** величину выходного напряжения (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** нагрузку $R_n = 1 \text{ кОм}$ (или ближайшее значение из числа доступных номиналов);
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** емкость фильтра $C_\phi = 1 \text{ мкФ}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** дополнительно индуктивность фильтра $L_\phi = 15 \text{ мГн}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования

Задание 3: Провести обработку результатов моделирования и эксперимента.

На панели инструментов **полностью открытого окна просмотра результатов** нажмите кнопку "Обработка результатов". В запущившейся программе обработки результатов выполните следующие действия:

- **Сравните** результаты моделирования всех исследованных режимов в одном графическом окне, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и проследите изменение формы и величины напряжения и тока нагрузки;
- **Сравните** результаты эксперимента всех исследованных режимов в одном графическом окне, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и проследите изменение формы и величины напряжения и тока нагрузки;
- **Сравните** результаты моделирования и эксперимента в одном графическом окне для каждого исследованного режима отдельно, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и объясните различия;
- **Определите** экспериментальные значения параметров выпрямительного устройства (используя соответствующие средства панели инструментов) в базо-

вом варианте схемы выпрямительного устройства ($U_m=5$ В, $f_c=500$ Гц, $R_n=1$ кОм, фильтр отключен):

- среднее значение выпрямленного напряжения;
- действующее значение выпрямленного напряжения;
- среднее значение выпрямленного тока;
- действующее значение выпрямленного тока;
- коэффициент преобразования выпрямителя;
- коэффициент формы тока (отношение действующего значения выпрямленного тока к среднему выпрямленному значению);
- коэффициент пульсации тока нагрузки (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению);
- коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению;
- коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования);
- **Сравните** полученные экспериментальные значения параметров выпрямительного устройства с их теоретическими значениями и объясните отличия;
- **Запишите** свои выводы и наблюдения в электронный протокол.

Задание 4: Защита работы.

Ответьте на следующие вопросы, записывая ответы в электронный протокол:

- Что произойдет с током нагрузки, если в базовом варианте схемы выпрямительного устройства напряжение увеличится в два раза ($u_m = 10$ В)?
- Что произойдет с током нагрузки, если в базовом варианте схемы выпрямительного устройства частота синусоидального напряжения увеличится в два раза ($f_c = 1000$ Гц)?
- Что произойдет с током нагрузки, если сопротивление нагрузки увеличится в два раза ($R_n = 2$ кОм)?
- Что произойдет с током нагрузки, если емкость фильтра увеличится ($C_\phi = 10$ мкФ)?
- Что произойдет с током нагрузки, если индуктивность фильтра отключить ($L_\phi = 0$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если форма напряжения будет не синусоидальной, а прямоугольной (меандр)?

Проверьте правильность Ваших ответов в режиме моделирования или эксперимента, задав условия контрольного вопроса.

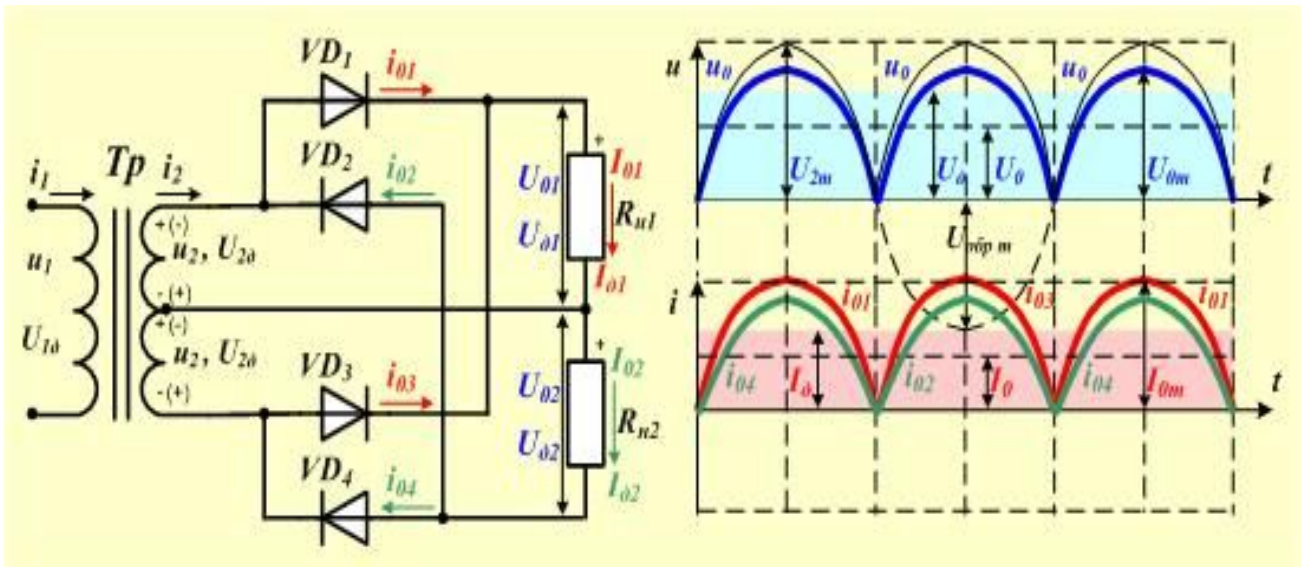
Задание 5: Сохранение отчета.

На панели инструментов главного клиентского интерфейса нажмите кнопку "Протокол", а затем:

- **Проверьте** правильность фиксации всех Ваших действий электронной системой контроля;
- **Сохраните** файл отчета, нажав кнопку "Сохранить" панели инструментов окна протокола.

Лабораторная работа 6

Однофазный двухполупериодный *двуполярный* выпрямитель



Целый ряд потребителей электрической энергии (компьютеры, операционные усилители, усилители переменного напряжения и пр.) требуют для своей работы **двуполярного** напряжения, например: +5 В, 0, -5 В; +12 В, 0, -12 В и т.д. Причем потребляемые токи в цепи каждой полярности I_{01} , I_{02} могут существенно отличаться.

При положительной полуволне напряжения на вторичной обмотке u_2 (значки +/- без скобок) токи будут протекать следующим образом:

- ток i_{01} будет протекать по контуру: начало верхней полуобмотки, диод $VD1$, нагрузка R_{n1} , конец верхней полуобмотки трансформатора;
- ток i_{04} будет протекать по контуру: начало нижней полуобмотки, нагрузка R_{n2} , диод $VD4$, конец нижней полу обмотки трансформатора.

При отрицательной полуволне напряжения на вторичной обмотке u_2 (значки +/- в скобках) токи будут протекать по контуру:

- ток i_{03} будет протекать по контуру: конец нижней полуобмотки, диод $VD3$, нагрузка R_{n1} , начало нижней полу обмотки трансформатора;
- ток i_{02} будет протекать по контуру: конец верхней полуобмотки, нагрузка R_{n2} , диод $VD2$, начало верхней полу обмотки трансформатора.

Параметры данной схемы выпрямления для каждой полярности напряжения полностью соответствуют параметрам однофазного двухполупериодного выпрямителя:

- **Среднее значение выпрямленного напряжения:**

$$U_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{0m} \sin \alpha t dt = 2U_{0m} / \pi = 0.9 U_{20}$$

- **Действующее значение выпрямленного напряжения:**

$$U_{0\delta} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_0^2 dt} = \sqrt{2} U_{0m} / 2$$

- **Среднее значение выпрямленного тока:**

$$I_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_{0m} \sin \alpha t dt = 2I_{0m} / \pi = 0.9 I_{2\delta}$$

- **Действующее значение выпрямленного тока:**

$$I_{0\delta} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_0^2 dt} = \sqrt{2} I_{0m} / 2$$

- **Коэффициент преобразования выпрямителя:**

$$k_{пр} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = U_0 / U_{2\delta} = 0.9$$

- **Коэффициент формы тока:**

$$k_{\phi i} = I_{0\delta} / I_0 = 1.11$$

- **Коэффициент пульсации тока нагрузки** (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению):

$$k_{ni} = I_{\delta} / I_0 = \sqrt{k_{\phi i}^2 - 1} = 0.482$$

- **Коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению:**

$$k_u = U_{\text{обр м}} / U_0 = 2U_{0m} / U_0 = 3.14$$

- **Коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования)** - отношение мощности постоянного тока к среднему значению мощности нагрузки:

$$\eta = P_0 / P_{\text{ср(н)}} = U_0 I_0 / \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_0 i_0 dt = 0.81$$

Задание 1: Исследовать выходные показатели выпрямительного устройства методом моделирования.

Вызов программы моделирования осуществляется нажатием кнопки "Моделирование" на панели инструментов главного клиентского интерфейса после ввода заданных ниже параметров:

- **Подайте** на вход переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m = 5 \text{ В}$ и частотой $f_c = 500 \text{ Гц}$ на холостом ходу (**нагрузка не включена**);
- **Замерьте** величину выходного напряжения (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** нагрузку $R_n = 1 \text{ кОм}$ (или наиболее близкое значение из числа доступных);
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);

- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** емкость фильтра $C_{\phi} = 1 \text{ мкф}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** дополнительно индуктивность фильтра $L_{\phi} = 15 \text{ мГн}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента.

Задание 2: Экспериментальное исследование выходных показателей выпрямительного устройства.

Вызов программы экспериментального исследования осуществляется нажатием кнопки "Эксперимент" на панели инструментов главного клиентского интерфейса после ввода заданных ниже параметров:

- **Подайте** на вход переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m = 5 \text{ В}$ и частотой $f_c = 500 \text{ Гц}$ на холостом ходу (**нагрузка не включена**);
- **Замерьте** величину выходного напряжения (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** нагрузку $R_n = 1 \text{ кОм}$ (или ближайшее значение из числа доступных номиналов);
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** емкость фильтра $C_{\phi} = 1 \text{ мкф}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** дополнительно индуктивность фильтра $L_{\phi} = 15 \text{ мГн}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования.

Задание 3: Провести обработку результатов моделирования и эксперимента.

На панели инструментов **полностью открытого окна просмотра результатов** нажмите кнопку "**Обработка результатов**". В запущившейся программе обработки результатов выполните следующие действия:

- **Сравните** результаты моделирования всех исследованных режимов в одном графическом окне, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и проследите изменение формы и величины напряжения и тока нагрузки;
- **Сравните** результаты эксперимента всех исследованных режимов в одном графическом окне, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и проследите изменение формы и величины напряжения и тока нагрузки;
- **Сравните** результаты моделирования и эксперимента в одном графическом окне для каждого исследованного режима отдельно, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и объясните различия;
- **Определите** экспериментальные значения параметров выпрямительного устройства (используя соответствующие средства панели инструментов) в базовом варианте схемы выпрямительного устройства ($U_m=5$ В, $f_c=500$ Гц, $R_n=1$ кОм, фильтр отключен):
 - среднее значение выпрямленного напряжения;
 - действующее значение выпрямленного напряжения;
 - среднее значение выпрямленного тока;
 - действующее значение выпрямленного тока;
 - коэффициент преобразования выпрямителя;
 - коэффициент формы тока (отношение действующего значения выпрямленного тока к среднему выпрямленному значению);
 - коэффициент пульсации тока нагрузки (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению);
 - коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению;
 - коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования);
- **Сравните** полученные экспериментальные значения параметров выпрямительного устройства с их теоретическими значениями и объясните отличия;
- **Запишите** свои выводы и наблюдения в электронный протокол.

Задание 4: Защита работы.

Ответьте на следующие вопросы, записывая ответы в электронный протокол:

- Что произойдет с током нагрузки, если в базовом варианте схемы выпрямительного устройства напряжение увеличится в два раза ($u_m = 10$ В)?

- Что произойдет с током нагрузки, если в базовом варианте схемы выпрямительного устройства частота синусоидального напряжения увеличится в два раза ($f_c = 1000 \text{ Гц}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если сопротивление нагрузки увеличится в два раза ($R_n = 2 \text{ кОм}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если емкость фильтра увеличится ($C_\phi = 10 \text{ мкф}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если индуктивность фильтра отключить ($L_\phi = 0$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если форма напряжения будет не синусоидальной, а прямоугольной (меандр)?

Проверьте правильность Ваших ответов в режиме моделирования или эксперимента, задав условия контрольного вопроса.

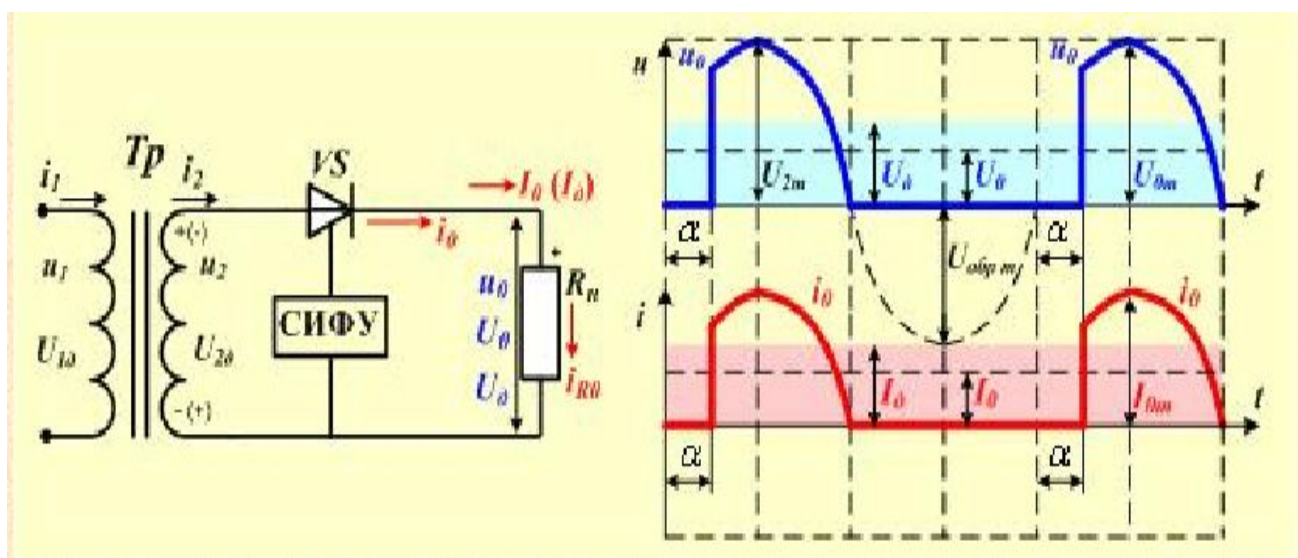
Задание 5: Сохранение отчета.

На панели инструментов главного клиентского интерфейса нажмите кнопку "Протокол", а затем:

- **Проверьте** правильность фиксации всех Ваших действий электронной системой контроля;
- **Сохраните** файл отчета, нажав кнопку "Сохранить" панели инструментов окна протокола.

Лабораторная работа 7

Управляемый тиристорный однофазный однополупериодный выпрямитель



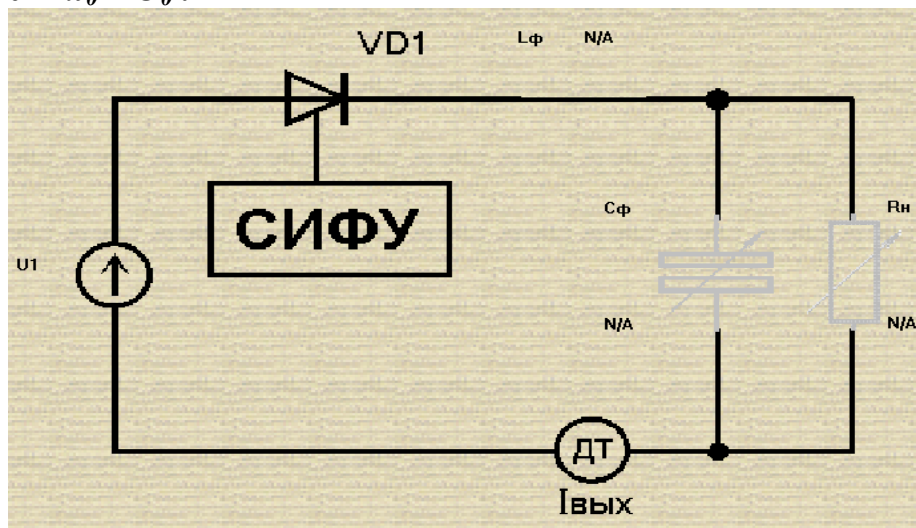
Все рассмотренные ранее схемы выпрямительных устройств были выполнены на неуправляемых элементах - **диодах** и поэтому у них отсутствует возможность регулирования напряжения на нагрузке.

Однако, все эти схемы можно выполнить и на управляемых элементах - **тиристорах**, что позволит регулировать среднее и действующее значения выпрямленного напряжения за счет регулируемого управления моментом открытия тиристора VS (фазовый угол α), которое осуществляется специальной Схемой Импульсно-Фазового Управления (**СИФУ**).

Если $\alpha = 0$, то открытие тиристора происходит в самом начале периода и показатели выпрямительного устройства полностью соответствуют показателям однофазного однополупериодного выпрямителя.

Если $\alpha = \pi$, то тиристор в положительном полупериоде не откроется, а в отрицательном он и не должен открываться, т.е. в этом случае напряжение на нагрузке будет отсутствовать.

Если дискретно или программно изменять угол открытия тиристора в диапазоне $0 < \alpha < \pi$, то выпрямленное напряжение на нагрузке будет меняться в диапазоне $0 < u_0 < U_0$.



Задание 1: Исследовать выходные показатели выпрямительного устройства методом моделирования.

Вызов программы моделирования осуществляется нажатием кнопки "**Моделирование**" на панели инструментов главного клиентского интерфейса после ввода заданных ниже параметров:

- **Подайте** на вход переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m = 5 \text{ В}$ и частотой $f_c = 500 \text{ Гц}$ на холостом ходу (**нагрузка не включена**);
- **Замерьте** величину выходного напряжения (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** нагрузку $R_n = 1 \text{ кОм}$ (или наиболее близкое значение из числа доступных);

- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** емкость фильтра $C_{\phi} = 1 \text{ мкФ}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента;
- **Включите** дополнительно индуктивность фильтра $L_{\phi} = 15 \text{ мГн}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат моделирования в файле для последующей обработки и сравнения с результатами эксперимента.

Задание 2: Экспериментальное исследование выходных показателей выпрямительного устройства.

Вызов программы экспериментального исследования осуществляется нажатием кнопки "Эксперимент" на панели инструментов главного клиентского интерфейса после ввода заданных ниже параметров:

- **Подайте** на вход переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m = 5 \text{ В}$ и частотой $f_c = 500 \text{ Гц}$ на холостом ходу (**нагрузка не включена**);
- **Замерьте** величину выходного напряжения (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** нагрузку $R_n = 1 \text{ кОм}$ (или ближайшее значение из числа доступных номиналов);
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** емкость фильтра $C_{\phi} = 1 \text{ мкФ}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования;
- **Включите** дополнительно индуктивность фильтра $L_{\phi} = 15 \text{ мГн}$;
- **Замерьте** величину напряжения и тока нагрузки (используя средства графической панели монитора);
- **Сохраните** полученный результат эксперимента в файле для последующей обработки и сравнения с результатами моделирования.

Задание 3: Провести обработку результатов моделирования и эксперимента.

На панели инструментов **полностью открытого окна просмотра результатов** нажмите кнопку "**Обработка результатов**". В запущившейся программе обработки результатов выполните следующие действия:

- **Сравните** результаты моделирования всех исследованных режимов в одном графическом окне, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и проследите изменение формы и величины напряжения и тока нагрузки;
- **Сравните** результаты эксперимента всех исследованных режимов в одном графическом окне, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и проследите изменение формы и величины напряжения и тока нагрузки;
- **Сравните** результаты моделирования и эксперимента в одном графическом окне для каждого исследованного режима отдельно, взяв результаты из соответствующих сохраненных файлов, и объясните различия;
- **Определите** экспериментальные значения параметров выпрямительного устройства (используя соответствующие средства панели инструментов) в базовом варианте схемы выпрямительного устройства ($U_m=5$ В, $f_c=500$ Гц, $R_n=1$ кОм, фильтр отключен):
 - среднее значение выпрямленного напряжения;
 - действующее значение выпрямленного напряжения;
 - среднее значение выпрямленного тока;
 - действующее значение выпрямленного тока;
 - коэффициент преобразования выпрямителя;
 - коэффициент формы тока (отношение действующего значения выпрямленного тока к среднему выпрямленному значению);
 - коэффициент пульсации тока нагрузки (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению);
 - коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению;
 - коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования);
- **Сравните** полученные экспериментальные значения параметров выпрямительного устройства с их теоретическими значениями и объясните отличия;
- **Запишите** свои выводы и наблюдения в электронный протокол.

Задание 4: Защита работы.

Ответьте на следующие вопросы, записывая ответы в электронный протокол:

- Что произойдет с током нагрузки, если в базовом варианте схемы выпрямительного устройства напряжение увеличится в два раза ($u_m = 10$ В)?

- Что произойдет с током нагрузки, если в базовом варианте схемы выпрямительного устройства частота синусоидального напряжения увеличится в два раза ($f_c = 1000 \text{ Гц}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если сопротивление нагрузки увеличится в два раза ($R_n = 2 \text{ кОм}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если емкость фильтра увеличится ($C_\phi = 10 \text{ мкф}$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если индуктивность фильтра отключить ($L_\phi = 0$)?
- Что произойдет с током нагрузки, если форма напряжения будет не синусоидальной, а прямоугольной (меандр)?

Проверьте правильность Ваших ответов в режиме моделирования или эксперимента, задав условия контрольного вопроса.

Задание 5: Сохранение отчета.

На панели инструментов главного клиентского интерфейса нажмите кнопку "Протокол", а затем:

- **Проверьте** правильность фиксации всех Ваших действий электронной системой контроля;
- **Сохраните** файл отчета, нажав кнопку "Сохранить" панели инструментов окна протокола.

Общие вопросы методики обучения

Методика подачи материала в данном *компьютерном курсе* построена таким образом, что его освоение *в предлагаемой последовательности* позволяет всесторонне и наиболее экономично (по времени) изучить выбранный конкретный объект, не обращаясь более ни к какому другому материалу, что не исключает возможности более глубокого усвоения отдельных тем по прилагаемому целевому списку литературы.

В процессе теоретической подготовки и выполнения индивидуальных заданий обучаемый получает весь необходимый и достаточный объем знаний об объекте изучения. Конкретные приемы выполнения каждого пункта задания подробно изложены в *гиперссылках*. Если некоторое слово или группа слов в основном тексте выделены шрифтом, цветом или подчеркиванием, а наведение на это слово указателя манипулятора типа «мышь» приводит к изменению его вида (стрелка заменяется ладонью руки), это означает, что данное понятие подробно раскрывается при нажатии левой клавиши «мыши».

Литература

1. Информация образования / Под ред. С.И. Маслова. – М.: Издательство МЭИ, 2005.
2. Попков О.З. Основы преобразовательной техники. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
3. Энергетическая электроника / Под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

