

Московский государственный технический университет
Имени Н.Э. Баумана

С.А. Васюков, О.И. Мисеюк

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ И УПРАВЛЯЕМЫХ
ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2020

УДК 621.3

Рецензент

Васюков С.А., Мисеюк О.И.

Исследование неуправляемых и управляемых выпрямителей: методические указания к выполнению лабораторной работы по курсам «Электротехника», «Электротехника и электроника» С.А.Васюков, О.И. Мисеюк – М.: Изд – во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2020 – 27,[2] с.: ил.

В методических указаниях изложены основные теоретические сведения по неуправляемым выпрямителям на полупроводниковых диодах и управляемым выпрямителям на тиристорах. Приведены схемы, временные диаграммы и расчетные соотношения, поясняющие принцип работы выпрямителей. Представлены задание, порядок выполнения и методические указания к проведению работы, а также контрольные вопросы.

Для студентов 2 – 4 курсов МГТУ им. Н.Э.Баумана, обучающихся по программам бакалавриата и специалитета и изучающих дисциплины «Электротехника», «Электротехника и электроника» на кафедре «Электротехника и промышленная электроника»

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	5
1.1. Элементная база выпрямителей.....	6
1.2. Однофазные неуправляемые выпрямители	8
1.2.1. Однофазный однополупериодный выпрямитель	9
1.2.2. Однофазный двухполупериодный выпрямитель (мостовая схема)	10
1.3. Сглаживающие фильтры	12
1.4. Трехфазный неуправляемый мостовой выпрямитель (схема Ларионова Л.Н.)	15
1.5. Внешние характеристики выпрямителей.....	17
1.6. Управляемые выпрямители.....	19
1.6.1. Однофазный однополупериодный управляемый выпрямитель.....	19
1.6.2. Однофазные двухполупериодные управляемые выпрямители.....	20
2. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	21
2.1. Описание экспериментальной установки	21
2.2. Исследование однофазного однополупериодного выпрямителя.....	22
2.2.1. Измерение фазного и линейного напряжения источника питания	22
2.2.2. Монтаж схемы однополупериодного выпрямителя	23
2.2.3. Характеристики однофазного однополупериодного выпрямителя	24
2.3. Исследование однофазного двухполупериодного выпрямителя	28
2.3.1. Монтаж схемы однополупериодного выпрямителя	28
2.3.2. Характеристики однофазного двухполупериодного выпрямителя	30
2.4. Исследование трехфазного мостового выпрямителя	31
2.5. Исследование управляемого однофазного однополупериодного выпрямителя	32
ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ	34
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	35
ЛИТЕРАТУРА	35

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное высшее техническое образование, ориентированное на формирование профессиональных компетенций, уделяет большое внимание подготовке специалистов, владеющих как теоретическими знаниями, так и современными методами исследования. Особо выделяется способность проводить исследования физических процессов и свойств объектов с выбором технических средств, методов измерений, обработки и представления результатов. А эта способность во многом формируется в результате выполнения лабораторных практикумов.

При выполнении лабораторных работ по электротехнике преследуются две основные цели. Первая цель – закрепление на практике основных положений курса. Вторая цель – научить студента навыкам работы с электроизмерительными приборами. Выпрямители на полупроводниковых диодах и тиристорах – составная часть источников электропитания, которые широко применяются как в промышленности, так и в повседневной жизни. Расчет источника питания включает проектирование вентильного блока, сглаживающего фильтра, стабилизатора и является составной частью подготовки современного инженера. Именно поэтому лабораторная работа по изучению свойств выпрямителей является одной из базовых работ курса электротехники.

Цель лабораторной работы – изучение схем, основных свойств и режимов работы полупроводниковых неуправляемых и управляемых выпрямителей. Экспериментальное определение внешних и регулировочных характеристик, а также коэффициентов пульсаций выпрямленного напряжения.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Выпрямителем называют устройство, предназначенное для преобразования энергии источника переменного тока в постоянный ток. Необходимость в подобном преобразовании возникает, когда питание потребителя осуществляется постоянным током, а источником электрической энергии является источник переменного тока, например промышленная сеть частотой 50 Гц.

В настоящей работе рассматриваются схемы выпрямителей с потребляемой мощностью до нескольких сотен ватт, в связи с чем их относят к классу маломощных выпрямителей. В зависимости от назначения выпрямители могут быть управляемыми, т.е. с возможностью изменения выпрямленного напряжения, и неуправляемыми (нерегулируемыми), где такой возможности нет.

Структурная схема выпрямительного устройства при питании от однофазной сети показана на Рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема источника питания.

Основой ее является блок выпрямления, построенный на одном или нескольких диодах. Функция трансформатора сводится к повышению или понижению вторичного напряжения U_2 при заданном первичном напряжении U_1 с целью получения требуемой величины постоянного напряжения U_n на выходе (нагрузке). Сглаживающий фильтр предназначен для улучшения качества выпрямленного напряжения, а стабилизатор обеспечивает практическую неизменность напряжения на нагрузке при воздействии различных факторов (изменение величины нагрузки, колебание напряжения сети и т.д.).

Схемотехника, режимы работы и параметры каждого блока выпрямительного устройства определяются требованиями, которые предъявляет нагрузка как потребитель постоянного напряжения. К таким требованиям в первую очередь относятся:

- среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке $U_{н\text{ ср}}$;

- среднее значение тока нагрузки $I_{н\text{ср}}$;
- качество постоянного напряжения на нагрузке, которое принято оценивать коэффициентом пульсаций $K_{п}$;
- диапазон регулирования $U_{н\text{ср}}$ (для управляемых выпрямителей).

Эти показатели при заданном сетевом напряжении U_1 являются исходными при расчете всех блоков выпрямительного устройства.

В ряде случаев отдельные блоки в схеме Рис. 1 могут отсутствовать, что зависит от качества постоянного напряжения, необходимого для эффективной работы потребителя.

1.1. Элементная база выпрямителей

Элементную базу выпрямительных устройств составляют диоды и тиристоры, свойства которых необходимо изучить в первую очередь.

Диод – двухэлектродный прибор, содержащий один электронно-дырочный переход и обладающий свойством практически односторонней проводимости. Условное графическое и буквенное обозначение выпрямительного диода с положительно обозначенными направлениями анодного напряжения и тока, а также его вольтамперная характеристика (ВАХ) приведены на Рис. 2.

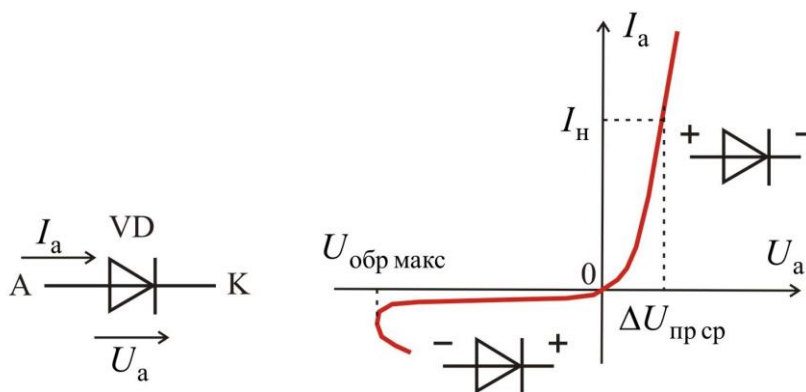


Рис. 2. Обозначение на электрической схеме и ВАХ диода.

ВАХ диода, расположенная в первом квадранте, соответствует открытому состоянию диода, когда сопротивление между анодом А и катодом К мало (это прямое включение диода). Третий квадрант соответствует закрытому состоянию диода, когда его сопротивление чрезвычайно велико (это обратное включение диода).

Часто при анализе и расчете электронных схем диод принимают идеальным, когда при прямом включении его сопротивление считают равным нулю, а при обратном – бесконечности. Основными электрическими параметрами выпрямительных диодов являются:

I_H - номинальный (средний прямой) ток диода;

$\Delta U_{пр\ ср}$ - среднее прямое падение напряжения;

$U_{обр\ макс}$ - максимально допустимое постоянное обратное напряжение.

Тиристор – управляемый полупроводниковый прибор ключевого типа с четырехслойной структурой $p - n - p - n$, имеющий два устойчивых состояния – закрытое и открытое (выключенное и включенное). Переход из закрытого состояния в открытое, т. е. включение тиристора осуществляется по цепи управления с помощью маломощного сигнала. Выключение тиристора по цепи управления производится не может. Графическое и буквенное обозначение тиристора с условно положительными направлениями тока и напряжения, а также его статическая ВАХ показаны на Рис. 3.

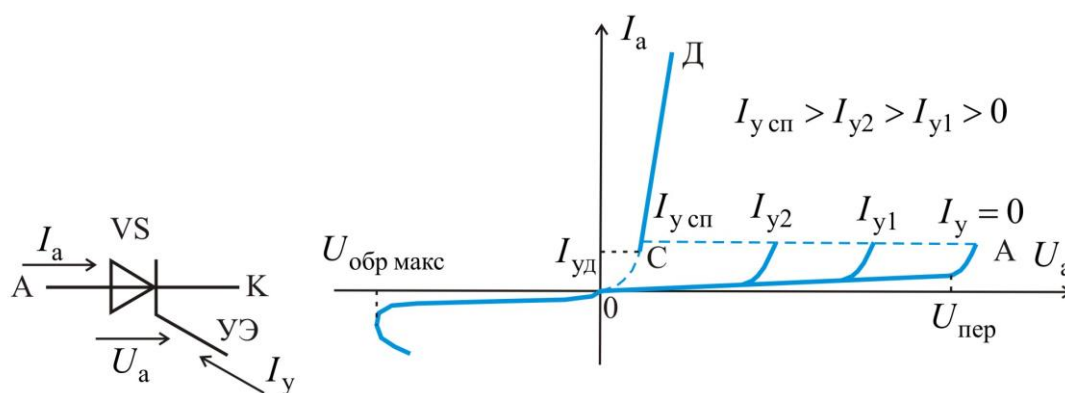


Рис. 3. Обозначение на электрической схеме и ВАХ тиристора.

Тиристор VS имеет три внешних вывода: анод А, катод К и управляющий электрод УЭ. Силовой цепью тиристора, по которой проходит коммутируемый ток, является цепь А – К. Цепью управления является участок УЭ – К. При положительном направлении тока управления ($I_y > 0$) и положительном напряжении между анодом и катодом, т.е. при $U_a > 0$, тиристор можно включить. ВАХ тиристора в третьем квадранте при отрицательных анодных напряжениях $U_a < 0$ соответствует его закрытому состоянию. Тиристор выходит из строя если его обратное напряжение превысит значение $U_{обр\ макс}$.

ВАХ в первом квадранте имеет два участка:

1. линия ОА, когда тиристор закрыт при $I_y = 0$;
2. линия СД, когда тиристор открыт.

Переход с участка ОА на СД (включение тиристора) возможен если:

а) анодное напряжение U_a превысит напряжение переключения $U_{пер}$, что в тиристорах обычно не используется;

б) по цепи управления пропустить положительный ток управления $I_y > 0$, от значения которого зависит анодное напряжение, при котором тиристор включится.

При некотором значении I_y ВАХ тиристора в первом квадранте становится аналогичной ВАХ диода, т.е. ВАХ тиристора как бы спрямляется. Этот ток управления называют током управления спрямления $I_{yсп}$. На практике используют динамический способ включения, когда в цепи управления формируют импульс с крутым передним фронтом определенной длительности и амплитуды, превышающей $I_{yсп}$. В этом случае тиристор на время появления импульса управления представляет собой обычный диод, а после окончания этого импульса тиристор остается включенным. Включенное состояние тиристора будет устойчивым, если анодный ток после окончания импульса управления будет превышать определенное значение, называемое током удержания $I_{уд}$. В противном случае тиристор закроется.

Из сказанного следует, что для выключения тиристорov необходимо каким-либо образом уменьшить анодный ток до $I_{уд}$. Другой способ выключения возможен, если к тиристорy приложить обратное анодное напряжение $U_a < 0$.

Динамические свойства тиристорov, определяющие возможности их использования в циклически работающих устройствах, характеризуются временем включения $t_{вкл}$ и выключения $t_{выкл}$. Эти величины характеризуют быстродействие тиристорa.

1.2. Однофазные неуправляемые выпрямители

Однофазные неуправляемые выпрямители предназначены для преобразования однофазного переменного напряжения в постоянное. В неуправляемых выпрямителях среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке $U_{нсп}$ пропорционально выпрямленному переменному напряжению. Коэффициент пропорциональности зависит от используемой схемы выпрямления.

Чтобы упростить изложение принципа работы схем выпрямления и расчетные соотношения по выбору элементов этих схем, будем в дальнейшем считать:

- диоды и тиристоры – идеальными и безинерционными;

- трансформатор – идеальным, т.е. активные и индуктивные сопротивления обмоток, потери мощности в его магнитопроводе, а также намагничивающий ток примем равными нулю.

На практике применяют два типа однофазных выпрямителей: однополупериодный и двухполупериодный. Двухполупериодные схемы получили наибольшее применение.

1.2.1. Однофазный однополупериодный выпрямитель

Схема однофазного однополупериодного выпрямителя и временные диаграммы, поясняющие его работу, приведены на рис. 4.

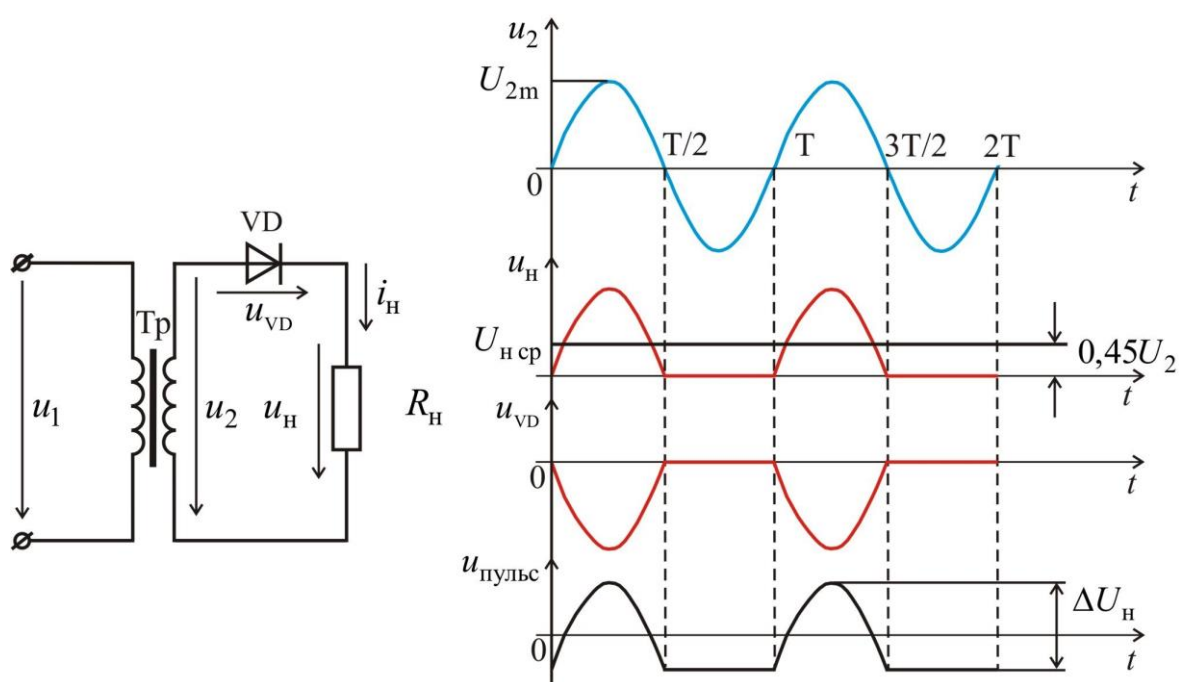


Рис. 4. Однофазный однополупериодный выпрямитель.

В интервале времени $0 - T/2$ напряжение на вторичной обмотке трансформатора $u_2 > 0$, следовательно, диод VD открыт и напряжение на нагрузке u_H повторяет положительную волну $u_2(t)$, падение напряжения на открытом диоде $u_{VD} = 0$.

На интервале $T/2 - T$ напряжение $u_2 < 0$, следовательно, диод закрыт и ток в нагрузке $i_H = 0$, отрицательная полуволна $u_2(t)$ будет на закрытом диоде. Далее процессы повторяются.

Напряжение (ток) на нагрузке имеет пульсирующий характер с постоянной составляющей U_{Hcp} (I_{Hcp}), которые необходимы для питания нагрузки. Таким образом,

выпрямленное напряжение имеет как постоянную $U_{н\text{ср}}$, так и переменную составляющую, которую называют напряжением пульсаций $u_{\text{пульс}}(t)$.

$$u_{\text{н}}(t) = U_{\text{нср}} + u_{\text{пульс}}(t). \quad (1)$$

Пульсации характеризуются частотой и разностью максимального и минимального значений напряжения $\Delta U_{\text{н}}$ за период. Для данной схемы выпрямления, как видно из временных диаграмм рис. 4, частота пульсаций совпадает с сетевой частотой, а $\Delta U_{\text{н}} = U_{2\text{м}}$. Чем меньше пульсации и чем больше их частота, тем более качественным считается выпрямленное напряжение.

Связь между $U_{\text{нср}}$ и действующим значением напряжением вторичной обмотки трансформатора U_2 находят как среднее за период значение напряжения $u_{\text{н}}(t)$:

$$U_{\text{нср}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_2(t) dt = 0,45 \cdot U_2. \quad (2)$$

$$U_2 = 2,22 \cdot U_{\text{нср}}. \quad (3)$$

Выражение (3) положено в основу расчета требуемого коэффициента трансформации $k_{\text{ТР}} = U_1 / U_2$, так как величины $U_{\text{нср}}$ и U_1 являются заданными.

Выбор диода по прямому току и обратному напряжению проводят по соотношениям

$$I_{\text{н}} = I_{\text{нср}}; \quad (4)$$

$$U_{\text{обр макс}} = \sqrt{2} \cdot U_2 = 3,14 \cdot U_{\text{нср}}. \quad (5)$$

1.2.2. Однофазный двухполупериодный выпрямитель (мостовая схема)

Схема однофазного двухполупериодного (мостового) выпрямителя и его временные диаграммы приведены на Рис. 5.

В интервале времени $0 - T/2$ напряжение на вторичной обмотке трансформатора $u_2 > 0$, следовательно, диоды VD1 и VD4 открыты и напряжение на нагрузке $u_{\text{н}}$ повторяет положительную волну $u_2(t)$.

На интервале $T/2 - T$ напряжение $u_2(t) < 0$, следовательно, диоды VD2 и VD3 открыты, а VD1 и VD4 закрыты. Ток через нагрузку сохраняет то же направление, что и на интервале $0 - T/2$, а значит, напряжение $u_{\text{н}}(t)$ не изменяет свою полярность. Далее процессы повторяются.

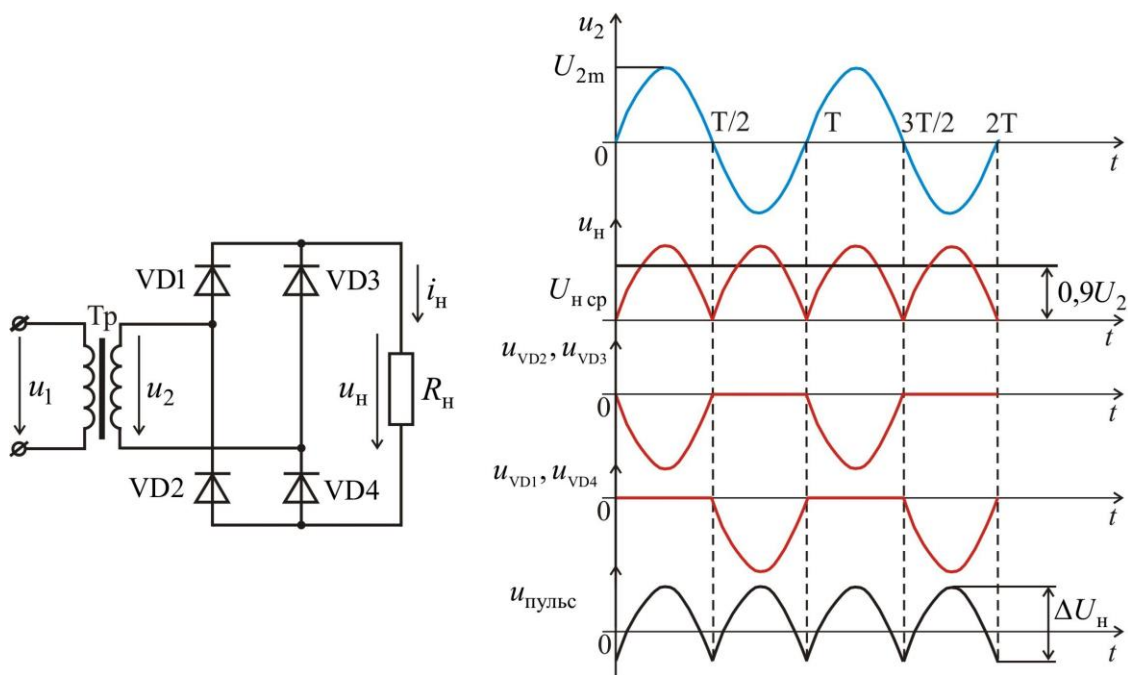


Рис. 5. Однофазный двухполупериодный выпрямитель.

Таким образом, напряжение на нагрузке однополярно и имеет пульсирующий характер с постоянной составляющей

$$U_{H\text{ ср}} = \frac{2}{T} \int_0^T u_2(t) dt = 0,9 \cdot U_2; \quad (6)$$

$$U_2 = 1,11 \cdot U_{H\text{ ср}}. \quad (7)$$

Диоды по прямому току и обратному напряжению выбираются по соотношениям

$$I_H = \frac{I_{H\text{ ср}}}{2}; \quad (8)$$

$$U_{\text{обр макс}} = \frac{\pi}{2} \cdot U_{H\text{ ср}}. \quad (9)$$

Выражение (8) обусловлено тем, что каждый диод открыт в течение половины периода выпрямленного напряжения.

Для данной схемы выпрямления, как видно из временных диаграмм Рис. 5, частота пульсаций вдвое превышает сетевую частоту, а $\Delta U_H = U_{2m}$.

Преимуществами мостовой схемы по сравнению с предыдущей является более легкий режим работы диодов (при одинаковых $U_{H\text{ ср}}$ и $I_{H\text{ ср}}$). Также в мостовой схеме лучше используется трансформатор, так как ток вторичной обмотки $i_2(t)$ не имеет постоянной составляющей, подмагничивающей сердечник трансформатора.

Качество выпрямленного напряжения $u_H(t)$ количественно оценивается величиной коэффициента пульсаций, которую можно вычислить при разложении периодической функции $u_H(t)$ в ряд Фурье. Для однополупериодного выпрямления это разложение имеет вид

$$u_H(t) = \frac{U_{2m}}{\pi} \left(1 + \frac{\pi}{2} \cdot \cos \omega t + \frac{2}{3} \cdot \cos 2\omega t + \dots \right). \quad (10)$$

Для двухполупериодного выпрямления

$$u_H(t) = \frac{2 \cdot U_{2m}}{\pi} \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cdot \cos 4\omega t + \dots \right). \quad (11)$$

Каждое разложение имеет постоянную составляющую, не зависящую от времени, и гармоники (основную и высшие), которые называют пульсациями. Количественно наличие пульсаций оценивают коэффициентом пульсаций K_{Π} , равным отношению амплитуды основной гармоники в разложении к постоянной составляющей, которая и есть U_{Hcp} . Для однополупериодного выпрямления $K_{\Pi} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57$, а для двухполупериодного $K_{\Pi} = \frac{2}{3} \approx 0,67$. Чем меньше K_{Π} , тем выше качество выпрямленного напряжения. У идеального источника питания $K_{\Pi} = 0$.

При экспериментальных исследованиях коэффициент пульсаций можно приближенно вычислять как отношение амплитуды переменной составляющей выпрямленного напряжения $U_{H\sim} = \frac{\Delta U_H}{2}$ к среднему выпрямленному напряжению U_{Hcp}

$$K_{\Pi} = \frac{U_{H\sim}}{U_{Hcp}} = \frac{\Delta U_H}{2 \cdot U_{Hcp}}. \quad (12)$$

1.3. Сглаживающие фильтры

Для снижения пульсаций выпрямленного напряжения используют сглаживающие фильтры, простейшими из которых являются емкостный и индуктивный. Принцип работы фильтров основан на использовании зависимости от частоты реактивных сопротивлений емкости $x_C = \frac{1}{\omega C}$ и индуктивности $x_L = \omega L$. При постоянном токе $x_C = \infty$, $x_L = 0$, поэтому конденсатор включают параллельно нагрузке, а индуктивность последовательно.

Схема включения и временные диаграммы, поясняющие работу емкостного фильтра в однополупериодном выпрямителе, показана на Рис. 6.

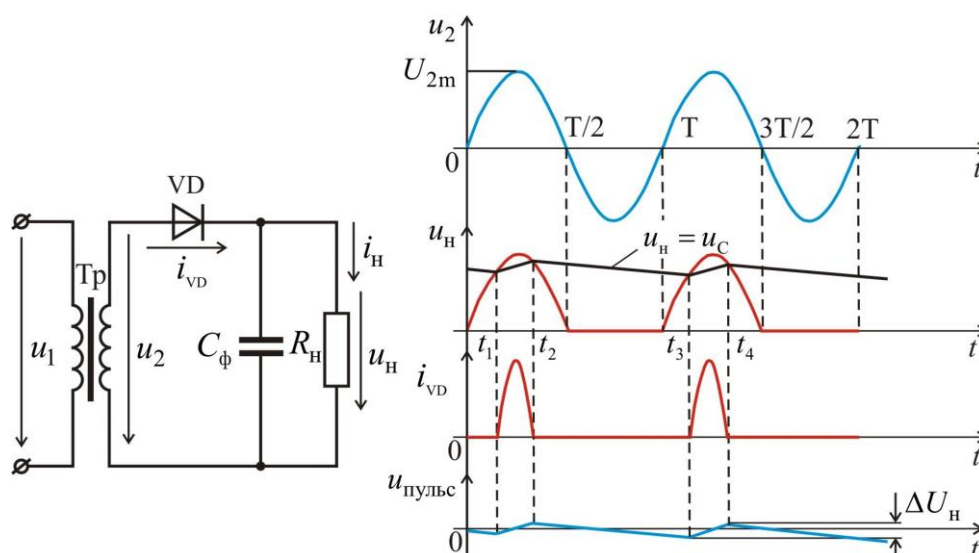


Рис. 6. Работа емкостного фильтра в однофазном однополупериодном выпрямителе.

Рассмотрим установившиеся процессы периодических изменений напряжения на конденсаторе. При повышении напряжения $u_2(t)$ вторичной обмотки трансформатора наступит момент времени t_1 , когда оно станет равным напряжению на конденсаторе $u_C(t)$. Дальнейшее повышение напряжения $u_2(t)$ определит процесс зарядки конденсатора.

Для конденсатора с емкостью C_ϕ этот процесс характеризуется постоянной времени заряда $\tau_{\text{зар}} = R \cdot C_\phi$, где R – сопротивление цепи заряда.

Оно включает в себя активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к его вторичной обмотке и сопротивление открытого диода. Эти величины хотя и малы, но конечны, поэтому с момента времени t_1 напряжение $u_C(t)$ начинает расти, оставаясь, тем не менее, ниже, чем $u_2(t)$. На интервале заряда ток протекает через открытый диод VD.

После перехода $u_2(t)$ через максимум начинается его снижение. С момента времени t_2 скорость снижения $u_2(t)$ становится больше скорости снижения $u_C(t)$, в результате напряжение на конденсаторе оказывается ниже, чем $u_2(t)$, диод закрывается и начинается интервал разряда емкости. Конденсатор разряжается на нагрузку с постоянной времени разряда $\tau_{\text{разр}} = R_n \cdot C_\phi$ до момента времени t_3 , пока напряжение вторичной обмотки опять не превысит напряжение на конденсаторе. Далее процессы повторяются.

Чем больше $\tau_{\text{разр}}$, тем более сглаженной является форма $u_H(t)$, т.е. тем меньше коэффициент пульсаций. Расчет коэффициента пульсаций при использовании емкостного фильтра часто производят по эмпирической формуле

$$K_{\text{п}} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot \tau_{\text{разр}}}, \quad (13)$$

где f – частота сетевого напряжения.

Индуктивным фильтром является катушка с ферромагнитным сердечником, называемая дросселем. Дроссель, Рис. 7, включается последовательно в цепь тока нагрузки.

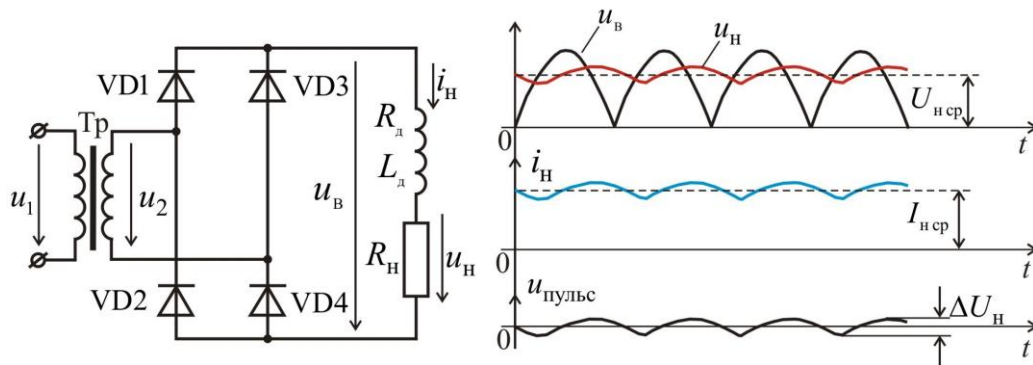


Рис. 7. Индуктивный фильтр в схеме двухполупериодного выпрямления.

Физическую основу работы индуктивности в качестве сглаживающего фильтра составляет закон Ленца, согласно которому при возрастании тока возникает ЭДС, препятствующая этому возрастанию, а при убывании тока возникающая ЭДС стремится поддержать убывающий ток. Вначале индуктивность запасает энергию в своем магнитном поле, а потом отдает ее.

Рассмотрение процессов в цепи нагрузки выпрямителя с индуктивным фильтром выполним, применив метод анализа по отдельным гармоническим составляющим токов и напряжений. Будем считать, что принятая для анализа схема содержит последовательно соединенные элементы с параметрами R_d (активное сопротивление дросселя), L_d (индуктивность дросселя) и R_H . Напряжение u_B на входе последовательной цепи несинусоидальное, и при разложении в ряд Фурье имеет вид аналогичный (11)

$$u_B(t) = \frac{2 \cdot U_{2m}}{\pi} \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cdot \cos 4\omega t + \dots \right). \quad (14)$$

Постоянная составляющая этого напряжения $U_{\text{н ср}} = \frac{2 \cdot U_{2\text{м}}}{\pi}$ вызовет соответствующую составляющую тока нагрузки:

$$I_{\text{н ср}} = \frac{U_{\text{н ср}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{д}}}. \quad (15)$$

Амплитуда каждой из переменных составляющих тока нагрузки будет

$$I_{\text{м н}} = \frac{U_{\text{м н}}}{\sqrt{(R_{\text{н}} + R_{\text{д}})^2 + (n\omega \cdot L_{\text{д}})^2}}, \quad (16)$$

где $n = 2, 4, 6, \dots$ – номер гармонической составляющей.

Сглаживающее действие фильтра зависит от величины $L_{\text{д}}$ и $R_{\text{н}}$. Если подобрать индуктивность $L_{\text{д}}$ такой величины, что ее индуктивное сопротивление $n\omega \cdot L_{\text{д}}$ будет много больше сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$, то амплитуды переменных составляющих тока (а значит и напряжения) в нагрузке будут малы и пульсации резко снизятся.

В режиме холостого хода ток в цепи дросселя не протекает и фильтр не действует. Подключение нагрузки $R_{\text{н}}$ и дальнейшее уменьшение ее сопротивления приводит к относительному возрастанию индуктивного сопротивления в полном сопротивлении цепи нагрузки и повышению эффективности работы фильтра.

1.4. Трехфазный неуправляемый мостовой выпрямитель (схема Ларионова Л.Н.)

Потребители средней и большой мощности питаются выпрямленным трехфазным напряжением. Чаще всего используется мостовая схема выпрямления трехфазного напряжения (схема Ларионова Л.Н.), Рис. 8.

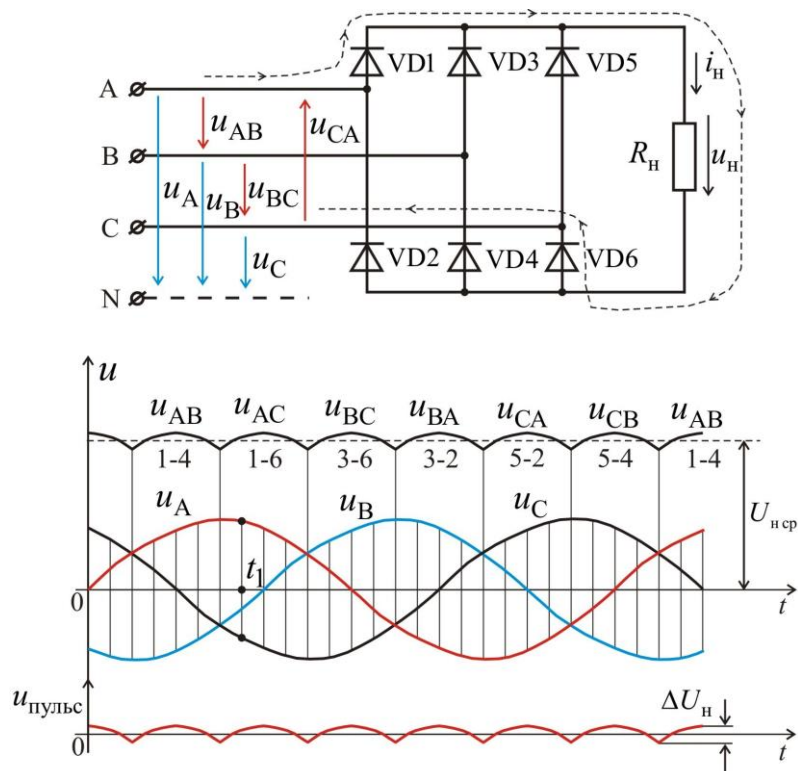


Рис. 8. Трехфазная мостовая схема выпрямления.

Она состоит из шести полупроводниковых диодов, на которые подается линейное трехфазное напряжение. На Рис. 8 показаны кривые фазных напряжений источника питания u_A, u_B, u_C и кривая выпрямленного напряжения $u_H(t)$. В произвольный момент времени ток через нагрузку протекает от фазы с наибольшим значением напряжения, к фазе с наименьшим значением напряжения. Например, в момент времени t_1 , наибольшее напряжение в фазе А, наименьшее в фазе В. Наибольшее напряжение приложено к аноду диода VD1, и поэтому этот диод открыт. По той же причине, наименьшее напряжение, приложенное к катоду диода VD6, открывает этот диод. В результате ток протекает от точки А через открытый диод VD1, нагрузку, открытый диод VD6 к точке В. Путь тока показан на Рис. 8 пунктиром. К нагрузке приложена разность напряжений фаз А и В, то есть линейное напряжение u_{AB} . Каждый диод, как можно видеть из временных диаграмм, Рис. 8, открыт одну треть периода. Поэтому при выборе типа диода его номинальный ток I_H должен быть не меньше одной трети среднего выпрямленного тока $I_{H\text{ ср}}$

$$I_H \geq \frac{I_{H\text{ ср}}}{3}. \quad (17)$$

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{\text{н ср}} = \frac{3 \cdot U_{\text{л макс}}}{\pi} \cong 1,35 \cdot U_{\text{л}} = 2,34 \cdot U_{\text{ф}}, \quad (18)$$

где $U_{\text{л}}$ и $U_{\text{ф}}$ - действующие значения линейного и фазного напряжений сети.

Обратное напряжение диода достигает амплитудного значения линейного напряжения, поэтому выбор диода осуществляется из расчета

$$U_{\text{обр макс}} \geq U_{\text{л макс}} = \frac{\pi}{3} \cdot U_{\text{н ср}} \cong 1,05 \cdot U_{\text{н ср}} \quad (19)$$

Если разложить мгновенное значение напряжения на нагрузке в ряд Фурье, получим

$$u_{\text{н}}(t) = U_{\text{н ср}} \cdot \left(1 + \frac{2}{35} \cdot \cos 6\omega t - \frac{2}{143} \cdot \cos 12\omega t + \dots \right). \quad (20)$$

Из (20) следует, что пульсации имеют частоту в шесть раз выше сетевой частоты. Это облегчает фильтрацию пульсаций выпрямленного напряжения. Коэффициент пульсаций

$$K_{\text{п}} = \frac{2}{35} \cong 0,057 \quad (21)$$

достаточно мал, и поэтому сглаживающие фильтры в трехфазной мостовой схеме часто не применяются вообще.

1.5. Внешние характеристики выпрямителей

Анализ принципа действия и режимов работы маломощных выпрямителей постоянного тока проводился в предположении, что активные сопротивления обмоток трансформатора, подводящих проводов, сглаживающего дросселя, а также падения напряжения на диодах равны нулю. В связи с этим приведенные соотношения следует считать приближенными для реальных схем, поскольку вследствие падений напряжений на элементах от протекания токов реальное среднее значение выпрямленного напряжения $U_{\text{н ср}}$ получается меньше и уменьшается с ростом тока нагрузки $I_{\text{н ср}}$. Это явление отражает внешняя характеристика выпрямителя $U_{\text{н ср}} = f(I_{\text{н ср}})$.

В качестве примера, на Рис. 9 приведены внешние характеристики двухполупериодного (мостового) выпрямителя.

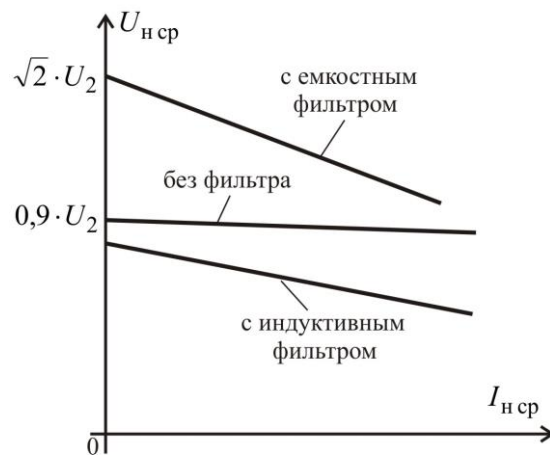


Рис. 9. Внешние характеристики однофазного двухполупериодного выпрямителя.

Выпрямленное напряжение в схеме без фильтра равно $0,9 \cdot U_2$ (смотри выражение 6). Эта величина соответствует холостому ходу выпрямителя $I_{н ср} = 0$. При $I_{н ср} > 0$ ввиду протекания токов через элементы схемы (обмотки трансформатора, диоды, соединительные провода) на них создаются падения напряжения. Вследствие этого мгновенные и средние значения выпрямленного напряжения с ростом $I_{н ср}$ уменьшаются.

Внешняя характеристика выпрямителя с емкостным фильтром исходит из точки $U_{2м} = \sqrt{2} \cdot U_2$, поскольку при $I_{н ср} = 0$ конденсатор фильтра заряжается до амплитудного значения напряжения u_2 . При $I_{н ср} > 0$ напряжение на нагрузке уменьшается по двум причинам:

- ввиду падения напряжения на элементах схемы на этапе заряда конденсатора;
- большего разряда конденсатора на уменьшающееся сопротивление нагрузки.

С увеличением тока нагрузки снижение напряжения обуславливается главным образом по второй причине. Внешняя характеристика выпрямителя с емкостным фильтром имеет больший наклон (более мягкая), чем без фильтра.

Наклон внешней характеристики с L – фильтром будет большим из-за дополнительного падения напряжения в активном сопротивлении дросселя фильтра. Напряжение холостого хода (начальная точка) также снижается ввиду конечного сопротивления дросселя R_d .

1.6. Управляемые выпрямители

Управляемые выпрямители используют в тех случаях, когда требуется изменение выпрямленного напряжения по условиям работы нагрузки. В качестве регулирующих элементов применяют тиристоры.

1.6.1. Однофазный однополупериодный управляемый выпрямитель

Одна из возможных схем построения однофазного управляемого выпрямителя и временные диаграммы его работы показаны на рис. 10.

Цепь, состоящая из последовательно соединённых тиристора VS и нагрузки R_H , питается от источника синусоидального напряжения.

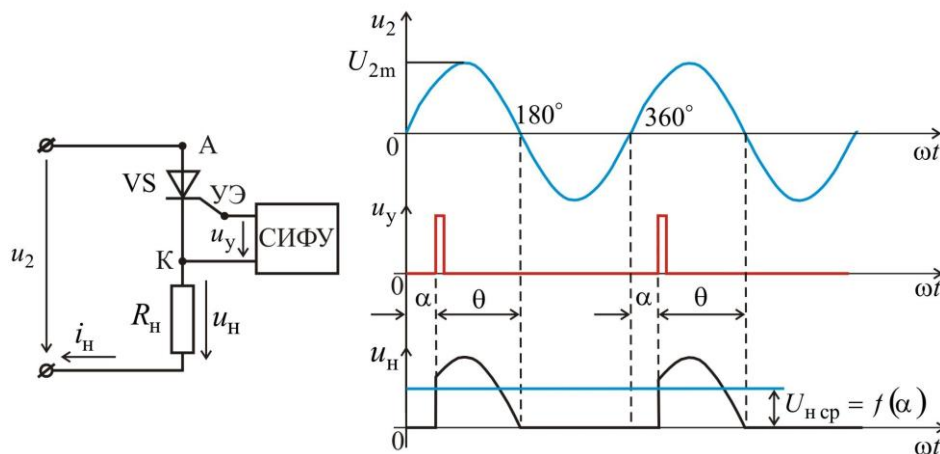


Рис. 10. Управляемый однофазный однополупериодный выпрямитель.

На отрезке времени от $\omega t = 0$ до $\omega t = \alpha$ несмотря на положительное напряжение на аноде А тиристора, он остаётся закрытым, так как нет напряжения на управляющем электроде. В момент времени $\omega t = \alpha$ на управляющий электрод тиристора подаётся короткий управляющий импульс от системы импульсно-фазового управления (СИФУ) и тиристор открывается.

Он остаётся открытым в течение отрезка времени θ , т.е. до перехода приложенного к тиристорам напряжения через ноль. Отрицательную полуволну тока тиристор не пропускает, и процесс повторяется на следующей положительной полуволне приложенного напряжения. Регулируя угол управления α , можно изменять время включённого состояния тиристора и, следовательно, среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{Hcp} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{2m} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = 0,225 \cdot U_2 \cdot (1 + \cos \alpha). \quad (22)$$

Выражение (22) носит название регулировочной характеристики выпрямителя.

1.6.2. Однофазные двухполупериодные управляемые выпрямители

Для улучшения качества выпрямленного сигнала применяют полумостовые и мостовые схемы выпрямления, реализующие регулируемое двухполупериодное выпрямление. Мостовая схема приведена на Рис. 11.

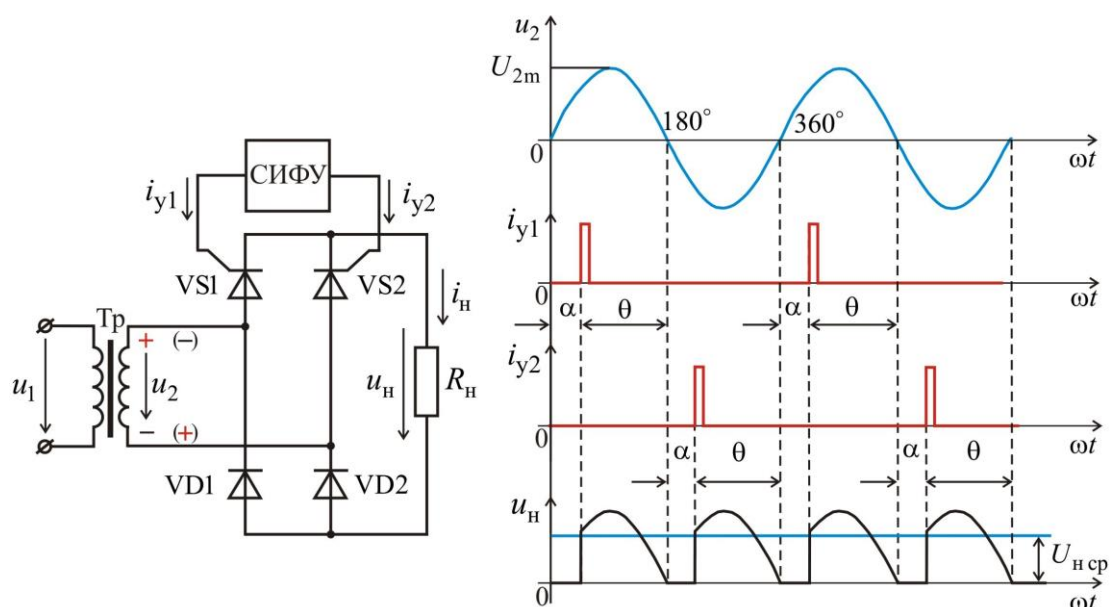


Рис. 11. Управляемый однофазный двухполупериодный выпрямитель.

Она содержит диоды VD1, VD2, тиристоры VS1, VS2, трансформатор и схему управления СИФУ, вырабатывающую импульсы тока управления тиристорами. Принцип действия схемы рассмотрим для чисто активной нагрузки R_n .

При поступлении положительной полуволны напряжения u_2 в интервале $0 - \pi$ к аноду тиристора VS1 прикладывается напряжение положительной полярности, а к аноду тиристора VS2 – отрицательной полярности. Тиристор VS2 на всем интервале $0 - \pi$ будет закрыт из-за отрицательного напряжения на его аноде. Тиристор VS1 также будет закрыт, пока в цепи его управления не появится импульс тока управления $i_{y1} > 0$. Этому моменту на временных диаграммах соответствует угол включения α , который отсчитывается от начала периода. С появлением импульса i_{y1} тиристор включается, и напряжение u_2 оказывается приложенным к нагрузке. Через сопротивление нагрузки R_n протекает ток по цепи $+$; VS1; R_n ; VD2; $-$. В интервале $\pi - 2\pi$ тиристор VS1 закрывается отрицательным анодным напряжением. Тиристор VS2, к аноду которого в этот промежуток приложено положительное напряжение $(+)-(-)$, откроется только при

появлении импульса i_{y2} , также сдвинутого на угол α , но уже относительно точки π . Через сопротивление нагрузки R_H протекает ток по цепи $(+); VS2; R_H; VD1; (-)$, причем в том же направлении, что и на интервале $0 - \pi$ и, как следствие, полярность напряжения u_H не меняется. Далее процессы повторяются. С изменением угла включения α изменяется среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке U_{Hcp} , которое выражается формулой

$$U_{Hcp} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{2m} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = 0,45 \cdot U_2 \cdot (1 + \cos \alpha). \quad (23)$$

Регулируемое двухполупериодное выпрямление можно реализовать с помощью одного тиристора, Рис. 12.

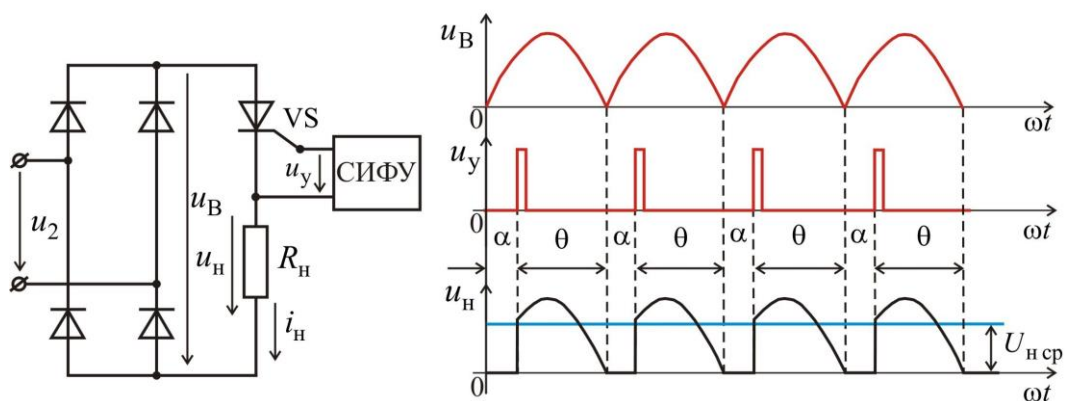


Рис. 12. Управляемый двухполупериодный выпрямитель с одним тиристором.

Схема содержит неуправляемый мостовой выпрямитель, с которого на последовательно соединенные тиристор VS и нагрузку R_H подается выпрямленное пульсирующее напряжение u_B . Тиристор открывается напряжением управления u_y , импульсы которого сдвинуты на угол α относительно начала каждого полупериода входного напряжения. Закрывается тиристор при снижении тока в нагрузке до величины меньшей тока удержания $I_{уд}$.

2. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1. Описание экспериментальной установки

Изучите описание лабораторного стенда (методические указания «Стенд и приборы для исследования электрических цепей») и цифрового осциллографа UTD2025CL (1).

2.2. Исследование однофазного однополупериодного выпрямителя

2.2.1. Измерение фазного и линейного напряжения источника питания

Для проведения измерений включите общее питание стенда, тумблер питания источника, питание блока мультиметров и цифрового осциллографа. Выберите любой из двух мультиметров. Подсоедините к выбранному мультиметру измерительные провода (красный ко входу $V\Omega$, черный – ко входу COM). Установите переключатель мультиметра в положение $V\sim$ (предел измерения 20). Подсоедините провода мультиметра к точкам ① и ② наборного поля, Рис. 13, в любой полярности. Измерьте и запишите в отчет фазное напряжение источника $U_{\phi} =$.

Подсоедините провода мультиметра к точкам ① и ③ наборного поля и измерьте линейное напряжение источника $U_{\text{л}} =$.

Подсоедините провода цифрового осциллографа к точкам ① и ② наборного поля, Рис. 13. Нажимая клавиши CH1, CH2, и MATH, добейтесь, чтобы клавиша CH1 подсвечивалась зеленым цветом, а остальные две клавиши не подсвечивались. Таким образом, устанавливается работа осциллографа по первому каналу.

Затем нажимайте последовательно клавишу CH1 до тех пор, пока в правой части экрана осциллографа, напротив функциональных клавиш F1...F5 появятся надписи «Развязка», «Фильтр», «Вольт/Дел», «Пробник», «Инверсия». Нажимая последовательно клавишу F1, установите напротив нее значение «Перем». Этим самым устанавливается «Закрытый» вход канала CH1, когда на осциллограф пропускается только переменная составляющая сигнала. При значении «Пост», на вход приходит полный сигнал, а при значении «Земля», на входе устанавливается потенциал, равный нулю.

Нажмите кратковременно клавишу AUTO, которая устанавливает режим автоматических измерений. Нажимая клавиши CH1, CH2, и MATH, добейтесь, чтобы клавиша CH1 подсвечивалась зеленым цветом, а остальные две клавиши не подсвечивались.

Ручкой регулировки масштаба по вертикали $\blacklozenge$ SCALE установите масштаб 5 V/Div (5 В/дел). Информация об установленном масштабе высвечивается в нижней части экрана осциллографа.

Ручкой регулировки горизонтальной развертки $\blacktriangleleft$ SCALE $\blacktriangleright$ установите масштаб 5 ms/Div (5 мс/дел).

Нажмите кратковременно клавишу SET TO ZERO, перемещая осциллограмму в центр экрана.

Проделав вышеперечисленные операции, вы должны увидеть на экране осциллографа синусоиду фазного напряжения. Убедитесь, что амплитуда $U_{\phi m} \cong 14 \text{ В}$, период $T \cong 20 \text{ мс}$, что соответствует частоте синусоидального сигнала 50 Гц.

Выключите тумблер «Сеть» Блока генераторов напряжений с наборным полем (питание измерительных приборов и стенда не выключать).

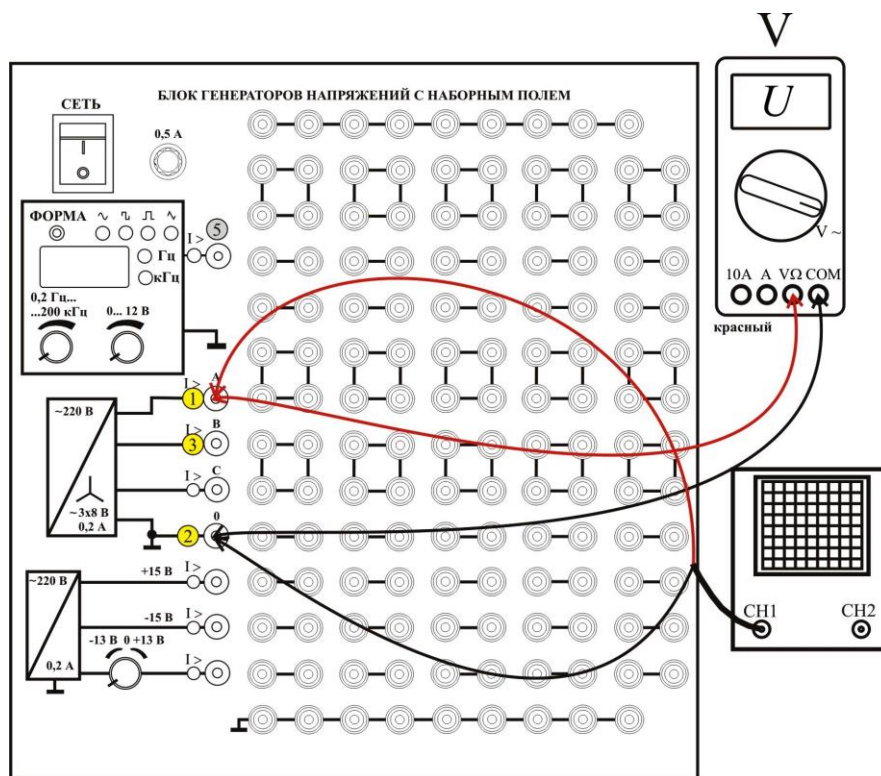


Рис. 13. Монтажная схема измерения напряжений трехфазного источника.

2.2.2. Монтаж схемы однополупериодного выпрямителя

Электрическая схема цепи приведена на Рис. 14.

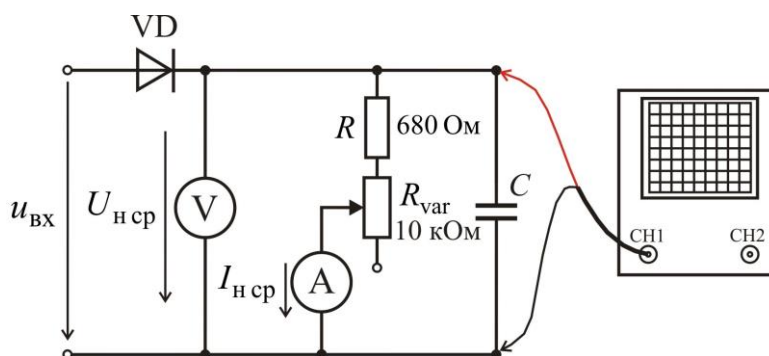


Рис. 14. Электрическая схема однофазного однополупериодного выпрямителя.

Входное синусоидальное напряжение $U_{\text{вх}} = U_{\phi}$ подается с трехфазного источника питания стенда. В качестве выпрямительного диода VD используется мини блок диода КД 226. Нагрузка состоит из последовательно включенных постоянного (мини блок 680 Ом) и переменного (мини блок потенциометра 10 кОм) резисторов. Параллельно нагрузке включен конденсатор C, играющий роль емкостного фильтра. Напряжение и ток нагрузки измеряются двумя мультиметрами.

Монтажная схема приведена на Рис. 15.

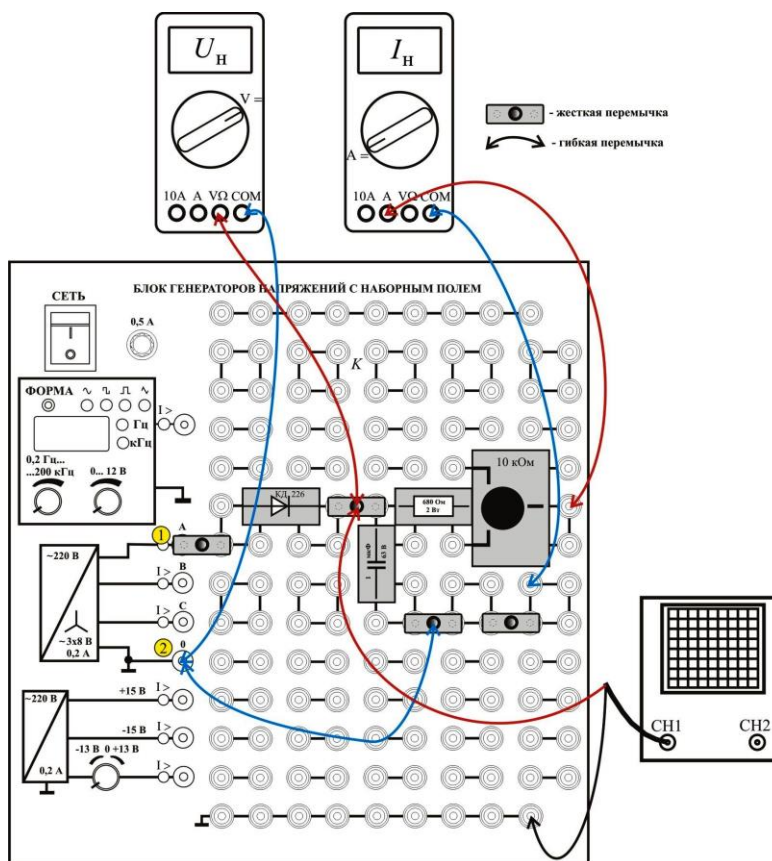


Рис. 15. Монтажная схема однополупериодного выпрямителя.

Для монтажа исследуемой схемы на наборном поле, рекомендуется на первом этапе смонтировать только мини блоки, а затем подключить источник питания и измерительные приборы, Рис. 15.

Примечание. В первом эксперименте исследуется выпрямитель без фильтра ($C=0$). Удалите из монтажной схемы мини блок конденсатора.

Включите тумблер «Сеть» Блока генераторов напряжений с наборным полем.

2.2.3. Характеристики однофазного однополупериодного выпрямителя

На монтажной схеме вместо мини блока 680 Ом установите мини блок 100 кОм. При ток через нагрузку чрезвычайно мал и реализуется режим близкий к режиму

холостого хода выпрямителя. Измерьте первым мультиметром напряжение на нагрузке $U_{н\text{ср}}$, а вторым ток $I_{н\text{ср}}$, занесите данные в Таблицу 1.

Примечание. Измерения проводить с точностью до второго знака после запятой.

Нажмите на осциллографе клавишу CH1 и последующим нажатием клавиши F1 в окне «Развязка» установите значение «Пост».

Нажмите кратковременно клавишу AUTO, которая устанавливает режим автоматических измерений. Нажимая клавиши CH1, CH2, и MATH, добейтесь, чтобы клавиша CH1 подсвечивалась зеленым цветом, а остальные две клавиши не подсвечивались. Нажмите клавишу MEASURE, а затем установите масштабы 5 V/Div и 5 ms/Div.

Нажмите кратковременно клавишу SET TO ZERO, перемещая осциллограмму в центр экрана. Наблюдайте на экране осциллографа выпрямленное напряжение. Во вкладке «Амплитуда» считайте значение полного размаха переменной составляющей сигнала $\Delta U_{н}$ и занесите его в Таблицу 1.

Верните на место мини блок 680 Ом. Вращая ручку потенциометра, по рискам на лицевой панели мини блока установите переменное сопротивление $R_{\text{var}} \cong 5 \text{ кОм}$. Занесите в соответствующий столбец Таблицы 1 $U_{н\text{ср}}, I_{н\text{ср}}, \Delta U_{н}$. Изменяя R_{var} с шагом 1 кОм, заполните графы Таблицы 1.

Таблица 1

$C=0$	$R_{\text{var}}, \text{ кОм}$	100	5	4	3	2	1	0
	$U_{н\text{ср}}, \text{ В}$							
	$I_{н\text{ср}}, \text{ мА}$							
	$\Delta U_{н}, \text{ В}$							
	K_{Π}							
$C=1 \text{ мкФ}$	$R_{\text{var}}, \text{ кОм}$	100	5	4	3	2	1	0
	$U_{н\text{ср}}, \text{ В}$							
	$I_{н\text{ср}}, \text{ мА}$							

	$\Delta U_H, \text{В}$							
	K_Π							
$C=4,7 \text{ мкФ}$	$R_{\text{вар}}, \text{кОм}$	100	5	4	3	2	1	0
	$U_{H \text{ ср}}, \text{В}$							
	$I_{H \text{ ср}}, \text{мА}$							
	$\Delta U_H, \text{В}$							
	K_Π							

Смонтируйте на наборном поле мини блок конденсатора $C=1 \text{ мкФ}$. Проведите те же измерения, что и в п. 2.2.3.

Замените мини блок $C=1 \text{ мкФ}$ на $C=4,7 \text{ мкФ}$. Проведите те же измерения, что и в п. 2.2.3.

По показаниям осциллографа вычислите частоту пульсаций $f_\Pi =$.

Используя выражение (12), рассчитайте коэффициенты пульсаций K_Π .

По данным Таблицы 1 на заготовке, Рис. 16, постройте графики внешних характеристик выпрямителя $U_{H \text{ ср}} = f_1(I_{H \text{ ср}})$ для трех значений емкости фильтра C .

По данным Таблицы 1 на заготовке, Рис. 17, постройте графики коэффициентов пульсаций $K_\Pi = f_2(I_{H \text{ ср}})$ для трех значений емкости фильтра C .

Примечание. Графики внешней характеристики и пульсаций для выпрямителя без фильтра ($C=0$) жесткие, то есть практически не зависят от тока $I_{H \text{ ср}}$. Их допускается строить в виде горизонтальных линий.

Примечание. Подпишите каждый график Рис. 16 и Рис. 17 следующим образом: однополуп_ $C=0$; однополуп_ $C=1$; однополуп_ $C=4,7$.

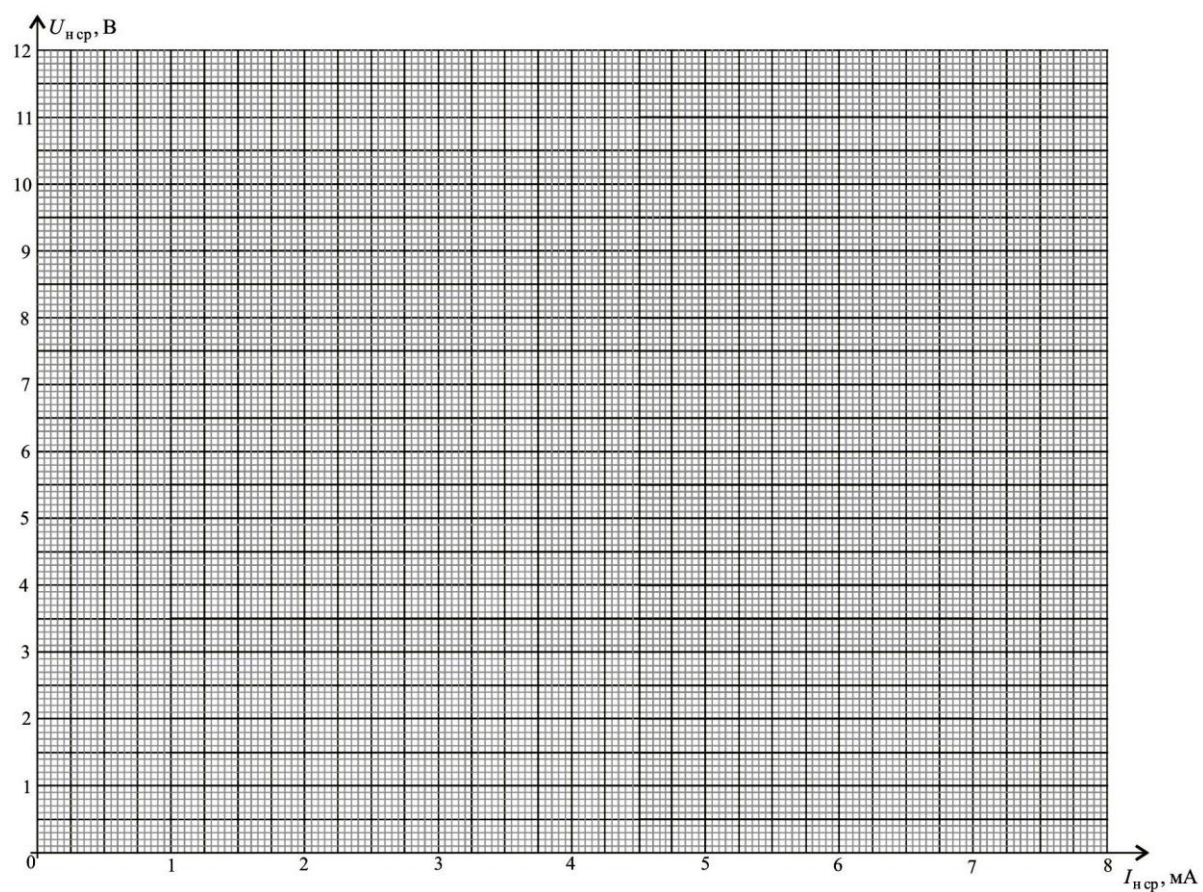


Рис. 16. Внешние характеристики выпрямителей.

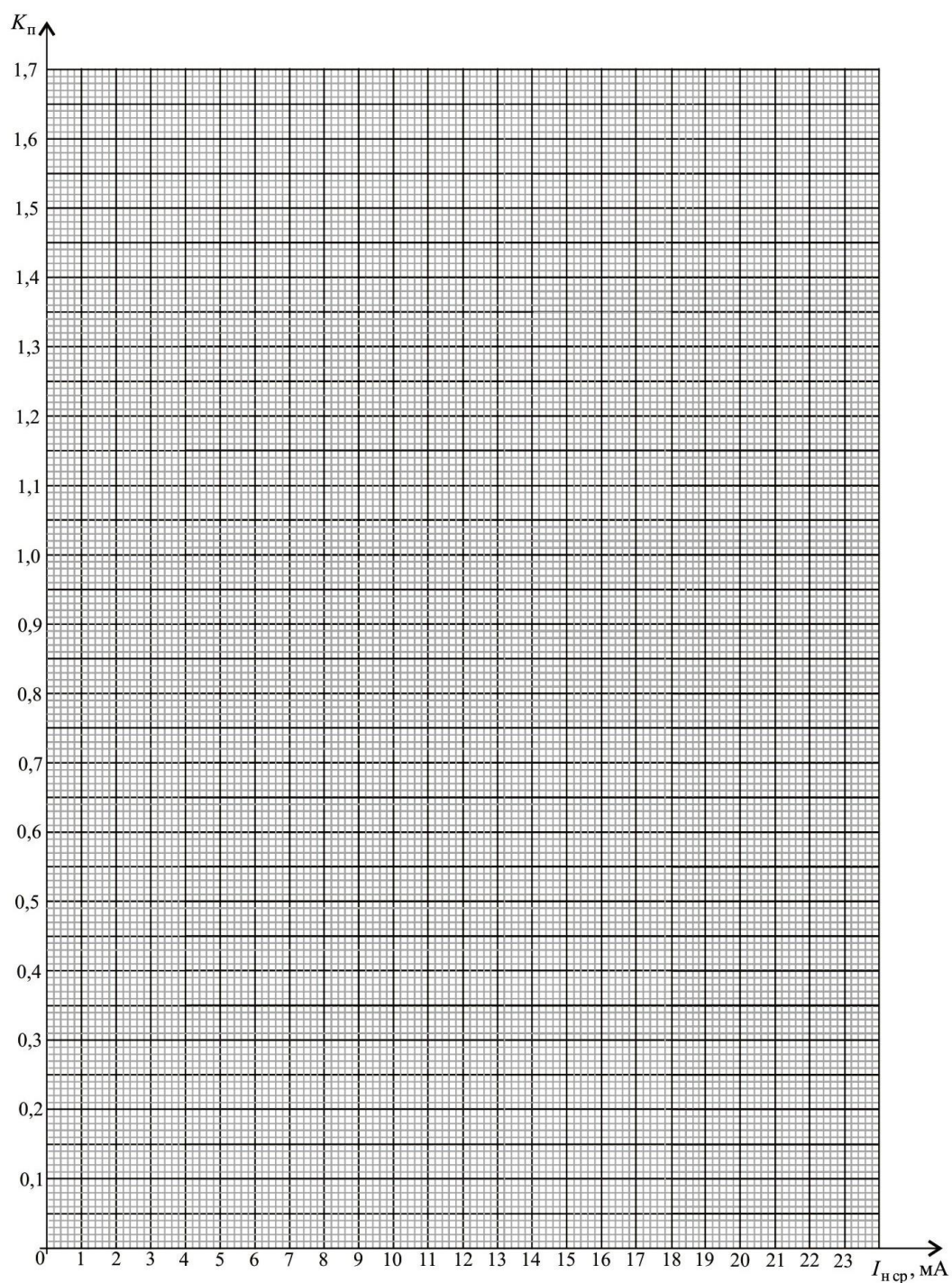


Рис. 17. Коэффициенты пульсаций выпрямителей.

Выключите тумблер «Сеть» Блока генераторов напряжений с наборным полем.

2.3. Исследование однофазного двухполупериодного выпрямителя

2.3.1. Монтаж схемы однополупериодного выпрямителя

Электрическая схема цепи приведена на Рис. 18, монтажная – на Рис. 19.

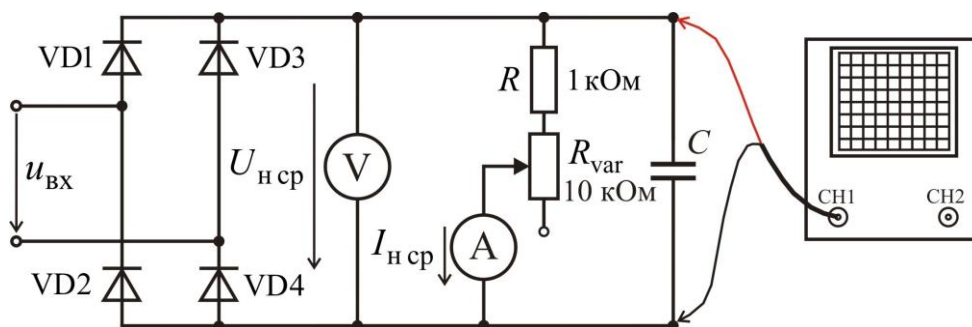


Рис. 18. Электрическая схема однофазного двухполупериодного выпрямителя.

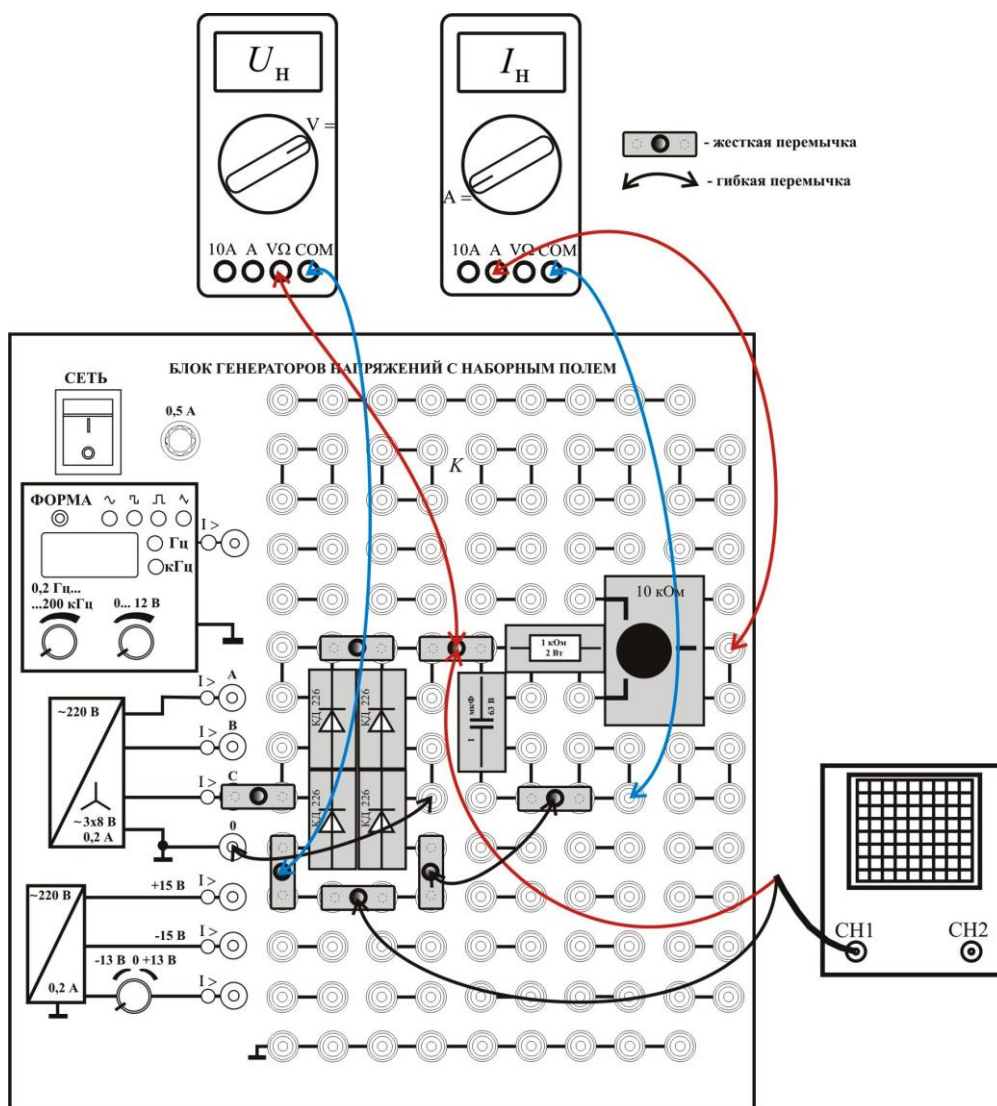


Рис. 19. Монтажная схема двухполупериодного выпрямителя.

Примечание. В первом эксперименте исследуется выпрямитель без фильтра ($C=0$). Удалите из монтажной схемы мини блок конденсатора.

Включите тумблер «Сеть» Блока генераторов напряжений с наборным полем.

2.3.2. Характеристики однофазного двухполупериодного выпрямителя

На монтажной схеме вместо мини блока 1 кОм установите мини блок 100 кОм. Измерьте первым мультиметром напряжение на нагрузке $U_{н\text{ср}}$, вторым мультиметром ток $I_{н\text{ср}}$ и занесите данные в Таблицу 2.

Наблюдайте по экрану осциллографа выпрямленное напряжение. Во вкладке «Амплитуда» считайте значение полного размаха переменной составляющей сигнала $\Delta U_{н}$ и занесите его в Таблицу 2.

Верните на место мини блок 1 кОм. Вращая ручку потенциометра, по рискам на лицевой панели мини блока установите переменное сопротивление $R_{\text{вар}} \cong 10 \text{ кОм}$. Занесите в соответствующий столбец Таблицы 2 $U_{н\text{ср}}$, $I_{н\text{ср}}$, $\Delta U_{н}$. Изменяя $R_{\text{вар}}$ с шагом 2 кОм, заполните графы Таблицы 2.

Проведите те же измерения при $C=1 \text{ мкФ}$ и $C=4,7 \text{ мкФ}$.

По показаниям осциллографа вычислите частоту пульсаций $f_{п} =$.

Таблица 2

C=0	$R_{\text{вар}}, \text{ кОм}$	100	10	8	6	4	2	0
	$U_{н\text{ср}}, \text{ В}$							
	$I_{н\text{ср}}, \text{ мА}$							
	$\Delta U_{н}, \text{ В}$							
	$K_{п}$							
C=1 мкФ	$R_{\text{вар}}, \text{ кОм}$	100	10	8	6	4	2	0
	$U_{н\text{ср}}, \text{ В}$							
	$I_{н\text{ср}}, \text{ мА}$							
	$\Delta U_{н}, \text{ В}$							
	$K_{п}$							
C=4,7 мкФ	$R_{\text{вар}}, \text{ кОм}$	100	10	8	6	4	2	0
	$U_{н\text{ср}}, \text{ В}$							
	$I_{н\text{ср}}, \text{ мА}$							
	$\Delta U_{н}, \text{ В}$							
	$K_{п}$							

По данным Таблицы 2 на заготовке, Рис. 16, постройте графики внешних характеристик выпрямителя $U_{н\text{ср}} = f_3(I_{н\text{ср}})$ для трех значений емкости фильтра C .

По данным Таблицы 2 на заготовке, Рис. 17, постройте графики коэффициентов пульсаций $K_{\text{п}} = f_4(I_{н\text{ср}})$ для трех значений емкости фильтра C .

Примечание. Подпишите каждый график Рис. 16 и Рис. 17 следующим образом: двухполуп_С=0; двухполуп_С=1; двухполуп_С=4,7.

Выключите тумблер «Сеть» Блока генераторов напряжений с наборным полем.

2.4. Исследование трехфазного мостового выпрямителя

Электрическая схема цепи приведена на Рис. 20 монтажная – на Рис. 21.

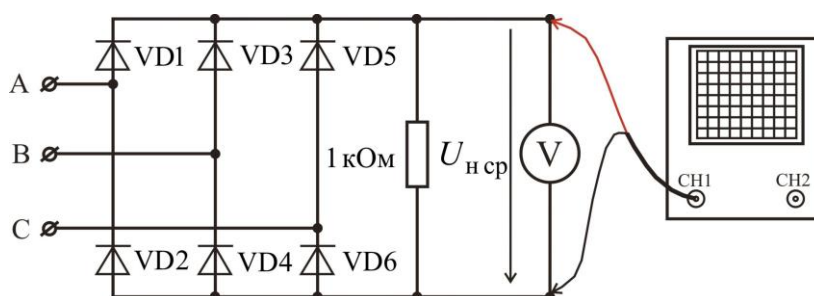


Рис. 20. Электрическая схема трехфазного мостового выпрямителя.

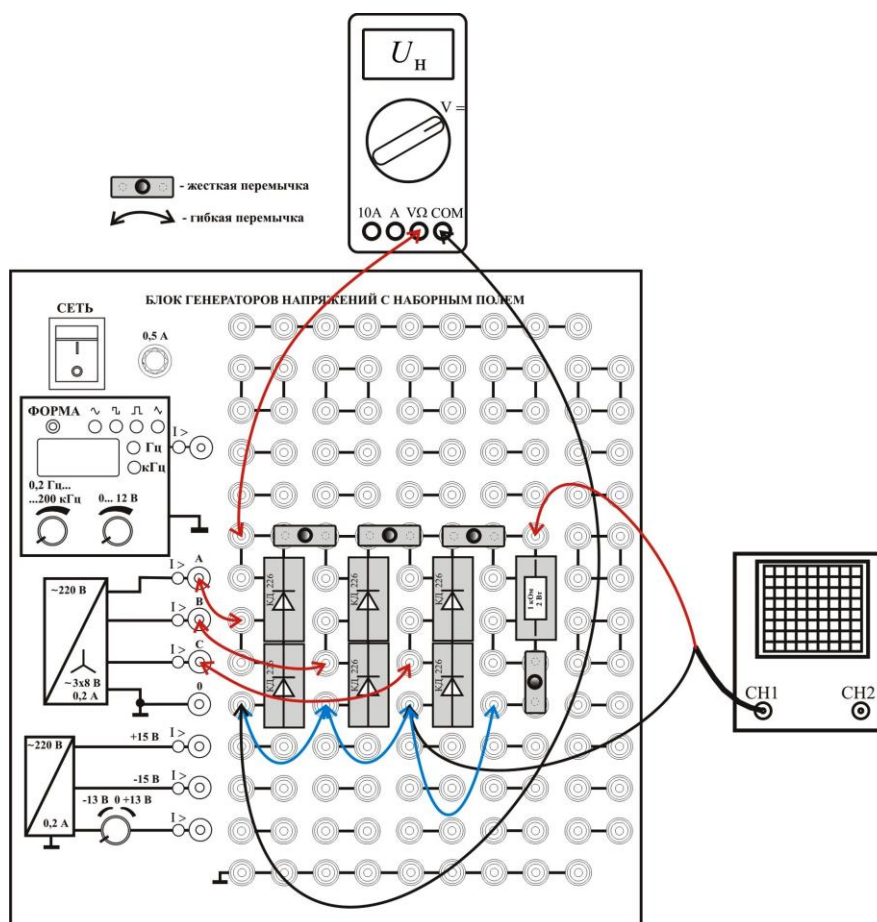


Рис. 21. Монтажная схема трехфазного мостового выпрямителя.

Смонтируйте схему, Рис. 21 и включите тумблер «Сеть» Блока генераторов напряжений с наборным полем. По показаниям вольтметра и осциллографа заполните Таблицу 3.

Таблица 3

$U_{н\text{ ср}}, \text{ В}$	$\Delta U_{н}, \text{ В}$	$K_{п}$	$f_{п}, \text{ Гц}$

Выключите тумблер «Сеть» Блока генераторов напряжений с наборным полем.

2.5. Исследование управляемого однофазного однополупериодного выпрямителя

Электрическая схема цепи приведена на Рис. 22 монтажная – на Рис. 23

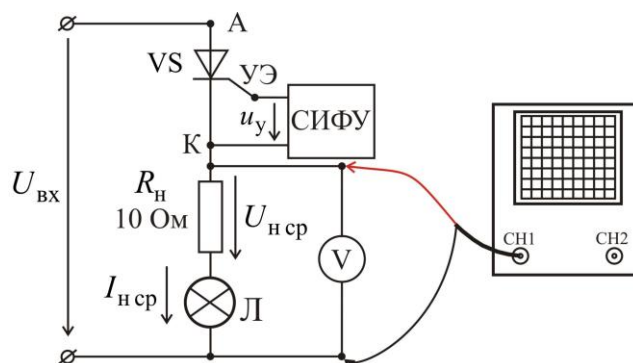


Рис. 22. Электрическая схема однофазного управляемого выпрямителя.

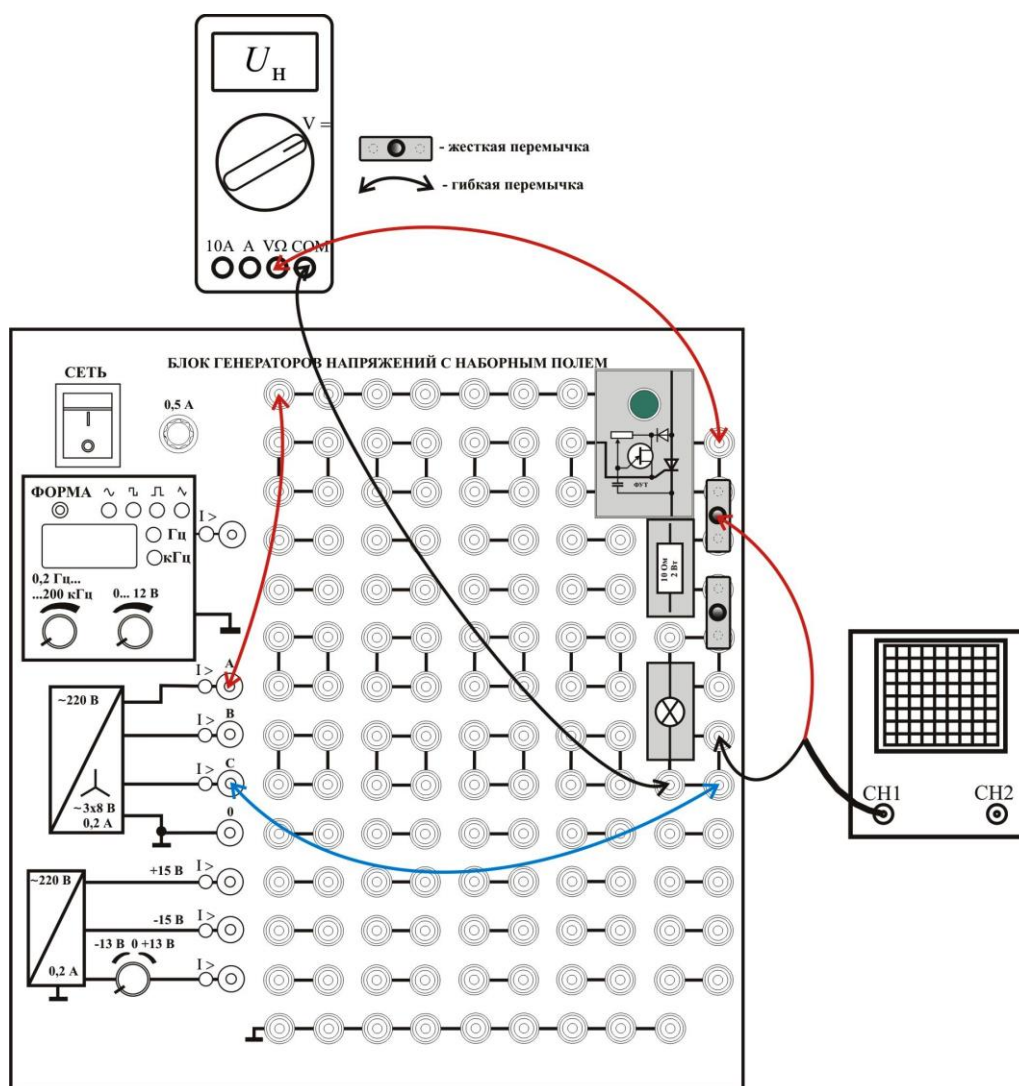


Рис. 23. Монтажная схема однофазного управляемого выпрямителя.

Смонтируйте схему, Рис. 23 и включите тумблер «Сеть» Блока генераторов напряжений с наборным полем. Устанавливая вращением ручки потенциометра блока фазового управления тиристором (ФУТ) различные углы α (см. Рис. 10), и измеряя вольтметром соответствующие этим углам значения $U_{н\text{ср}}$, заполните Таблицу 4.

Примечание. Занесите в Таблицу 4 7-8 измерений с более менее равномерным шагом в диапазоне углов от 18° до 160° . Для установки угла α руководствуйтесь следующими соображениями. При длительности развертки 1 мс/дел, полпериода синусоиды (180°) составляет десять делений сетки осциллографа. Следовательно, 18° соответствует одному делению и т.д. Иногда удобнее отсчитывать по экрану осциллографа угол θ (см. Рис. 10), и затем вычислять по нему $\alpha = 180 - \theta$.

Таблица 4

α , град.										
$U_{н\text{ср}}$, В										

Постройте график регулировочной характеристики $U_{н\text{ср}} = f(\alpha)$, используя заготовку, Рис. 24.

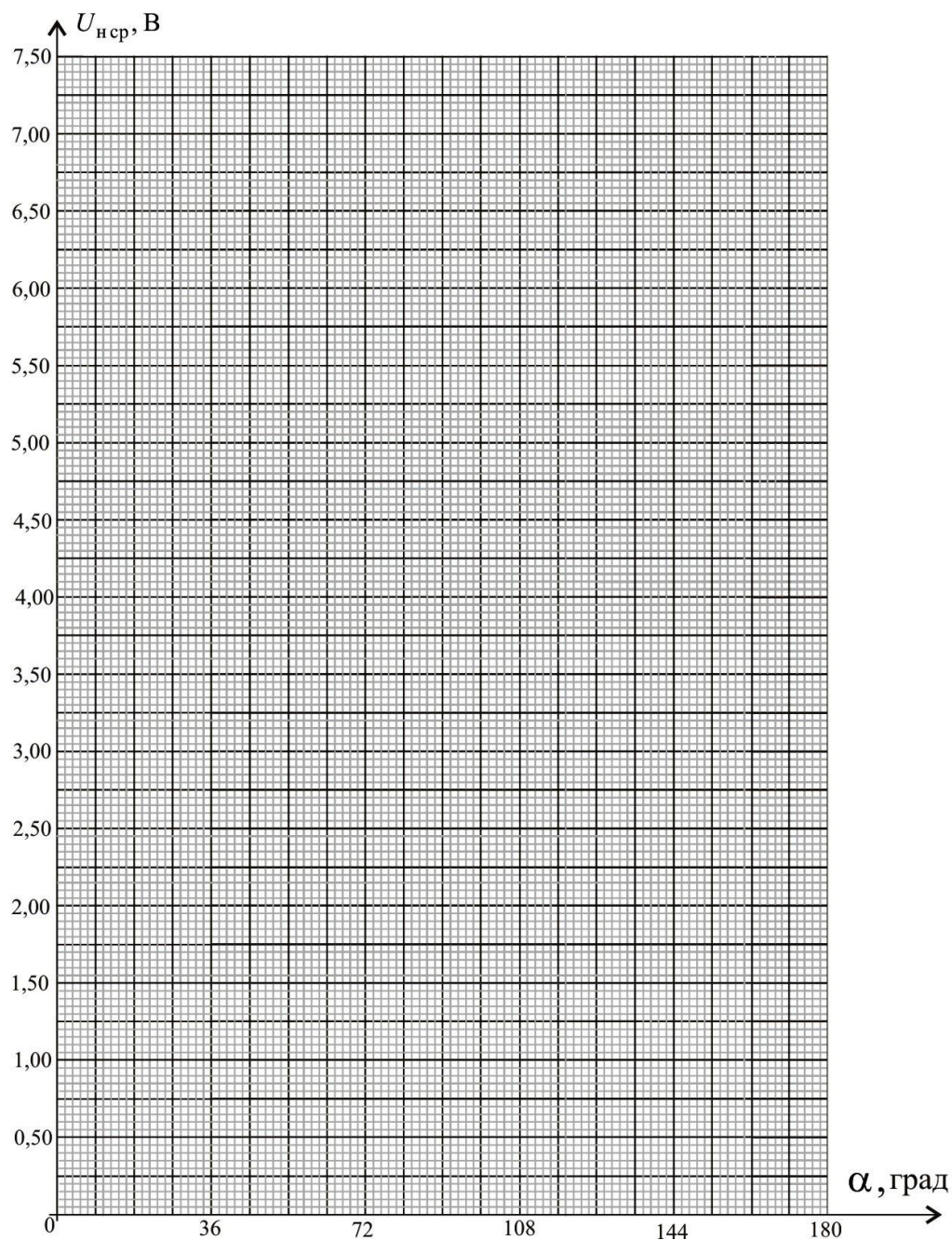


Рис. 24. Регулировочная характеристика управляемого выпрямителя.

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Форма отчета предоставляется студентам в электронном виде лектором потока.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют управляемым и неуправляемым выпрямителем и каково различие между ними?
2. Каковы основные характеристики выпрямительных устройств.
3. Назначение элементов выпрямителей (трансформатора, вентильной группы, сглаживающего фильтра).
4. Изобразите вольтамперные характеристики основных электроэлементов, применяющихся в вентильных группах выпрямительных устройств (диода, тиристора). Что подразумевается под номинальным режимом работы этих элементов?
5. Способы управления тиристором. Как включить и выключить тиристор?
6. Дайте определение внешней характеристики. Объясните характер и взаимное расположение полученных в опытах внешних характеристик.
7. Что такое пульсации выпрямленного напряжения? Как определяется коэффициент пульсаций?
8. Меры борьбы с пульсациями?
9. Объясните принцип действия емкостного фильтра.
10. Объясните принцип действия индуктивного фильтра.
11. Почему при наличии емкостного фильтра пульсации в схеме двухполупериодного выпрямителя меньше, чем в схеме однополупериодного выпрямления?
12. Поясните, почему наклон внешней характеристики в схеме двухполупериодного выпрямителя с фильтром меньше, чем в схеме однополупериодного выпрямления?
13. Объясните причину роста пульсаций при возрастании тока нагрузки.
14. Почему в режиме АС (закрытый вход) на экране осциллографа отображаются пульсации выпрямленного напряжения?
15. Чему равно напряжение на нагрузке в схемах с емкостным фильтром при работе на холостом ходу (ток нагрузки равен нулю)?
16. Объясните, почему внешние характеристики и двух и однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром выходят из одной точки?

ЛИТЕРАТУРА

1. *Беглецов Н.Н.* Основы аналоговой электроники. Руководство по выполнению базовых экспериментов. Челябинск: «ООО ИПЦ «Учебная техника», 2018. – 175 с.

2 *Забродин Ю.С.* Промышленная электроника. Издательство: Высшая школа, 1982. – 496 с.