

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра защиты информации

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И  
ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

В 4 частях

Часть 3

**В. В. Климович, Г. Г. Машара, Н. И. Шатило**

**ВЫПРЯМИТЕЛИ**

*Рекомендовано УМО по образованию  
в области информатики и радиоэлектроники  
в качестве учебно-методического пособия  
для специальностей 1-45 01 03 «Сети телекоммуникаций»,  
1-45 01 05 «Системы распределения мультимедийной информации»,  
1-98 01 02 «Защита информации в телекоммуникациях», направлений  
специальности 1-45 01 01-02 «Инфокоммуникационные технологии  
(сети инфокоммуникаций)» и 1-45 01 01-05 «Инфокоммуникационные  
технологии (системы распределения мультимедийной информации)»*

Минск БГУИР 2015

УДК 621.314.6(076.5)  
ББК 31.264.5я73  
Ф94

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра телекоммуникационных систем учреждения образования  
«Высший государственный колледж связи» (протокол №4 от 05.12.2013);

заведующий лабораторией микроэлектроники, механики и сенсорики  
государственного научного учреждения «Институт физики  
имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»,  
доктор технических наук, профессор Н. И. Мухуров;

доцент кафедры радиотехнических устройств учреждения образования  
«Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники», кандидат технических наук, доцент В. Т. Крушев

**Функциональные** устройства и электропитание систем телекомму-  
никаций. Лабораторный практикум. В 4 ч. Ч. 3 : Выпрямители :  
Ф94 учеб.-метод. пособие / В. В. Климович, Г. Г. Машара, Н. И. Шатило. –  
Минск : БГУИР, 2015. – 70 с. : ил.  
ISBN 978-985-543-064-4 (ч. 3).

Данное издание включает описания 4 лабораторных работ по дисциплине  
«Функциональные устройства и электропитание систем телекоммуникаций», в кото-  
рых излагаются принципы работы и основные характеристики однофазных выпрями-  
телей, выпрямителей с умножением напряжения, однофазных управляемых выпрями-  
телей и многофазных выпрямителей. Каждая работа содержит краткие теоретические  
сведения по изучаемому разделу дисциплины, принципиальную схему устройства,  
подлежащего исследованию, задания на проведение экспериментальных исследований,  
а также перечень контрольных вопросов.

Часть 1-я издана в БГУИР в 2012 году.

Часть 2-я издана в БГУИР в 2014 году.

УДК 621.314.6(076.5)  
ББК 31.264.5я73

ISBN 978-985-543-064-4 (ч. 3)  
ISBN 978-985-488-700-5

© Климович В. В., Машара Г. Г., Шатило Н. И., 2015  
© УО «Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники», 2015

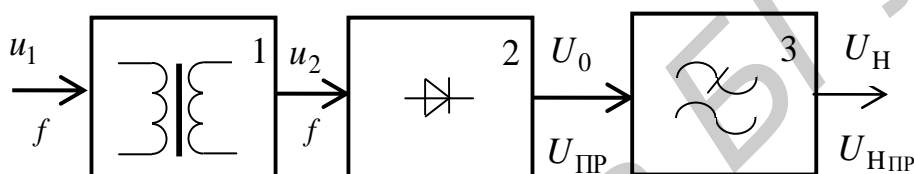
## Лабораторная работа №14

### ОДНОФАЗНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ С РАЗЛИЧНЫМИ СГЛАЖИВАЮЩИМИ ФИЛЬТРАМИ

*Цель работы* – изучить особенности работы различных выпрямителей, питающихся от однофазной сети переменного тока, и исследовать эффективность сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения с помощью распространенных на практике фильтров.

#### 14.1 Краткие теоретические сведения

Типовая структурная схема устройства преобразования переменного тока в постоянный (выпрямителя) представлена на рисунке 14.1.



1 – трансформатор; 2 – вентильное звено; 3 – сглаживающий фильтр

Рисунок 14.1 – Структурная схема выпрямителя

*Трансформатор* обеспечивает получение требуемого напряжения  $U_H$  на выходе выпрямителя при заданном действующем значении  $u_1$  напряжения сети, а также устраняет гальваническую связь цепей выпрямленного тока с питающей сетью, что обязательно при заземленной нагрузке.

*Вентильное звено* (ВЗ), состоящее из одного или нескольких определенным способом соединенных вентилей, осуществляет выпрямление переменного тока, т. е. пропускание его только в одном направлении. Пульсирующему току одного направления на выходе ВЗ соответствуют среднее значение напряжения  $U_0$  и некоторые флуктуации напряжения относительно его среднего значения. Интенсивность этих флуктуаций, называемых в технике электропитания пульсациями, может быть охарактеризована по-разному, в частности, напряжением полуразмаха пульсаций  $U_{\text{пр}}$  и т. п.

Во многих случаях интенсивность пульсаций на выходе ВЗ имеет недопустимую для нагрузки выпрямителя величину и для ее уменьшения применяют *сглаживающие фильтры* (СФ). СФ должен по возможности беспрепятственно пропускать постоянный ток и существенно подавлять пульсацию. При эффек-

тивной работе СФ для постоянного напряжения  $U_H$  и напряжения пульсаций  $U_{HPP}$  на выходе фильтра справедливы соотношения  $U_H = U_0$ ;  $U_{HPP} \ll U_H$ .

В силу периодичности переменного напряжения сети выпрямленное напряжение  $u_0(t)$  на выходе ВЗ  $m$ -фазного выпрямителя содержит периодическую пульсацию и может быть представлено в виде

$$u_0(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{0km} \cos(km\omega t), \quad (14.1)$$

где  $U_{0km}$  – амплитуда  $k$ -й гармонической составляющей в разложении пульсаций в ряд Фурье по косинусоидальным функциям:

$$U_{0km} = \frac{m}{\pi} + \int_{-\pi/m}^{\pi/m} \sum_{k=1}^{\infty} U_{0km} \cos(k \cdot m \cdot \omega t) d\omega t. \quad (14.2)$$

При  $m \geq 2$  амплитуда гармонических составляющих описывается выражением

$$U_{0km} = \frac{2U_0}{(k \cdot m)^2 - 1}, \quad (14.3)$$

где  $\omega$  – круговая (угловая) частота переменного тока питающей сети.

Содержание переменной составляющей в выпрямленном напряжении можно охарактеризовать с помощью так называемого *коэффициента пульсаций*, который для  $k$ -й ее гармоники ( $k=1,2,\dots$ ) определяется по формуле

$$K_{\Pi k} = \frac{U_{0km}}{U_0} = \frac{2}{(k \cdot m)^2 - 1}. \quad (14.4)$$

Часто для оценки качества постоянного напряжения на выходе выпрямителя используют коэффициент пульсаций  $K_{\Pi 1}$  по первой ( $k=1$ ), наиболее интенсивной, гармонике. Как следует из формулы (14.4)

$$K_{\Pi 1} = \frac{U_{0km}}{U_0} = \frac{2}{(m)^2 - 1}, \quad m \geq 2. \quad (14.5)$$

Коэффициент пульсаций может определяться с использованием различных мер ее интенсивности, в частности, полуразмаха  $U_{PP}$  пульсаций

$$K_{\Pi} = U_{PP}/U_0. \quad (14.6)$$

Эффективность подавления пульсаций удобно охарактеризовать отношением коэффициента пульсаций на входе фильтра к коэффициенту пульсаций на его выходе. При использовании для определения коэффициентов пульсаций формулы (14.6) указанное отношение, называемое *коэффициентом сглаживания*  $q$ , запишется в виде

$$q = \frac{K_{\Pi}}{K_{\text{ПН}}} = \left( \frac{U_{\text{ПР}}}{U_0} \right) / \left( \frac{U_{\text{НПР}}}{U_{\text{Н}}} \right), \quad (14.7)$$

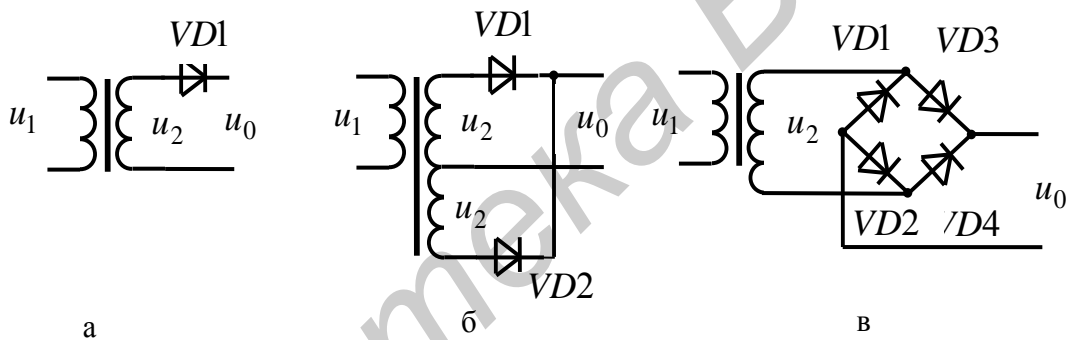
где  $K_{\text{ПН}} = U_{\text{НПР}}/U_{\text{Н}}$  – коэффициент пульсаций напряжения на выходе фильтра (на нагрузке).

Если потери постоянного напряжения в СФ невелики, т. е.  $U_{\text{Н}} \approx U_0$ , то коэффициент сглаживания можно определить по приближенной формуле:

$$q = U_{\text{ПР}}/U_{\text{НПР}}. \quad (14.8)$$

Выражение (14.8) позволяет формально трактовать коэффициент сглаживания СФ как коэффициент деления входного напряжения пульсаций  $U_{\text{ПР}}$  между фильтром и нагрузкой, на которую поступает лишь часть  $U_{\text{НПР}}$  от напряжения  $U_{\text{ПР}}$ . Пользуясь этим представлением, легко находить приближенные соотношения для анализа эффективности многих сглаживающих фильтров.

Наиболее распространенные *схемы выпрямителей*, питающихся от однофазной сети переменного тока, приведены на рисунке 14.2.

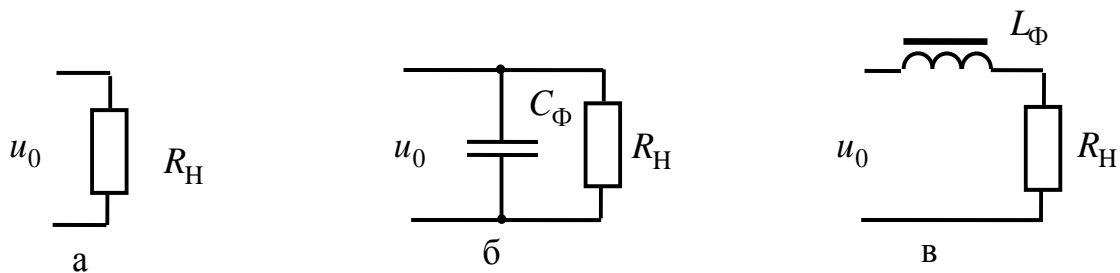


а – однополупериодная; б – двухполупериодная со средней точкой;  
в – мостовая (схема Греча)

Рисунок 14.2 – Схемы выпрямителей, питающихся от однофазной сети

На рисунке 14.3 показаны виды нагрузок, на которых эти выпрямители обычно работают на практике.

На рисунке 14.4 изображены временные диаграммы для напряжений, действующих в одно- и двухполупериодных схемах при чисто активной нагрузке.



а – активный характер нагрузки ;      б – емкостный характер нагрузки ;      в – индуктивный характер нагрузки

Рисунок 14.3 – Виды нагрузок выпрямителей однофазной сети переменного тока

Однополупериодный выпрямитель (рисунок 14.2, а) применяется в основном при работе с нагрузкой емкостного характера, в редких случаях – с чисто активной нагрузкой. Его достоинствами являются: простота, минимальное число элементов, невысокая стоимость, возможность работы без трансформатора.

К существенным недостаткам схемы относятся: высокий коэффициент пульсаций  $K_{Пл} \approx 1,57$ ; низкая частота пульсаций (первая ее гармоника имеет частоту, совпадающую с частотой питающего выпрямитель напряжения); высокое обратное напряжение на вентиле  $U_{ОБР\ m} = \pi U_0$ ; плохое использование трансформатора, т. к. его габаритная мощность более чем в три раза превышает мощность, отдаваемую в нагрузку на постоянном токе; подмагничивание сердечника трансформатора постоянным током.

Перечисленные недостатки являются причиной ограниченного применения однополупериодных выпрямителей на практике.

Двухполупериодная схема со средней точкой (рисунок 14.2, б) представляет собой два параллельно включенных однополупериодных выпрямителя, работающих поочередно через полпериода выпрямляемого напряжения. Используется в основном при нагрузке емкостного или индуктивного характера, при активной нагрузке применяется редко.

Основными преимуществами схемы по сравнению с однополупериодной являются: меньший коэффициент пульсаций  $K_{Пл} \approx 0,67$ ; повышенная частота пульсаций (первая ее гармоника имеет частоту, вдвое большую частоты питающего напряжения); возможность использования вентилях с общим катодом или анодом (при кенотронных вентилях это позволяет питать накальные цепи от одного источника, а при использовании полупроводниковых диодов – применять общий радиатор).

Основными недостатками схемы являются усложненная из-за наличия среднего отвода во вторичной обмотке конструкция трансформатора и высокое

обратное напряжение на вентилях, равное, как и в однополупериодной схеме,  $U_{\text{ОБР } m} = \pi U_0$ .

*Мостовая схема* (рисунок 14.2, в) из всех двухполупериодных схем выпрямителей, работающих от однофазной сети переменного тока, обладает наилучшими показателями. Применяется в основном при нагрузке с емкостной или индуктивной реакцией, реже – при активной нагрузке.

В сравнении с предыдущей схемой она не требует усложнения трансформатора, характеризуется лучшим его использованием, допускает работу без трансформатора, обеспечивает вдвое меньшее обратное напряжение на вентилях ( $U_{\text{ОБР } m} = \pi U_0/2$ ).

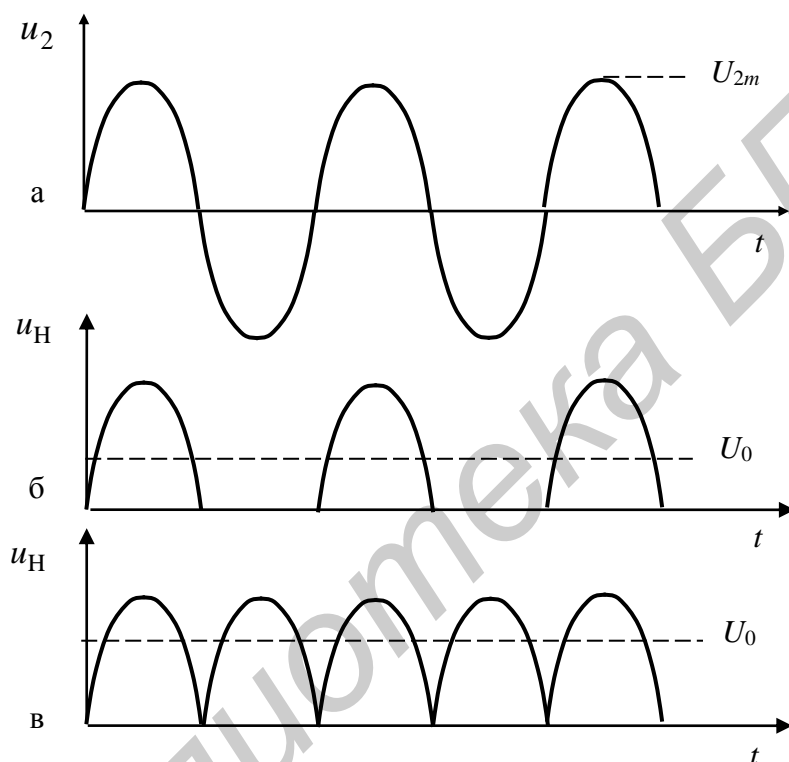
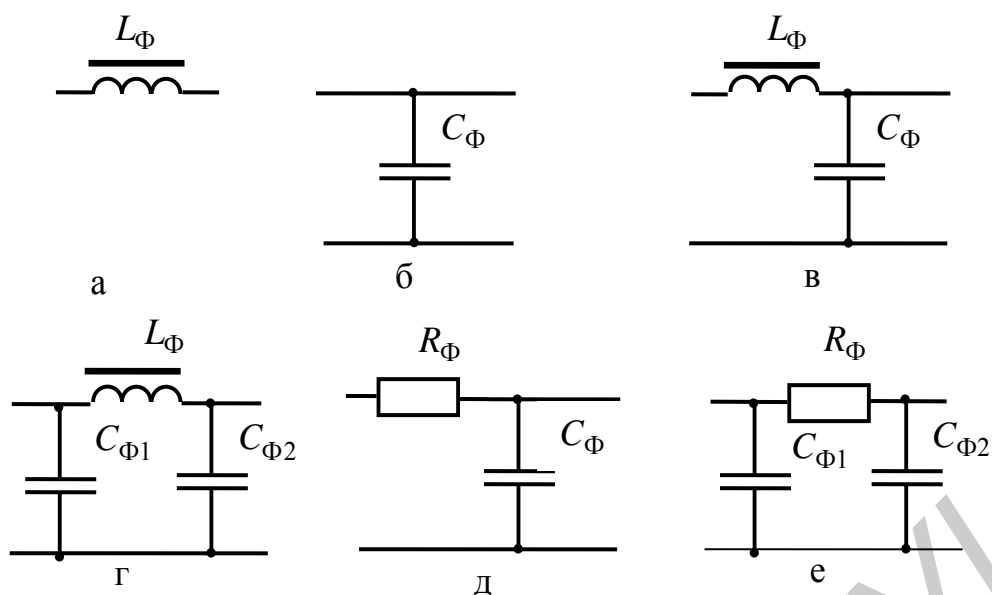


Рисунок 14.4 – Временные диаграммы напряжений  $u_H$  при активной нагрузке при однополупериодном (б) и двухполупериодном (в) выпрямлениях переменного напряжения  $u_2$  (а)

*Недостатки* схемы: большое число вентиляей, повышенное прямое падение напряжения на вентиляльном звене, невозможность питания цепей накала кенотронных вентиляей от одного источника (нужны три накальные обмотки) и недопустимость установки полупроводниковых вентиляей на одном радиаторе без изолирующих прокладок.

Основные схемы пассивных сглаживающих фильтров (СФ) приведены на рисунке 14.5.



а – простой  $L$ -фильтр; б – простой  $C$ -фильтр; в –  $\Gamma$ -образный однозвенный  $LC$ -фильтр; г –  $\Pi$ -образный однозвенный  $LC$ -фильтр; д –  $\Gamma$ -образный однозвенный  $RC$ -фильтр; е –  $\Pi$ -образный однозвенный  $RC$ -фильтр

Рисунок 14.5 – Основные схемы пассивных сглаживающих фильтров

Помимо необходимости обеспечивать заданный коэффициент сглаживания  $q$  от СФ требуют минимальных габаритов, веса и стоимости, высокого коэффициента полезного действия, отсутствия недопустимого перенапряжения на нагрузке и бросков тока в выпрямителе при включении и выключении источника питания или импульсном потреблении тока нагрузкой. Оптимизация СФ по совокупности перечисленных технико-экономических показателей является сложной и в общем случае нерешенной задачей. Поэтому при проектировании СФ пользуются двумя основными критериями – критерием минимума стоимости и критерием минимума массы и габаритов.

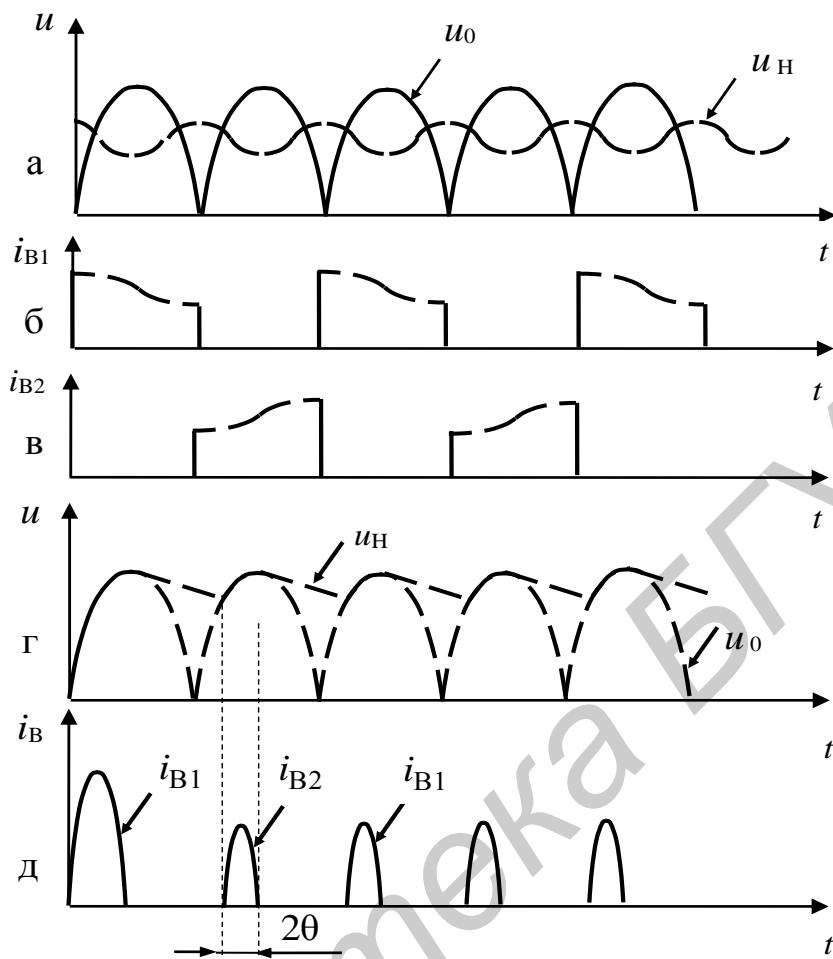
В простом  $L$ -фильтре в качестве индуктивности используют дроссель, в магнитопроводе которого для ослабления его подмагничивания постоянным током нагрузки выпрямителя обычно специально вводится немагнитный зазор.

Сглаживающее действие фильтра на частоте  $m\omega$  в соответствии с ранее сказанным можно упрощенно трактовать как деление напряжения входной пульсации между большим (по переменному току) сопротивлением  $m\omega L_{\Phi}$  дросселя и сопротивлением  $R_H$  нагрузки. Тогда коэффициент сглаживания такого фильтра примерно равен

$$q_L \approx \sqrt{(m\omega L_{\Phi})^2 + R_H^2} / R_H \approx m\omega L_{\Phi} / R_H. \quad (14.9)$$



При  $m\omega L_{\Phi} \gg R_H$  интенсивность пульсаций на нагрузке оказывается существенно меньше, чем на входе фильтра ( рисунок 14.6, а).



а, б, в – диаграммы для  $L$ -фильтра; г, д – диаграммы для  $C$ -фильтра;  $u_0$  – напряжение на входе фильтра,  $i_B$  – ток в вентилях,  $u_H$  – напряжение на нагрузке

Рисунок 14.6 – Диаграммы работы простых сглаживающих фильтров при двухполупериодном выпрямлении

Приближенность формулы (14.10) обусловлена использованием при ее выводе предположения, что  $m\omega L_{\Phi} \gg R_H$ , а также пренебрежением внутренним сопротивлением выпрямителя и активным сопротивлением дросселя.

Как видно из этой формулы, эффективность  $L$ -фильтра возрастает с увеличением числа  $m$  фаз выпрямителя и уменьшением сопротивления  $R_H$  нагрузки. Поэтому такие фильтры предпочтительно применять в многофазных выпрямителях при малых сопротивлениях и больших токах нагрузки.

*Достоинства фильтра:* простота, высокая надежность и большая проходная мощность.

*Недостатки:* большие габариты и масса (при значительных величинах требуемого коэффициента сглаживания), большая ЭДС самоиндукции при включении источника и импульсном характере нагрузки.

Сглаживающее действие простого  $C$ -фильтра (рисунок 14.5, б) обусловлено быстрым зарядом конденсатора через малое внутреннее сопротивление выпрямителя (рисунок 14.6, г) и медленным разрядом на нагрузку  $R_H$ .

Оценка эффективности этого фильтра проводится на основе анализа особенностей работы выпрямителя при нагрузке емкостного характера и дает следующее выражение коэффициента сглаживания [1]:

$$q_C = 2r_\Phi C_\Phi / (m^2 - 1)H_m, \quad (14.10)$$

где  $r_\Phi$  – внутреннее сопротивление каждой фазы выпрямителя;

$H_m$  – коэффициент, зависящий от частоты выпрямляемого напряжения и угла отсечки тока вентиля  $\theta$  (рисунок 14.6, д);

$m$  – число импульсов тока в нагрузке за период выпрямленного напряжения.

Значение параметра  $H_m$  определяется по графикам в справочниках при расчете выпрямителя на нагрузку с емкостной реакцией [3].

*Достоинства фильтра:* простота конструкции, малые габариты и масса.

Основным его *недостатком* является малая эффективность при больших токах нагрузки, т. к. для обеспечения медленного разряда конденсатора через малое сопротивление нагрузки требуется значительно увеличивать его емкость. Наиболее часто фильтр используется в однофазных выпрямителях малой мощности.

Для достижения высоких коэффициентов сглаживания с помощью простых  $L$ - и  $C$ -фильтров необходимо применять большие индуктивности и емкости, что приводит к существенному увеличению массы и габаритов выпрямителя. Выход из этого положения дает усложнение СФ.

Примером такого усложнения является однофазный  $\Gamma$ -образный  $LC$ -фильтр (рисунок 14.5, в). Пренебрегая обычно малым внутренним сопротивлением выпрямителя и активным сопротивлением дросселя и полагая, что

$$m\omega L_\Phi \gg \frac{1}{m\omega C_\Phi} \quad \text{и} \quad R_H \gg \frac{1}{m\omega C_\Phi}, \quad (14.11)$$

коэффициент сглаживания фильтра можно найти как коэффициент деления входной пульсации с помощью следующего приближенного соотношения:

$$q_{LC} = m\omega L_\Phi / \frac{1}{m\omega C_\Phi} = m^2 \omega^2 L_\Phi C_\Phi. \quad (14.12)$$

Если из равенств (14.9), (14.10) при заданном коэффициенте сглаживания непосредственно можно найти обеспечивающие его индуктивность или емкость, то из последнего соотношения определяется лишь произведение:

$$L_{\Phi} C_{\Phi} = \frac{q_{LC}}{m^2 \omega^2} . \quad (14.13)$$

Для конкретизации величин  $L$  и  $C$  требуется привлечение какого-либо дополнительного условия, например, минимального значения индуктивности дросселя  $L_{\min}$ , при котором обеспечивается непрерывность тока в дросселе:

$$L_{\min} = \frac{2 \cdot R_{\text{H}}}{(m^2 - 1) m \omega} , \quad (14.14)$$

где  $R_{\text{H}}$  – сопротивление нагрузки.

*Достоинством* фильтра является возможность получения высоких коэффициентов сглаживания при больших токах нагрузки.

*Недостатки:* повышенная сложность (в сравнении с простейшими СФ), значительные габариты и масса.

Дополнение Г-образного  $LC$ -фильтра предшествующим ему емкостным фильтром приводит к П-образному  $LC$ -фильтру (рисунок 14.5, г). Коэффициент сглаживания  $q_{\text{П}LC}$  такого фильтра равен

$$q_{\text{П}LC} = q_{\text{C}} \cdot q_{LC} . \quad (14.15)$$

Структурно подобны Г-образному и П-образному  $LC$ -фильтрам Г-образные и П-образные  $RC$ -фильтры (рисунок 14.5, д, е).

Их коэффициенты сглаживания определяются следующими приближенными соотношениями:

$$q_{RC} \approx m \omega C_{\Phi} R_{\text{Э}} , \quad (14.16)$$

$$q_{\text{П}RC} = q_{\text{C}} \cdot q_{RC} , \quad (14.17)$$

где  $R_{\text{Э}} = R_{\Phi} \cdot R_{\text{H}} / (R_{\Phi} + R_{\text{H}})$  – эквивалентное сопротивление, учитывающее влияние сопротивления нагрузки  $R_{\text{H}}$  на сглаживающее действие фильтра.

*Достоинством*  $RC$ -фильтров являются малые масса и габариты, низкая стоимость. Однако в таких фильтрах сравнительно велики потери мощности в резисторе  $R_{\Phi}$ . Поэтому величина  $R_{\Phi}$  обычно не превышает  $0,1 \dots 0,25 R_{\text{H}}$ . При этом сглаживающее действие фильтра не может быть значительным. Применяются  $RC$ -фильтры в маломощных выпрямителях при слабых токах нагрузки.

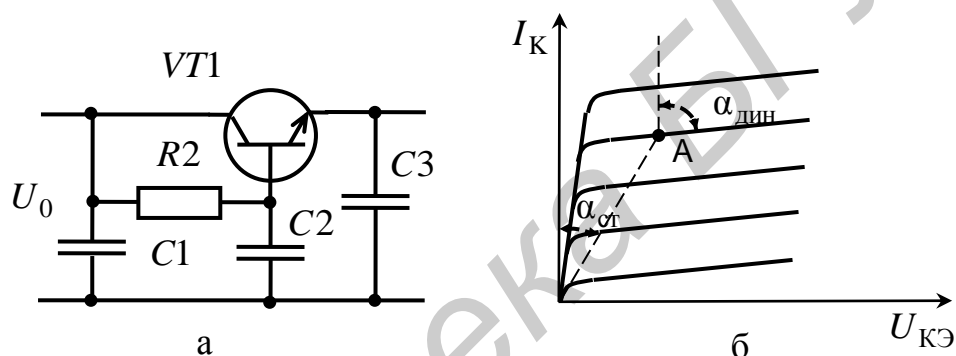
Как  $LC$ -, так и  $RC$ -фильтры могут быть многозвенными. При этом общий коэффициент сглаживания фильтра определяется произведением коэффициентов сглаживания входящих в него звеньев. Оптимизация многозвенного  $LC$ -фильтра при фиксированных суммарных индуктивности и емкости показывает, что наибольший коэффициент сглаживания достигается при одинаковых параметрах его звеньев.

Многозвенные СФ применяются при необходимости достаточно существенного подавления пульсаций.

Из пассивных фильтров наиболее широкое применение находят LC-фильтры. Однако их применение ограничивается рядом недостатков: большая длительность переходных процессов в динамических режимах, большие габариты и масса, зависимость коэффициента сглаживания от постоянного тока нагрузки. Кроме того, магнитное поле рассеяния дросселей часто является источником помех для питаемых устройств.

От перечисленных недостатков свободны активные сглаживающие фильтры, построенные с использованием электронных ламп или транзисторов.

На рисунке 14.7 в качестве примера приведена схема транзисторного активного фильтра с последовательным (по отношению к нагрузке) включением транзистора. Можно усмотреть определенную аналогию между этим фильтром и П-образным пассивным LC-фильтром, полагая, что дроссель последнего заменяется транзистором, имеющим большое сопротивление в цепи эмиттер – коллектор по переменному току и малое – по постоянному.



а – принципиальная схема активного фильтра;  
б – коллекторные характеристики биполярного транзистора  
Рисунок 14.7 – Активный сглаживающий фильтр

Различие этих сопротивлений легко уяснить после рассмотрения рабочей точки А, соответствующей режиму работы транзистора на коллекторных характеристиках (рисунок 14.7, б). Сопротивление транзистора постоянному току пропорционально  $\operatorname{tg}\alpha_{\text{ст}}$  и невелико ( $\alpha_{\text{ст}} \ll \pi/2$ ). Сопротивление же переменному току пропорционально  $\operatorname{tg}\alpha_{\text{дин}}$  и значительно, т. к.  $\alpha_{\text{дин}} \approx \pi/2$ .

Резистор  $R_2$  служит для установления нужного режима по постоянному току (задает ток в базу транзистора). Цепь  $R_2C_2$ , имеющая большую постоянную времени, поддерживает неизменными потенциал базы и ток эмиттера.

Коллекторный ток транзистора также остается примерно постоянным, поэтому пульсации напряжения на нагрузке ослабляются. Существует ряд модификаций схем активных СФ.

*Достоинствами* этих фильтров являются: малые габариты, возможность фильтрации медленных пульсаций (вплоть до стабилизации напряжения).

Недостатки активных СФ состоят в их сложности, повышенной стоимости, чувствительности к коротким замыканиям нагрузки, трудности обеспечения больших нагрузочных токов.

#### 14.2 Описание лабораторной установки

Электрическая принципиальная схема лабораторной установки приведена на рисунке 14.8.

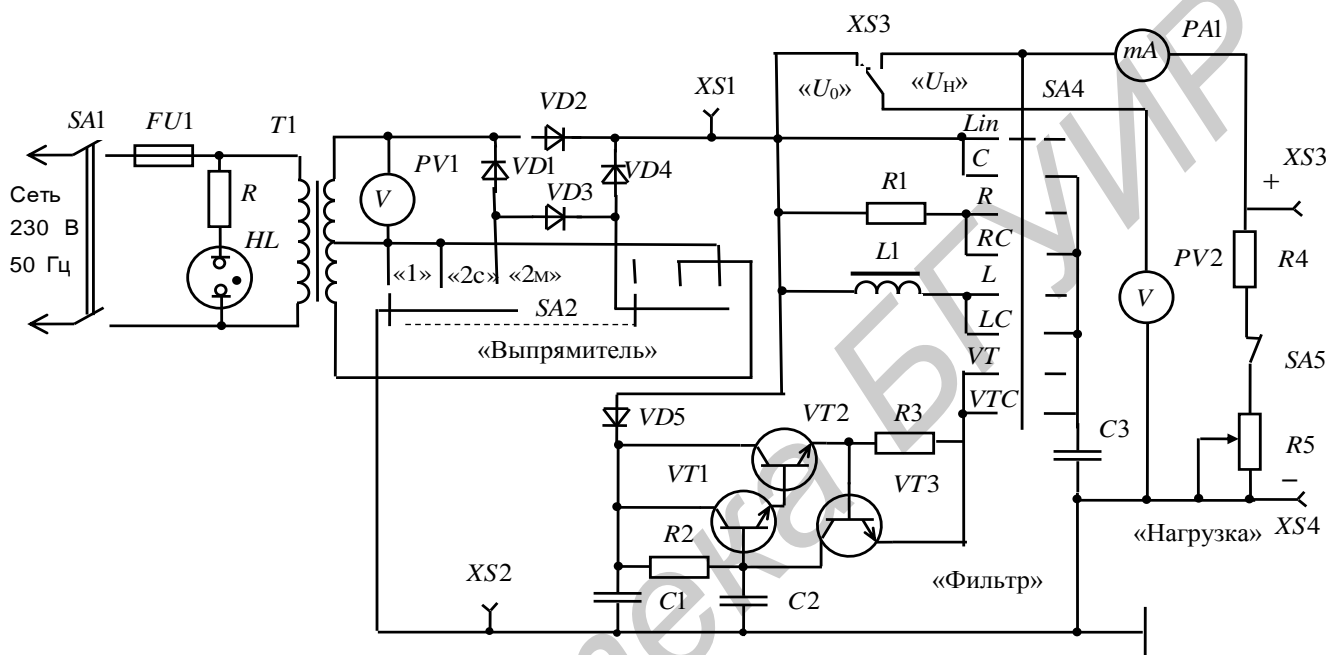


Рисунок 14.8 – Лабораторная установка для исследования однофазных схем выпрямления с различными сглаживающими фильтрами. Схема электрическая принципиальная

Напряжение сети 230 В частотой 50 Гц через тумблер SA1 «СЕТЬ» и плавкий предохранитель FU1 поступает на сетевой понижающий трансформатор T1. Наличие напряжения на лабораторной установке контролируется индикатором HL.

Вторичная обмотка сетевого трансформатора T1 состоит из двух полуобмоток со средней точкой, что позволяет исследовать различные схемы выпрямления: однополупериодная, двухполупериодная со средней точкой и двухполупериодная мостовая. Среднее квадратическое значение переменного напряжения, поступающего на схемы выпрямления, измеряется вольтметром PV1.

Схемы выпрямления переменного напряжения построены на основе двухполупериодного мостового выпрямителя, состоящего из диодов VD1...VD4. Переход от одной схемы выпрямления к другой осуществляется

переключателем SA2 «ВЫПРЯМИТЕЛЬ» путем подключения вторичной обмотки сетевого трансформатора к различным участкам мостового выпрямителя.

Положения переключателя SA2 «ВЫПРЯМИТЕЛЬ» соответствуют следующим схемам выпрямления:

- а) 1 – однополупериодная схема выпрямления;
- б) 2с – двухполупериодная схема выпрямления со средней точкой;
- в) 2м – двухполупериодная мостовая схема выпрямления.

Схемы выпрямления имеют один общий выход, к которому подсоединены входы семи сглаживающих фильтров:  $C$ ,  $R$ ,  $RC$ ,  $L$ ,  $LC$ ,  $VT$ ,  $VTC$ . В режиме «Lin» схемы выпрямления работают без сглаживающих фильтров.

Емкостный сглаживающий фильтр образован конденсатором  $C3$ , подключаемым параллельно нагрузке, а индуктивный сглаживающий фильтр – дросселем  $L1$ , соединяемым последовательно с нагрузкой.

Активный фильтр построен на транзисторах  $VT1$ ,  $VT2$ . Элементы  $VD5$ ,  $C1$ ,  $R2$  предназначены для задания рабочего режима транзисторов фильтра по постоянному току. Резистор  $R2$  и конденсатор  $C2$  образуют вспомогательный пассивный  $RC$ -фильтр. Резистор  $R3$  и транзистор  $VT3$  образуют быстродействующую электронную защиту активного фильтра от перегрузок по току.

Выходы фильтров подсоединяются переключателем SA4 «ФИЛЬТР» к нагрузке, состоящей из постоянного  $R4$  и переменного  $R5$  резисторов. Переменным резистором  $R5$  «НАГРУЗКА» осуществляется установка тока нагрузки. Включение и отключение нагрузки производится тумблером SA5.

Значение постоянного напряжения  $V_0$  на выходе схем выпрямления и постоянного напряжения  $V_H$  на нагрузке измеряется вольтметром  $PV2$  путем соответствующего подключения его тумблером SA3. Значение тока нагрузки измеряется миллиамперметром постоянного тока  $PA1$ .

Контрольные гнезда  $XS1$ - $XS2$ ,  $XS3$ - $XS4$  предназначены для визуального контроля и измерения сигналов на выходе схем выпрямления и на нагрузке посредством осциллографа.

### 14.3 Задание на исследование

1 Исследовать нагрузочные характеристики однополупериодной, двухполупериодной со средней точкой и двухполупериодной мостовой схем выпрямления с различными сглаживающими фильтрами.

2 Построить графические зависимости выходного напряжения и коэффициента пульсаций от тока нагрузки для трех схем выпрямления с различными сглаживающими фильтрами.

3 Определить коэффициенты сглаживания фильтров при различных схемах выпрямления.

4 Зарисовать осциллограммы напряжения пульсаций на нагрузке для трех схем выпрямления и различных сглаживающих фильтров, определить величину и частоту напряжения пульсаций.

#### 14.4 Подготовка к работе

Изучить описание лабораторной установки, ознакомиться на макете с органами управления и регулирования и с используемыми контрольно-измерительными приборами.

Доложить преподавателю о готовности к выполнению работы.

С разрешения преподавателя включить лабораторную установку тумблером «СЕТЬ» на лицевой панели.

Включить осциллограф.

#### 14.5 Порядок выполнения работы

14.5.1 Исследовать нагрузочную характеристику однополупериодной схемы выпрямления.

Переключатель «ВЫПРЯМИТЕЛЬ» поставить в положение «1», переключатель «ФИЛЬТР» – в положение «Lin». Тумблером SA3 подключить вольтметр PV2 к нагрузке, тумблером SA5 включить нагрузку. Резистором «НАГРУЗКА» установить минимальное значение тока нагрузки по миллиамперметру PA2. К контрольным гнездам XS3-XS4 подсоединить входные щупы осциллографа.

Резистором «НАГРУЗКА» установить 3–4 значения тока нагрузки от минимального до максимального, контролируя их миллиамперметром PA19. Нулевое значение тока достигается отключением нагрузки тумблером SA5.

При каждом фиксированном значении тока нагрузки измерить величину постоянного напряжения на нагрузке вольтметром PV2 и определить значения напряжения пульсаций с помощью осциллографа.

Значение напряжения пульсаций определяется как полуразмах изображения сигнала на экране осциллографа по формуле

$$U_{\text{НПР}} = (m/2)k, \quad (14.18)$$

где  $m$  – количество клеток по вертикали, занимаемых изображением сигнала на экране осциллографа;

$k$  – чувствительность осциллографа по оси «Y», В/дел.

Результаты измерений занести в таблицу 14.1.

Таблица 14.1 – Нагрузочная характеристика схем выпрямления

Однополупериодная схема выпрямления						
Фильтр	Параметр					Коэффициент сглаживания, $q$
$Lin$	$I_H$ , мА					
	$U_H$ , В					
	$U_{H_{\text{ПР}}}$ , В					
	$K_{\text{ПН}}$					
$C$			–//–			
$R$			–//–			
$RC$			–//–			
$L$			–//–			
$LC$			–//–			
$VT$			–//–			
$VTC$			–//–			

14.5.2 Исследовать нагрузочную характеристику однополупериодной схемы выпрямления при различных сглаживающих фильтрах.

Повторить операции и измерения по пункту 14.5.1 при положениях переключателя «ФИЛЬТР» – «C», «R», «RC», «L», «LC», «VT», «VTC».

Результаты измерений занести в соответствующие графы таблицы 14.1.

14.5.3 Определить коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке.

По данным таблицы 14.1 рассчитать коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке для различных фильтров по формуле

$$K_{\text{ПН}} = \frac{U_{\text{HПР}}}{U_H} \quad (14.19)$$

и построить графические зависимости

$$U_H = f(I_H), \quad K_{\text{ПН}} = f(I_H).$$

14.5.4 Определить коэффициент сглаживания фильтров.

На максимальном токе нагрузки для каждого фильтра рассчитать коэффициент сглаживания фильтра по формуле

$$q = \frac{U_{0\text{ПР}}}{U_0} \bigg/ \frac{U_{\text{HПР}}}{U_H}, \quad (14.20)$$

где  $U_0, U_{0\text{ПР}}$  – значения постоянного напряжения и напряжения пульсаций на выходе схемы выпрямления соответственно.



Для измерения напряжений  $U_0$  и  $U_{0\text{ГР}}$  подключить вольтметр  $PV2$  к выходу схемы выпрямления тумблером  $SA3$ . К контрольным гнездам  $XS1$ - $XS2$  подсоединить входные щупы осциллографа. Величина напряжения пульсаций на выходе схемы выпрямления определяется как полуразмах изображения сигнала на экране осциллографа по формуле (14.18).

Результаты вычислений занести в соответствующие графы таблицы 14.1.

14.5.5 Определить параметры напряжения пульсаций.

При максимальном токе для каждого фильтра зарисовать осциллограмму напряжения пульсаций на нагрузке. По осциллограмме на экране осциллографа определить величину и частоту напряжения пульсаций.

14.5.6 Исследовать нагрузочные характеристики двухполупериодной схемы выпрямления со средней точкой.

Переключатель «ВЫПРЯМИТЕЛЬ» поставить в положение «2с».

Повторить операции по пунктам 14.5.1, 14.5.2. Результаты измерений занести в таблицу, аналогичную таблице 14.1. По данным этой таблицы выполнить операции и вычисления по пунктам 14.5.3–14.5.5.

14.5.7 Исследовать нагрузочные характеристики двухполупериодной мостовой схемы выпрямления.

Переключатель «ВЫПРЯМИТЕЛЬ» поставить в положение «2м».

Провести операции и измерения по пунктам 14.5.1, 14.5.2. Результаты измерений занести в таблицу, аналогичную таблице 14.1. По данным этой таблицы выполнить операции и вычисления по пунктам 14.5.3 –14.5.5.

#### *14.6 Завершение работы*

Резистором «НАГРУЗКА» установить минимальное значение тока нагрузки.

Доложить преподавателю о завершении работы и показать результаты измерений.

С разрешения преподавателя отключить лабораторную установку тумблером «СЕТЬ» на лицевой панели.

Отсоединить от лабораторной установки входные щупы осциллографа и отключить осциллограф.

#### 14.7 Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Принципиальная схема лабораторной установки.
- 3 Таблицы с результатами измерений и расчетов.
- 4 Графики зависимостей  $U_H = f(I_H)$ ,  $K_{\text{ПН}} = f(I_H)$  для всех исследованных схем выпрямителей при чисто активной нагрузке и применении различных сглаживающих фильтров.
- 5 Зарисованные осциллограммы пульсаций выходного напряжения выпрямителей.
- 6 Краткая характеристика результатов работы и выводы по ней.

#### 14.8 Контрольные вопросы

- 1 Схемы, принцип работы и сравнительная характеристика однополупериодного, двухполупериодного со средней точкой и мостового выпрямителей, работающих от однофазной сети переменного тока.
- 2 Особенности работы выпрямителей на активную, емкостную и индуктивную нагрузки.
- 3 Нагрузочная характеристика выпрямителя, определение по ней его внутреннего сопротивления и величины ЭДС постоянного тока в схеме замещения выпрямителя.
- 4 Определение и смысл коэффициента пульсаций и коэффициента сглаживания для устройств электропитания.
- 5 Классификация сглаживающих фильтров, требования к ним.
- 6 Достоинства, недостатки и область применения простого индуктивного фильтра.
- 7 Достоинства, недостатки и область применения простого емкостного фильтра.
- 8 Принцип построения и общая характеристика  $LC$ - и  $RC$ -фильтров.
- 9 Активные сглаживающие фильтры, их принципиальные схемы, достоинства, недостатки, область применения.

## Лабораторная работа №15

### ОДНОФАЗНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ С УМНОЖЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

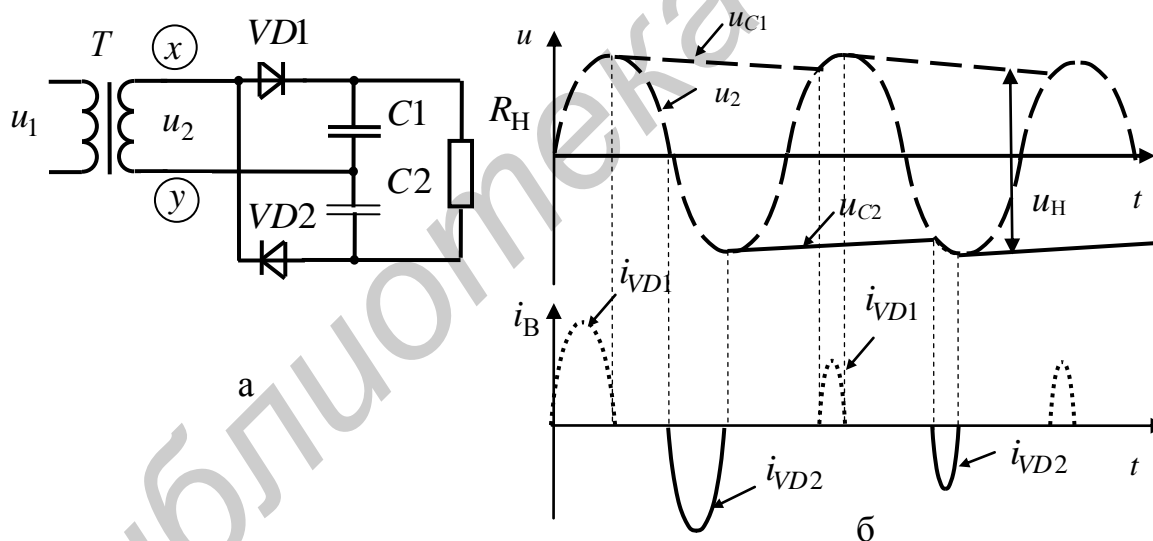
Цель работы – изучить принципы работы однофазных выпрямительных схем с умножением напряжения и экспериментально исследовать основные характеристики выпрямительных устройств с удвоением и утроением напряжения.

#### 15.1 Краткие теоретические сведения

Выпрямительные схемы с умножением напряжения применяются для питания высоковольтных маломощных потребителей постоянного напряжения, таких, как электроннолучевые трубки и фотоэлектронные умножители.

Однофазные схемы умножения бывают однополупериодными и двухполупериодными.

Принцип работы мостовой выпрямительной схемы с удвоением напряжения (схемы Латура), представленной на рисунке 15.1, заключается в следующем.



а – принципиальная схема; б – временные диаграммы работы

Рисунок 15.1 – Двухполупериодное устройство удвоения напряжения (схема Латура)

В два плеча выпрямительного моста включены вентили  $VD1$  и  $VD2$ , а в два других плеча – конденсаторы  $C1$  и  $C2$ . При положительном потенциале точки  $x$  по отношению к точке  $y$  открыт вентиль  $VD1$ , и конденсатор  $C1$  заряжается. Ток в этот полупериод переменного напряжения протекает через вторичную обмотку трансформатора, диод  $VD1$  и конденсатор  $C1$ . В следующий полупериод при противоположном направлении переменной ЭДС (при положи-

тельном потенциале точки  $y$  по отношению к точке  $x$ ) заряжается конденсатор  $C2$ . Ток заряда конденсатора  $C2$  протекает через вторичную обмотку, конденсатор  $C2$ , диод  $VD2$ . Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  по отношению к сопротивлению нагрузки  $R_H$  соединены последовательно. Поэтому напряжение на нагрузке  $u_0$  в каждый момент времени  $t$  равно сумме напряжений  $u_{C1}$  и  $u_{C2}$  на этих конденсаторах.

Разряд конденсаторов происходит в основном через сопротивление нагрузки. Небольшая часть тока разряда протекает по цепям утечки и через обратные сопротивления вентилях. Так как напряжения на конденсаторах  $u_{C1}$  и  $u_{C2}$  сдвинуты по фазе на половину периода, то суммарное напряжение  $u_0$  изменяется с удвоенной частотой, т. е. в этой схеме частота  $f_{\Pi}$  первой гармоники выпрямленного напряжения равна удвоенной частоте  $f_C$  сети ( $f_{\Pi} = 2f_C$ ). Флуктуации напряжения на выходе выпрямителя характеризуются коэффициентом пульсаций:

$$K_{\Pi} = U_{\text{ПЕР}} / U_0,$$

где  $U_{\text{ПЕР}}$  – некоторая мера переменной составляющей выпрямленного напряжения;

$U_0$  – постоянная составляющая выпрямленного напряжения.

В качестве меры переменной составляющей напряжения на выходе выпрямителя могут служить действующее значение пульсаций, амплитуда первой наиболее интенсивной гармоники пульсаций, напряжение полуразмаха пульсаций, т. е. половина разности между максимумом и минимумом напряжения пульсаций.

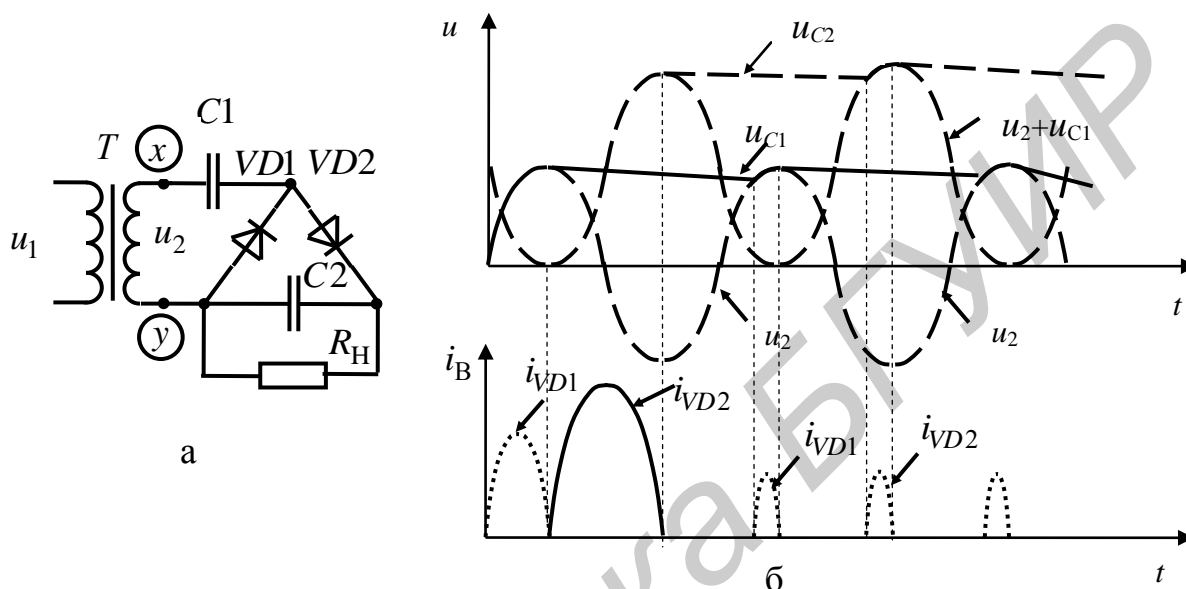
При оценке коэффициента пульсаций в данной работе в качестве  $U_{\text{ПР}}$  используется напряжение полуразмаха пульсаций  $U_{\text{ПР}}$ .

Величина коэффициента пульсаций при постоянной нагрузке обратно пропорциональна величине емкости конденсаторов. Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  должны иметь достаточно большую емкость, чтобы в интервалах между их подзарядками напряжение на выходе выпрямителя уменьшилось незначительно.

Однополупериодная схема удвоения напряжения (рисунок 15.2) работает следующим образом. В первый полупериод напряжения  $u_2$  потенциал в точке  $y$  превышает потенциал в точке  $x$ , клапан  $VD1$  открыт и конденсатор  $C1$  заряжается как в схемах с емкостной реакцией нагрузки, т. е. с отсечкой тока вентиля. В следующий полупериод полярность напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $T$  изменяется на противоположную, напряжения  $u_2$  и  $u_{C1}$  суммируются и заряжают конденсатор  $C2$ . На сопротивлении нагрузки возникает пульсирующее напряжение, как показано на рисунке 15.2, б. Описание процес-

са упрощено тем, что зарядка и разрядка конденсаторов рассматриваются раздельно. На самом деле, в некоторой части периода наряду с зарядным током через вентиль  $VD1$  протекает также ток нагрузки.

Здесь, как и ранее, для упрощения рассуждений сделано допущение, что ток нагрузки намного меньше зарядного тока. Описанный процесс повторяется каждый период.



а – принципиальная схема; б – временные диаграммы работы

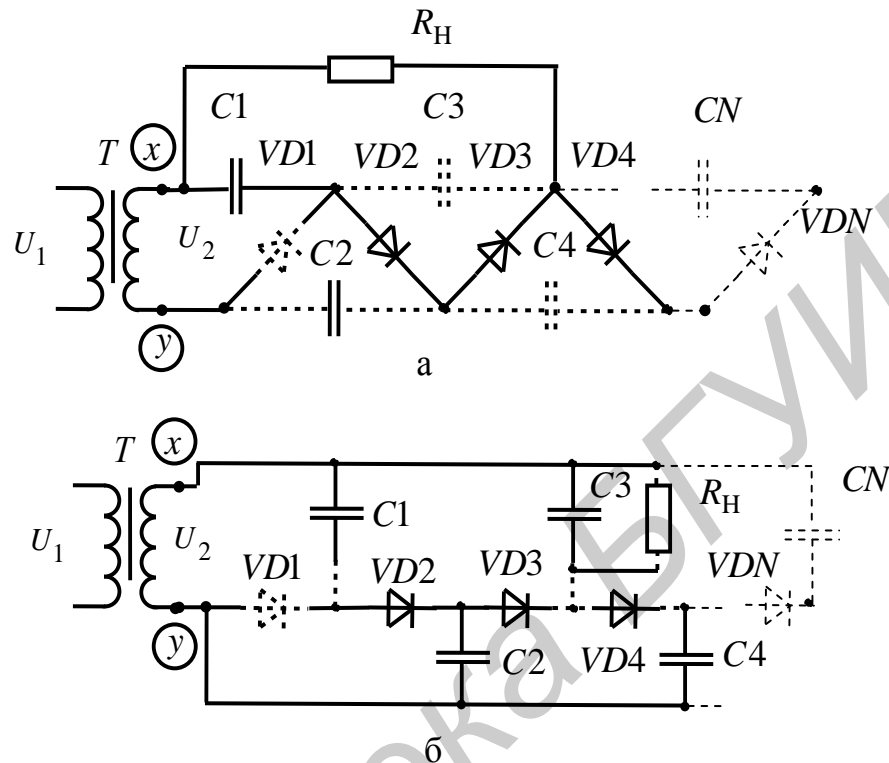
Рисунок 15.2 – Однополупериодное устройство удвоения напряжения

Однофазные схемы выпрямителя с многократным умножением напряжения приведены на рисунке 15.3.

В схеме первого типа, представленной на рисунке 15.3, а, в первый полупериод конденсатор  $C1$  заряжается через вентиль  $VD1$  до напряжения  $U_{C1} \approx U_{2m}$ , где  $U_{2m}$  – амплитуда напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $U_2$ . В следующий полупериод конденсатор  $C2$  заряжается суммарным напряжением  $U_{2m} + U_{C1}$  и напряжение на нем достигает значения  $U_{C2} \approx U_{2m} + U_{C1} \approx 2U_{2m}$ . В третий полупериод происходит повторная зарядка конденсатора  $C1$  через вентиль  $VD1$ , а конденсатор  $C2$  разрядится через вентиль  $VD3$  на конденсатор  $C3$ , зарядив его до напряжения  $U_{C3} \approx U_{C2} \approx 2U_{2m}$ . В последующий полупериод конденсатор  $C2$  заряжается через вентиль  $VD2$ , а конденсатор  $C2$  через вентиль  $VD4$  заряжает конденсатор  $C4$  до напряжения  $U_{C4} \approx U_{C3} \approx 2U_{2m}$ . Далее процесс повторяется.

В установившемся режиме напряжение на конденсаторе  $C1$  равно  $U_{C1} \approx U_{2m}$ , а на конденсаторах  $C2, C3 \dots CN - U_C \approx 2U_{2m}$ . Выходное напряже-

ние зависит от места подключения нагрузки. Для случая, представленного на рисунке 15.3, а, напряжение на нагрузке будет равно  $U_H = U_{C1} + U_{C3} \approx 3U_{2m}$ . Для умножения напряжения в четыре раза нагрузку следует подключить к последовательно включенным конденсаторам  $C2$  и  $C4$ .



а – схема первого типа; б – схема второго типа

Рисунок 15.3 – Схемы выпрямителей с многократным умножением напряжения

В схеме второго типа, представленной на рисунке 15.3, б, процессы зарядки конденсаторов происходят аналогично описанным выше.

В первый полупериод заряжается конденсатор  $C1$  через вентиль  $VD1$ , во второй – конденсатор  $C2$  суммарным напряжением  $U_{2m} + U_{C1}$ , в третий – конденсатор  $C1$  заряжается через вентиль  $VD1$  и конденсатор  $C3$  через вентиль  $VD3$  суммарным напряжением  $U_{2m} + U_{C2}$  и т. д.

В данной схеме напряжение на каждом последующем конденсаторе на  $U_{2m}$  больше, чем на предыдущем, поэтому каждый последующий конденсатор должен быть рассчитан на более высокое рабочее напряжение, что является недостатком схемы.

Нагрузка подключается параллельно конденсатору и напряжение на ней равно  $U_H \approx nU_{2m}$ , где  $n$  – порядковый номер конденсатора.

В общем случае для умножения в  $K$  раз требуется  $K$  вентиляй и конденсаторов. При этом напряжение на нагрузке достигает номинального значения спустя  $K$  периодов выпрямленного тока. В установившемся режиме в течение одного полупериода заряжаются конденсаторы с нечетными номерами, а в течение другого – с четными. Пульсация выпрямленного напряжения происходит с частотой  $f_H = f_C$ , а величина пульсаций определяется емкостью конденсаторов и сопротивлением нагрузки  $R_H$ .

### 15.2 Описание лабораторной установки

Электрическая принципиальная схема лабораторной установки приведена на рисунке 15.4.

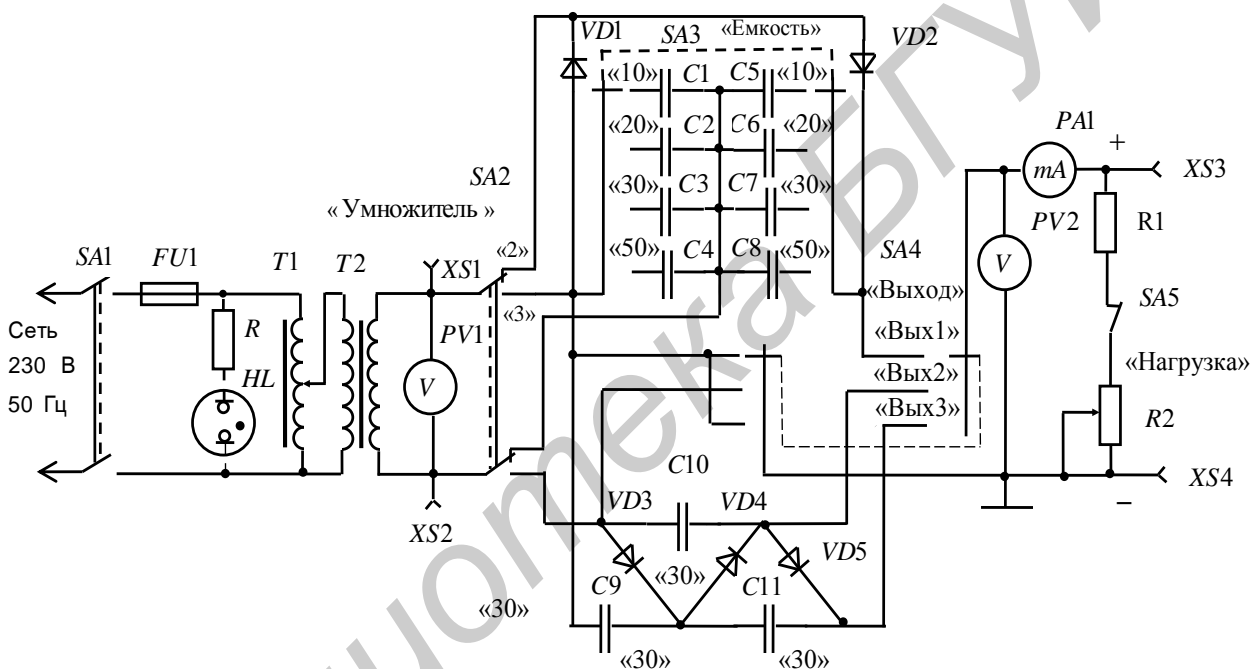


Рисунок 15.4 – Лабораторная установка для исследования выпрямителей с умножением напряжения. Схема электрическая принципиальная

Напряжение сети 230 В частотой 50 Гц через переключатель SA1 «Сеть» и плавкий предохранитель FU1 поступает на вход лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) T1, выход которого подключен к сетевому понижающему трансформатору T2. Наличие напряжения на лабораторной установке контролируется индикатором HL.

Устройства умножения подключаются к вторичной обмотке сетевого трансформатора T2 с помощью переключателя SA2 «УМНОЖИТЕЛЬ». Среднее квадратическое (эффективное) значение переменного напряжения на входах устройств умножения измеряется вольтметром PV1.

Устройство удвоения напряжения построено на основе двухполупериодной мостовой схемы выпрямления (схема Латура) и состоит из диодов  $VD1$ ,  $VD2$  и конденсаторов  $C1...C8$  различной емкости. Переключателем  $SA3$  «ЕМКОСТЬ» в плечи моста попарно включаются конденсаторы одинаковой емкости, образуя четыре однотипные схемы с различными электрическими параметрами. Устройство удвоения напряжения имеет один выход «Вых1».

Устройство утроения напряжения построено на основе однополупериодной последовательной схемы выпрямления и состоит из диодов  $VD3...VD5$  и конденсаторов  $C9...C11$ . Это устройство имеет два выхода «Вых2» и «Вых3» с коэффициентом умножения 2 и 3 соответственно.

Выходы устройств умножения переключателем  $SA4$  «ВЫХОД» подсоединяются к нагрузке, состоящей из постоянного  $R1$  и переменного  $R2$  резисторов. Переменным резистором  $R2$  «НАГРУЗКА» осуществляется установка тока нагрузки. Включение и отключение нагрузки производится тумблером  $SA5$ .

Значение выходного напряжения устройств умножения измеряется вольтметром постоянного тока  $PV2$ , а значение тока нагрузки – миллиамперметром постоянного тока  $PA1$ .

Контрольные гнезда  $XS1$ - $XS2$ ,  $XS3$ - $XS4$  предназначены для визуального контроля и измерения сигналов на входе и выходе устройств умножения напряжения посредством осциллографа.

### 15.3 Задание на исследование

1 Исследовать передаточную характеристику устройства удвоения напряжения (схема Латура) при различных значениях емкостей конденсаторов в двух режимах работы: холостой ход и нагрузка.

2 Исследовать нагрузочную характеристику устройства удвоения напряжения (схема Латура) при различных значениях емкостей конденсаторов.

3 Исследовать передаточную характеристику устройства утроения напряжения на различных выходах в двух режимах работы: холостой ход и нагрузка.

4 Исследовать нагрузочную характеристику устройства утроения напряжения на двух выходах.

5 Построить графические зависимости  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  устройств умножения напряжения.

6 Построить графические зависимости выходного напряжения и коэффициента пульсаций устройств умножения от тока нагрузки.

7 Определить выходное сопротивление устройств умножения напряжения.



8 Для устройства удвоения напряжения построить графические зависимости выходного сопротивления и коэффициента пульсаций от величины емкости конденсаторов.

9 Зарисовать осциллограммы напряжения пульсаций устройств умножения и определить величину и частоту напряжения пульсаций.

#### *15.4 Подготовка к работе*

Изучить описание лабораторной установки, ознакомиться на макете с органами управления и регулирования и с используемыми контрольно-измерительными приборами.

Установить минимальное выходное напряжение ЛАТРа, повернув регулятор против часовой стрелки до упора .

Доложить преподавателю о готовности выполнения работы.

С разрешения преподавателя включить лабораторную установку тумблером «СЕТЬ» на лицевой панели.

Включить осциллограф.

#### *15.5 Порядок выполнения работы*

15.5.1 Исследовать передаточную характеристику устройства удвоения напряжения (схема Латура).

Тумблер SA2 «УМНОЖИТЕЛЬ» поставить в положение «2», переключатель SA3 «ЕМКОСТЬ» – в положение «10», переключатель SA4 «ВЫХОД» – в положение «Вых1». Резистором R2 «НАГРУЗКА» установить максимальное значение тока нагрузки, повернув его ручку по часовой стрелке до упора.

Регулятором ЛАТРа изменять входное напряжение в диапазоне 0...35 В с шагом 5 В, контролируя его вольтметром PV1. При каждом фиксированном значении входного напряжения измерить выходное напряжение устройства умножения вольтметром PV2. Измерения выходного напряжения проводить в двух режимах работы умножителя: холостой ход и нагрузка, переключая соответственно тумблер SA5.

Результаты измерений занести в таблицу 15.1.

Повторить указанные выше операции и измерения при положениях переключателя «ЕМКОСТЬ» – «20», «30», «50».

Результаты измерений занести в соответствующие графы таблицы 15.1.

15.5.2 Исследовать нагрузочную характеристику устройства удвоения напряжения (схема Латура).

Положение тумблера SA2 «УМНОЖИТЕЛЬ», переключателей SA3 «ЕМКОСТЬ» и SA4 «ВЫХОД» установить согласно пункту 15.5.1.

Таблица 15.1 – Передаточная характеристика устройства удвоения напряжения (схема Латура)

Емкость, мкФ	Параметр	Значения параметров			
10	$U_{ВХ}, В$				
	$U_{ХХ}, В$				
	$U_{Н}, В$				
20	$U_{ХХ}, В$				
	$U_{Н}, В$				
30	$U_{ХХ}, В$				
	$U_{Н}, В$				
50	$U_{ХХ}, В$				
	$U_{Н}, В$				

Регулятором ЛАТРа установить максимальное значение входного напряжения по вольтметру  $PV1$ . Тумблером  $SA5$  включить нагрузку, резистором  $R2$  «НАГРУЗКА» установить минимальное значение тока нагрузки по миллиамперметру  $PA1$ . К контрольным гнездам  $XS3$ - $XS4$  подсоединить входные щупы осциллографа.

Резистором  $R2$  «НАГРУЗКА» последовательно установить 3...5 значений тока нагрузки от нуля до максимального значения, контролируя его миллиамперметром  $PA1$ . Нулевое значение тока достигается отключением нагрузки тумблером  $SA5$ .

При каждом фиксированном значении тока нагрузки измерить величину постоянного напряжения на нагрузке  $U_H$  вольтметром  $PV2$  и определить значение напряжения пульсаций с помощью осциллографа.

Значение напряжения пульсаций  $U_{НПР}$  определяется как полуразмах изображения сигнала на экране осциллографа по формуле

$$U_{НПР} = (m/2) \cdot k, \quad (15.1)$$

где  $m$  – количество клеток по вертикали, занимаемых изображением сигнала на экране осциллографа;

$k$  – чувствительность осциллографа по оси «Y», В/дел.

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 15.2.

Таблица 15.2 – Нагрузочная характеристика устройства удвоения напряжения (схема Латура)

Емкость, мкФ	Параметр	Значения параметров				$R_{\text{ВЫХ}}$ , Ом
10	$I_{\text{Н}}$ , мА					
	$U_{\text{Н}}$ , В					
	$U_{\text{НПР}}$ , В					
	$K_{\text{П}}$					
20	$I_{\text{Н}}$ , мА					
	$U_{\text{Н}}$ , В					
	$U_{\text{НПР}}$ , В					
	$K_{\text{П}}$					
30	$I_{\text{Н}}$ , мА					
	$U_{\text{Н}}$ , В					
	$U_{\text{НПР}}$ , В					
	$K_{\text{П}}$					
50	$I_{\text{Н}}$ , мА					
	$U_{\text{Н}}$ , В					
	$U_{\text{НПР}}$ , В					
	$K_{\text{П}}$					

Повторить операции и измерения при положениях переключателя SA3 «ЕМКОСТЬ» «20», «30», «50».

Результаты измерений занести в соответствующие графы таблицы 15.2.

15.5.3 Исследовать передаточную характеристику устройства утроения напряжения.

Тумблер SA2 «УМНОЖИТЕЛЬ» поставить в положение «3», переключатель SA4 «ВЫХОД» – в положение «Вых2», резистор R2 «НАГРУЗКА» – на максимальное значение тока нагрузки.

Провести измерения по методике, описанной в пункте 15.5.1.

Результаты измерений занести в графу «Вых2» таблицы 15.3.

Установить переключатель SA4 «ВЫХОД» в положение «Вых3».

Повторить предыдущие измерения.

Результаты измерений занести в графу «Вых3» таблицы 15.3.

По данным таблиц 15.1, 15.3 построить графические зависимости  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ .

Таблица 15.3 – Передаточная характеристика устройства утроения напряжения

Емкость, мкФ	Выход	Параметр	Значения параметров			
		$U_{ВХ}, В$				
30	«Вых2»	$U_{ХХ}, В$				
		$U_{Н}, В$				
	«Вых3»	$U_{ХХ}, В$				
		$U_{Н}, В$				

15.5.4 Исследовать нагрузочную характеристику устройства утроения напряжения.

Тумблер SA2 «УМНОЖИТЕЛЬ» поставить в положение «3», переключатель SA4 «ВЫХОД» – в положение «Вых2».

Тумблером SA5 включить нагрузку.

Регулятором ЛАТРа установить максимальное значение входного напряжения по вольтметру PV1, резистором R2 «НАГРУЗКА» установить минимальное значение тока нагрузки по миллиамперметру PA1. К контрольным гнездам XS3-XS4 подсоединить входные щупы осциллографа.

Провести измерения по методике, описанной в пункте 15.5.2.

Результаты измерений занести в графу «Вых2» таблицы 15.4.

Установить переключатель «ВЫХОД» в положение «Вых3».

Повторить предыдущие измерения. Результаты измерений занести в графу «Вых3» таблицы 15.3.

Таблица 15.4 – Нагрузочные характеристики устройства утроения напряжения

Емкость, мкФ	Выход	Параметр	Значения параметров				$R_{ВЫХ}, Ом$
30	«Вых2»	$I_{Н}, мА$					
		$U_{Н}, В$					
		$U_{НПР}, В$					
		$K_{П}$					
	«Вых3»	$I_{Н}, мА$					
		$U_{Н}, В$					
		$U_{НПР}, В$					
		$K_{П}$					

15.5.5 Определить параметры устройств умножения напряжения.

По данным таблиц 15.2, 15.4 рассчитать коэффициент пульсаций устройств умножения напряжения по формуле

$$K_{\Pi} = \frac{U_{\text{НПР}}}{U_{\text{Н}}} \quad (15.2)$$

и построить графические зависимости  $U_{\text{Н}} = f(I_{\text{Н}})$ ,  $K_{\Pi} = f(I_{\text{Н}})$ .

Сравнительные графики зависимости коэффициента пульсаций от тока нагрузки устройств умножения построить для емкости 30 мкФ.

По нагрузочным характеристикам на линейном участке рассчитать внутреннее выходное сопротивление  $R_{\text{ВЫХ}}$  устройств умножения напряжения по формуле

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{\text{Н}}}{\Delta I_{\text{Н}}}, \quad (15.3)$$

где  $\Delta U_{\text{Н}}$ ,  $\Delta I_{\text{Н}}$  – разность между соседними измеренными значениями напряжения на нагрузке и тока нагрузки соответственно.

Рассчитанные значения выходного сопротивления устройств умножения напряжения занести в соответствующие графы таблиц 15.2 и 15.4.

По данным таблицы 15.2 на максимальном токе нагрузки для устройства удвоения напряжения построить графические зависимости

$$R_{\text{ВЫХ}} = f(C); \quad K_{\Pi\text{Н}} = f(C).$$

Зарисовать осциллограммы напряжения пульсаций устройств умножения для емкости 30 мкФ при максимальном входном напряжении и максимальном токе нагрузки. По осциллограммам на экране осциллографа определить величину и частоту напряжения пульсаций.

### 15.6 Завершение работы

Резистором «НАГРУЗКА» установить минимальное значение тока нагрузки.

Установить минимальное выходное напряжение ЛАТРа, повернув регулятор против часовой стрелки до упора.

Доложить преподавателю о завершении работы и показать результаты измерений.

С разрешения преподавателя отключить лабораторную установку тумблером «СЕТЬ» на лицевой панели.

Отсоединить от лабораторной установки входные щупы осциллографа и отключить осциллограф.

### 15.7 Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Принципиальная схема лабораторной установки.
- 3 Таблицы с результатами измерений и расчетов.
- 4 Графики зависимостей  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  для всех исследованных схем выпрямителей с умножением напряжения.
- 5 Графики зависимостей  $U_{\text{Н}} = f(I_{\text{Н}})$ ,  $K_{\text{ПН}} = f(I_{\text{Н}})$  для исследованных схем выпрямителей с умножением напряжения с емкостью 30 мкФ.
- 6 Графики зависимостей  $R_{\text{ВЫХ}} = f(C)$ ,  $K_{\text{ПН}} = f(C)$  для устройства с удвоением напряжения.
- 7 Зарисованные осциллограммы пульсаций выходного напряжения умножителей.
- 8 Краткая характеристика результатов работы и выводы по ней.

### 15.8 Контрольные вопросы

- 1 Поясните принцип работы выпрямительной схемы с удвоением напряжения (схемы Латура).
- 2 Каково соотношение между напряжением  $u_2$  и обратным напряжением на вентиле в схеме Латура?
- 3 Для чего применяются выпрямительные схемы с умножением напряжения?
- 4 Поясните принцип работы каскадной выпрямительной схемы с утроением напряжения.
- 5 Каково соотношение между напряжением  $u_2$  и обратными напряжениями на вентилях в схеме с утроением напряжения?
- 6 Как зависит величина выходного напряжения в выпрямительных устройствах с умножением напряжения от емкости конденсаторов?
- 7 Каково соотношение между частотой питающей сети и частотой пульсаций в выпрямительных схемах с умножением напряжения?

## Лабораторная работа №16 ОДНОФАЗНЫЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

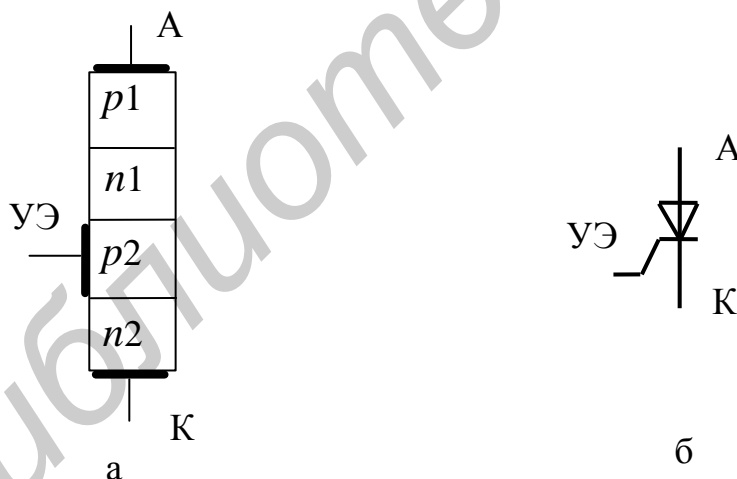
Цель работы – исследовать принципы работы и характеристики тиристорного управляемого выпрямителя.

### 16.1 Краткие теоретические сведения

Управляемым называется такой выпрямитель, в котором выходное напряжение  $U_0$  может регулироваться при неизменном напряжении  $u_2$  на вторичной обмотке силового трансформатора.

Основным элементом управляемого выпрямителя является управляемый вентиль, который может представлять собой ионный или электронный прибор. В настоящее время в качестве управляемых вентиляей наиболее часто применяются тиристоры.

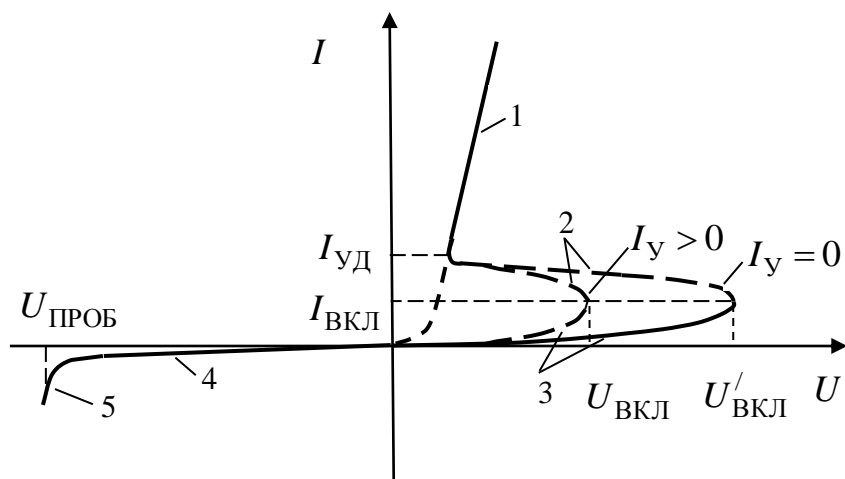
Тиристор – это четырехслойный полупроводниковый прибор, структура которого представлена на рисунке 16.1, а. Особенность его работы заключается в том, что при положительном напряжении на аноде (А) по отношению к катоду (К) он начинает проводить ток при подаче на управляющий электрод (УЭ) положительного потенциала или импульса относительно катода.



а – структура ; б – условное графическое изображение

Рисунок 16.1 – Тиристор

Статические вольт-амперные характеристики (ВАХ) тиристора приведены на рисунке 16.2.



1 – открытое состояние; 2 – участок отрицательного дифференциального сопротивления; 3 – закрытое состояние; 4 – непроводящее состояние в обратном направлении; 5 – область пробоя в обратном направлении

Рисунок 16.2 – Статические вольт-амперные характеристики тиристора

При открытом состоянии тиристора прямой ток через него ограничивается сопротивлением нагрузки. Закрывается тиристор при уменьшении тока до значения, меньшего так называемого тока удержания  $I_{уд}$ .

Напряжение включения тиристора  $U_{вкл}$  зависит от тока управления  $I_y$  в управляющем электроде: чем больше ток управления, тем меньше напряжение включения. При номинальном токе управления напряжение включения составляет единицы вольт.

Тиристор можно привести в открытое состояние, не воздействуя на управляющий электрод (при  $I_y = 0$ ). Для этого нужно увеличить приложенное к нему прямое напряжение до критического значения  $U'_{вкл}$ .

Тиристор может также перейти в открытое состояние и при меньшем значении напряжения, чем  $U'_{вкл}$ , если скорость нарастания входного напряжения достаточно высока. Однако такое включение тиристора нежелательно. Тиристоры нормально работают при входном синусоидальном напряжении, скорость нарастания которого составляет несколько сотен вольт в миллисекунду.

К основным статическим параметрам тиристоров относятся:

- $U_{вкл}$  – напряжение включения, соответствующее точке перегиба ВАХ;
- $I_{вкл}$  – ток включения, т. е. минимальная величина анодного тока, необходимого для перехода тиристора в открытое состояние и сохранения этого состояния после снятия управляющего сигнала;



–  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальное напряжение, за которое принимается максимальное напряжение, когда тиристор может длительно работать в закрытом состоянии. Обычно  $U_{\text{НОМ}} = (0,6 \dots 0,7 U_{\text{ВКЛ}})$ ;

–  $I_{\text{УД}}$  – ток удержания, т. е. минимальный анодный ток, который необходим для поддержания тиристора в открытом состоянии (при меньшем значении тока тиристор переходит в запертое состояние);

–  $U_{\text{ОБР НОМ}}$  – номинальное обратное напряжение, которым считают максимальное обратное напряжение, когда тиристор может длительное время работать без разрушения;

–  $U'_{\text{ВКЛ}}$  – прямое напряжение включения, являющееся критическим напряжением, при котором тиристор, имеющий предельную температуру корпуса, переходит в открытое состояние при отсутствии тока управляющего электрода.

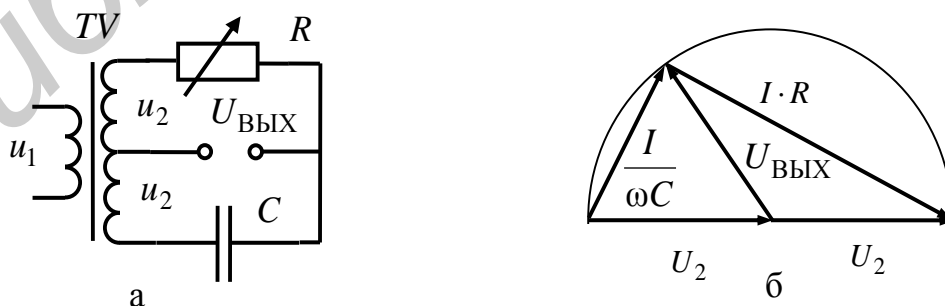
К временным параметрам относятся время включения ( $0,1 \dots 5$  мкс) и время восстановления закрытого состояния тиристора ( $1 \dots 20$  мкс).

Простейшая схема управляемого выпрямителя на тиристорах включает в себя силовой трансформатор с выходным напряжением  $u_2$ , управляемый вентиль, источник управляющего напряжения и сглаживающий фильтр.

Изменять выходное напряжение в тиристорных управляемых выпрямителях можно следующими способами.

1 В зависимости от величины сигнала постоянного тока изменяется угол включения вентиля и меняется среднее значение выпрямленного тока и напряжения на нагрузке. Такой способ управления называется амплитудным.

2 На управляющий электрод подается переменное напряжение с углом запаздывания  $\alpha$  по отношению к напряжению на аноде тиристора. В маломощных выпрямителях для этой цели применяются емкостные и индуктивные фазовращатели. Пример принципиальной схемы емкостного фазовращателя и векторная диаграмма, поясняющая его работу, представлены на рисунке 16.3.

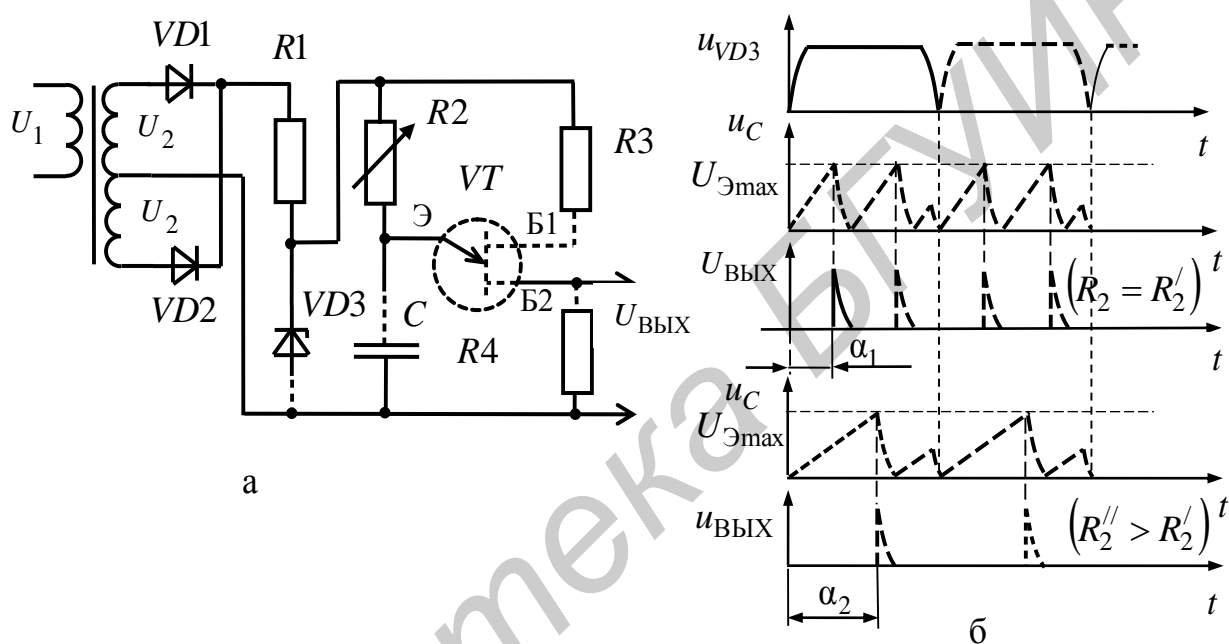


а – принципиальная схема; б – векторная диаграмма

Рисунок 16.3 – Емкостный фазовращатель

Сдвиг фазы выходного напряжения относительно напряжения на вторичной обмотке трансформатора достигается изменением сопротивления  $R$ .

3 При импульсном управлении на управляющий электрод подаются импульсы с крутым передним фронтом, сдвинутые по времени относительно напряжения на аноде тиристора. В этом случае исключается неоднозначность установки угла регулирования, которая может иметь место при синусоидальных управляющих сигналах. Пример схемы формирователя импульсов управления и временные диаграммы, поясняющие ее работу, представлены на рисунке 16.4.



а – принципиальная схема ; б – временные диаграммы

Рисунок 16.4 – Формирователь импульсов управления

Схема формирователя импульсов управления представляет собой релаксационный генератор, исполненный на однопереходном транзисторе, который имеет три вывода: эмиттер (Э), базу 1 (Б1) и базу 2 (Б2). Участок между базами имеет характер линейного омического сопротивления. При напряжении на эмиттере, меньшем некоторой максимальной величины  $U_{Э\max}$ , переход эмиттер – база 1 смещен в обратном направлении и транзистор  $VT$  закрыт.

При появлении напряжения на стабилитроне  $VD3$ , которое одновременно играет роль питающего и синхронизирующего напряжения, конденсатор  $C$  начинает заряжаться через резистор  $R2$ . Как только напряжение на эмиттере достигнет  $U_{Э\max}$ , транзистор  $VT$  открывается и конденсатор  $C$  разряжается на сопротивление  $R4$ , с которого снимаются импульсы управления. Когда ток эмит-

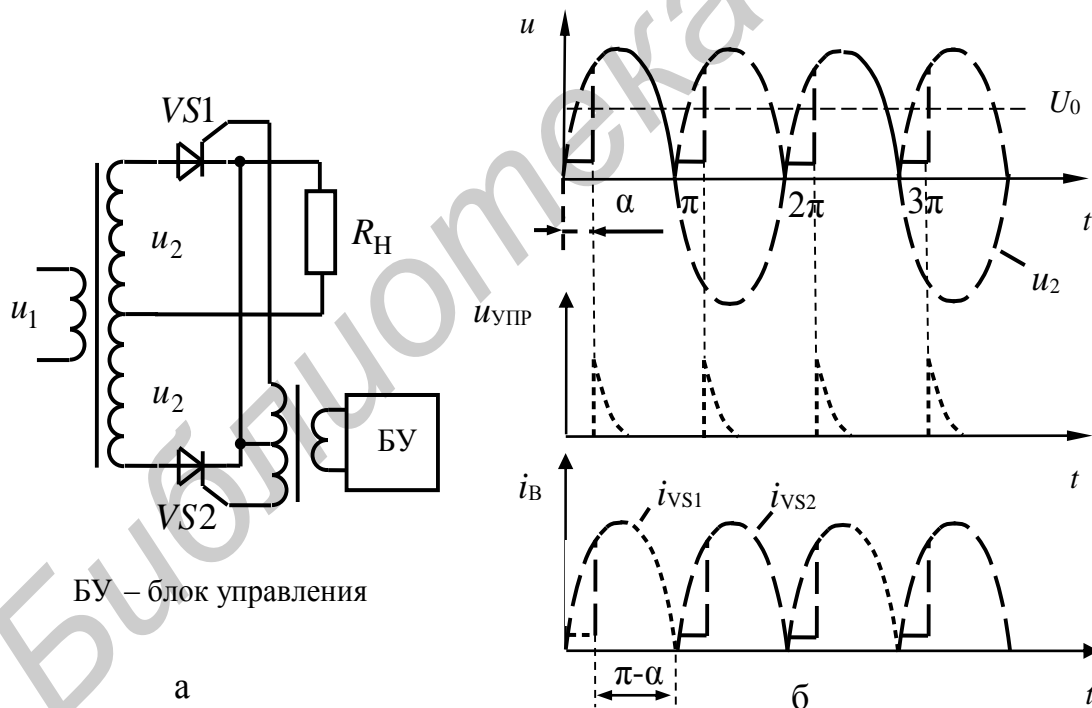
тера  $I_{\Theta}$  уменьшится до значения выключения  $I_{\Theta \text{ ВЫКЛ}}$ , переход транзистора закрывается. Далее цикл повторяется.

Резистор  $R3$  защищает однопереходный транзистор от перенапряжения и стабилизирует его работу при колебаниях температуры окружающей среды.

Постоянная времени заряда конденсатора  $C$  зависит от значения сопротивления резистора  $R2$ , поэтому, изменяя это значение, можно регулировать угол сдвига  $\alpha$  импульсов управления по отношению к напряжению на аноде тиристоров (рисунок 16.3, б).

Недостаток импульсного управления заключается в том, что за время действия управляющего сигнала ток анода тиристора должен превысить значение тока удержания  $I_{\text{УД}}$ , иначе после окончания импульса управления тиристор закроется. При индуктивной нагрузке выполнить это условие достаточно проблематично.

На практике управляемые выпрямители, как правило, строятся по многофазной схеме. В качестве примера рассмотрим работу двухтактного управляемого выпрямителя для однофазной сети (рисунок 16.5).



а – принципиальная схема ; б – временные диаграммы

Рисунок 16.5 – Двухтактный управляемый выпрямитель для однофазной сети

Если между напряжениями управляющего электрода и анода каждого тиристора нет сдвига фаз, то схема действует как неуправляемая: ток протекает

через каждый тиристор и нагрузку в течение половины периода выпрямляемого напряжения. При сдвиге фаз между управляющим и анодным напряжениями, т. е. при угле регулирования  $\alpha > 0$ , ток протекает через каждый тиристор в течение условного времени  $\pi - \alpha$ . Форма кривых тока и напряжения для этого режима работы показана на рисунке 16.5, б.

Очевидно, что угол регулирования может меняться лишь в пределах  $0 - \pi$ . Постоянные составляющие тока  $I_{0\alpha}$  и напряжения  $U_{0\alpha}$  на нагрузке управляемого выпрямителя определяются соотношениями

$$\begin{aligned} I_{0\alpha} &= I_0(1 + \cos\alpha)/2, \\ U_{0\alpha} &= U_0(1 + \cos\alpha)/2, \end{aligned} \quad (16.1)$$

где  $I_0$ ,  $U_0$  – постоянные составляющие тока и напряжения эквивалентного неуправляемого выпрямителя.

Зависимость нормированного напряжения  $U_{0\alpha}/U_0$  от угла  $\alpha$  регулирования называется регулировочной характеристикой выпрямителя (рисунок 16.6).

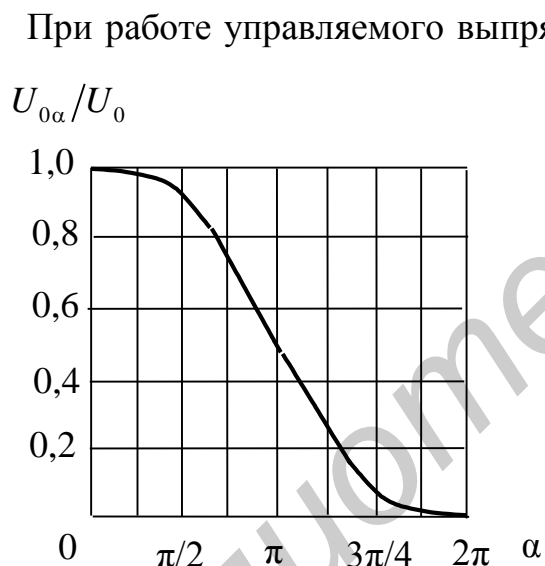


Рисунок 16.6 – Нормированная регулировочная характеристика

При работе управляемого выпрямителя на нагрузку с индуктивной реакцией, что наиболее часто встречается в источниках питания, возможны два режима работы – режим непрерывного тока и режим прерывистого тока, когда ток в нагрузке имеет импульсный характер.

В режиме непрерывного тока цепи нагрузки энергии, накопленной в индуктивности, достаточно для поддержания тока до момента включения второго вентиля выпрямителя, и ток протекает в некоторой части периода даже при отрицательном напряжении на аноде.

В этом режиме постоянная составляющая напряжения на нагрузке  $U_{0\alpha}$  равна

$$U_{0\alpha} = U_0 \cdot \cos\alpha, \quad (16.2)$$

где  $U_0$  – максимальное значение постоянной составляющей напряжения на нагрузке ( $\alpha = 0$ ).

Режим прерывистого тока возникает при выполнении условия

$$\alpha \geq \arctg(X_H/R_H), \quad (16.3)$$

где  $X_H$  и  $R_H$  – индуктивная и активная составляющие сопротивления нагрузки соответственно.

Так как импульсы анодного тока смещены относительно анодного напряжения тиристора на угол регулирования  $\alpha$ , тиристорный выпрямитель потребляет из сети помимо активного и реактивный ток, что является его недостатком.

Таким образом, основными особенностями работы тиристорного регулируемого выпрямителя являются:

1 Уменьшение выходного напряжения в тиристорном выпрямителе достигается уменьшением отбора мощности от сети переменного тока и не приводит к увеличению ее потерь в выпрямителе.

2 При регулировании выпрямитель потребляет от сети переменного тока не только активную, но и реактивную мощность.

3 Выходное напряжение меняется от максимума до нуля при изменении угла регулирования от 0 до  $\pi$  при работе на активную нагрузку и от 0 до  $\pi/2$  при индуктивной реакции нагрузки.

4 Пульсация выпрямленного напряжения заметно возрастает с ростом угла регулирования.

5 Режим непрерывного тока в дросселе нарушается, если выполняется условие (16.3).

## 16.2 Описание лабораторной установки

Электрическая принципиальная схема лабораторной установки приведена на рисунке 16.7.

Напряжение сети 230 В частотой 50 Гц через тумблер SA1 «СЕТЬ» и плавкий предохранитель FU1 поступает на первичную обмотку W1 сетевого понижающего трансформатора T1. Наличие напряжения на лабораторной установке контролируется индикатором HL.

Сетевой трансформатор T1 имеет несколько вторичных обмоток, предназначенных для питания основной и вспомогательных схем управляемого выпрямителя. Основной схемой является схема двухполупериодного выпрямителя на тиристорах. К вспомогательным схемам относятся схема фазовращателя и схема формирователя управляющих импульсов с усилителем мощности.

Фазовращатель построен по схеме индуктивно-емкостного моста, два плеча которого образованы последовательно соединенными полуобмотками W2, W3 сетевого трансформатора T1, а два других плеча – последовательно соединенными конденсатором C1 и резистором R4.

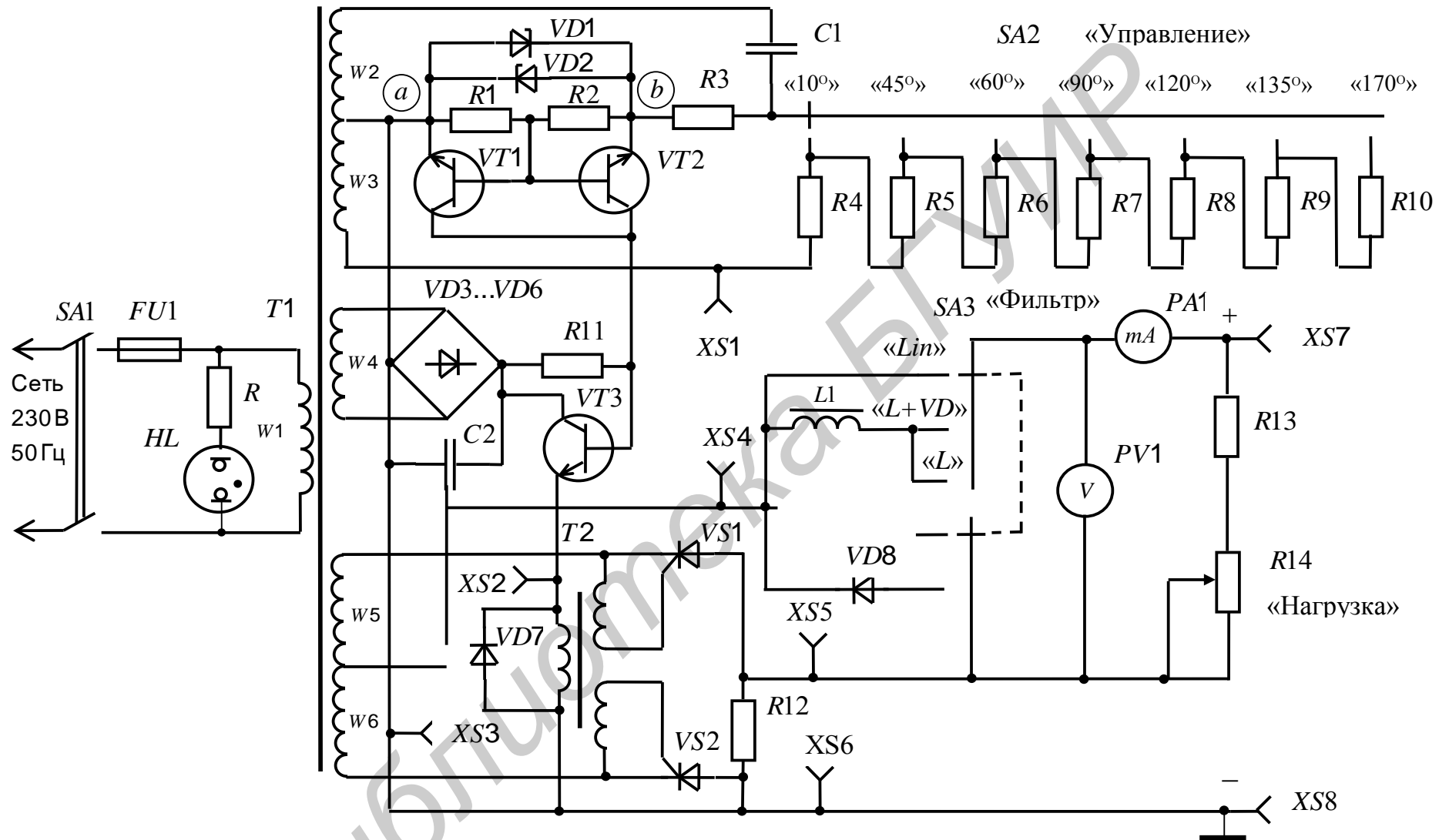


Рисунок 16.7 – Лабораторная установка для исследования однофазного управляемого тиристорного выпрямителя. Схема электрическая принципиальная

Фаза выходного напряжения фазовращателя на диагонали моста  $a - b$  между средними точками соединения полуобмоток  $W_2, W_3$ , конденсатора  $C_1$  и резистора  $R_4$  отличается от фазы напряжения на полуобмотках и зависит от соотношения сопротивлений резистивно-емкостного плеча. Включением в плечо моста различных резисторов  $R_4 \dots R_{10}$  переключателем  $SA_2$  «УПРАВЛЕНИЕ» фазу выходного напряжения фазовращателя можно ступенчато изменять в диапазоне  $10^\circ \dots 170^\circ$ . В диагональ моста  $a - b$  фазовращателя включен входной делитель формирователя управляющих импульсов.

Формирователь управляющих импульсов выполнен на транзисторах  $VT_1, VT_2$  и резисторах  $R_1 \dots R_3, R_{16}$ . Стабилитроны  $VD_1, VD_2$  предназначены для защиты переходов база – эмиттер транзисторов  $VT_1, VT_2$  от перегрузок выходным напряжением фазовращателя. Питание формирователя управляющих импульсов и усилителя мощности на транзисторе  $VT_3$  осуществляется от низковольтного выпрямителя на элементах  $VD_3 \dots VD_6, C_2$ , подсоединенного к низковольтной обмотке  $W_4$  сетевого трансформатора  $T_1$ .

При положительном полупериоде выходного напряжения фазовращателя транзистор  $VT_1$ , включенный по схеме с общим эмиттером, открыт и насыщен – напряжение на его коллекторе близко к эмиттерному. Транзистор  $VT_2$  в этот полупериод закрыт. При отрицательном полупериоде выходного напряжения фазовращателя открыт и насыщен транзистор  $VT_2$ , включенный по схеме с общей базой. Напряжение на его коллекторе в этот полупериод близко к эмиттерному. Транзистор  $VT_1$  в этот полупериод закрыт.

Лишь в моменты времени, когда выходное напряжение фазовращателя по абсолютному значению близко к нулю и составляет единицы вольт, оба транзистора  $VT_1$  и  $VT_2$  закрыты и напряжение на их коллекторах близко к напряжению низковольтного источника питания.

В результате формирователь импульсов генерирует короткие положительные импульсы частотой 100 Гц в моменты перехода выходного синусоидального напряжения фазовращателя через нуль.

Положительные управляющие импульсы частотой 100 Гц усиливаются усилителем мощности на транзисторе  $VT_3$ , работающим в режиме эмиттерного повторителя. Эмиттерный повторитель нагружен на первичную обмотку импульсного трансформатора  $T_2$ . Диод  $VD_7$  предназначен для защиты транзистора  $VT_3$  и ограничения импульсов отрицательной полярности.

Управляемый выпрямитель построен по схеме двухполупериодного выпрямления со средней точкой и содержит два управляемых тиристора  $VS_1, VS_2$ , соединенных последовательно с полуобмотками  $W_5, W_6$  сетевого трансформатора  $T_1$ . Импульсы управления поступают на управляющие электроды тиристорov со вторичных обмоток импульсного трансформатора  $T_2$ .

Тиристоры  $VS1$  и  $VS2$  поочередно включаются в полупериоды положительного синусоидального напряжения на их анодах.

К выходу управляемого выпрямителя подключены входы сглаживающих фильтров  $L+VD$ ,  $L$ . Особенностью фильтра  $L+VD$  является наличие обратного диода  $VD8$ , подключенного к выходу управляемого выпрямителя. Диод  $VD8$  позволяет устранить влияние ЭДС самоиндукции дросселя  $L1$  на работу управляемого выпрямителя. В режиме *Lin* управляемый выпрямитель работает без сглаживающих фильтров.

Выходы фильтров переключателем  $SA3$  «ФИЛЬТР» подсоединяются к нагрузке, состоящей из постоянного  $R13$  и переменного  $R14$  резисторов. Переменным резистором  $R14$  «НАГРУЗКА» устанавливается ток нагрузки.

Для контроля тока, протекающего через тиристоры, последовательно с тиристором  $VS2$  включен балластный резистор  $R12$ .

Значение постоянного напряжения на нагрузке измеряется вольтметром  $PV1$ . Значение тока нагрузки измеряется миллиамперметром постоянного тока  $PA1$ .

Контрольные гнезда  $XS1...XS8$  предназначены для визуального контроля и измерения напряжений на различных участках управляемого выпрямителя посредством осциллографа. При этом на контрольные гнезда выведены следующие контрольные напряжения схемы:

$XS1-XS3$  – входное синусоидальное напряжение;

$XS2-XS3$  – управляющие импульсы включения тиристоров;

$XS4-XS6$  – выходное напряжение управляемого выпрямителя;

$XS5-XS6$  – ток тиристора  $VS2$ ;

$XS7-XS8$  – выходное напряжение нагрузки.

### 16.3 Задание на исследование

1 Исследовать регулировочную характеристику управляемого выпрямителя при различных фильтрах. Определить коэффициенты пульсаций напряжения на нагрузке и построить графические зависимости  $U_H = f(\alpha)$ ,  $K_{\Pi} = f(\alpha)$ .

2 Исследовать нагрузочную характеристику управляемого выпрямителя при различных фильтрах и углах управления. Определить выходное сопротивление и построить графические зависимости  $U_H = f(I_H)$ ,  $R_{\text{ВЫХ}} = f(\alpha)$ .

3 Зарисовать осциллограммы напряжений в контрольных точках управляемого выпрямителя с отображением фазовых соотношений между сигналами при различных фильтрах и углах управления.



## 16.4 Подготовка к работе

Изучить описание лабораторной установки, ознакомиться на макете с органами управления и регулирования и с используемыми контрольно-измерительными приборами.

Доложить преподавателю о готовности выполнения работы.

С разрешения преподавателя включить лабораторную установку тумблером «СЕТЬ» на лицевой панели.

Включить осциллограф.

## 16.5 Порядок выполнения работы

16.5.1 Исследовать регулировочную характеристику управляемого выпрямителя.

Переключатель SA3 «ФИЛЬТР» поставить в положение «Lin», переключатель SA2 «УПРАВЛЕНИЕ» – в положение «10°». Резистором R14 «НАГРУЗКА» установить максимальное значение тока нагрузки по миллиамперметру PA1. К контрольным гнездам XS7-XS8 подсоединить входные щупы осциллографа.

Переключателем SA2 «УПРАВЛЕНИЕ» ступенчато изменять значение угла управления от 10° до 170°. При каждом фиксированном значении угла управления измерить величину постоянного напряжения на нагрузке  $U_H$  вольтметром PV1 и определить значение напряжения пульсаций с помощью осциллографа.

Значение напряжения пульсаций определяется как полуразмах изображения сигнала на экране осциллографа по формуле

$$U_{\text{Нпр}} = (m/2)k \text{ (В)}, \quad (16.3)$$

где  $m$  – количество клеток по вертикали, занимаемых изображением сигнала на экране осциллографа;

$k$  – чувствительность осциллографа по оси «Y», В/дел.

Результаты измерений занести в таблицу 16.1.

Повторить указанные выше операции и измерения при положениях переключателя «ФИЛЬТР» «L+VD» и «L».

Результаты измерений занести в соответствующие графы таблицы 16.1.

По данным таблицы 16.1 рассчитать коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке для различных фильтров и углов управления по формуле

$$K_{\text{П}} = \frac{U_{\text{Нпр}}}{U_H}. \quad (16.4)$$

Рассчитанные значения коэффициента пульсаций занести в таблицу 16.1.

По данным таблицы 16.1 построить графические зависимости  $U_H = f(\alpha)$ ,  $K_{\Pi} = f(\alpha)$ .

Таблица 16.1 – Регулировочные характеристики управляемого выпрямителя

Фильтр	Параметр	Угол управления $\alpha$						
		10°	45°	60°	90°	120°	135°	170°
<i>Lin</i>	$U_H, В$							
	$U_{H_{\text{ПР}}}, В$							
	$K_{\Pi}$							
<i>L+VD</i>	$U_H, В$							
	$U_{H_{\text{ПР}}}, В$							
	$K_{\Pi}$							
<i>L</i>	$U_H, В$							
	$U_{H_{\text{ПР}}}, В$							
	$K_{\Pi}$							

16.5.2 Исследовать нагрузочную характеристику управляемого выпрямителя.

Переключатель SA3 «ФИЛЬТР» поставить в положение «*Lin*», переключатель SA2 «УПРАВЛЕНИЕ» – в положение «45°». Резистором R14 «НАГРУЗКА» установить минимальное значение тока нагрузки по миллиамперметру PA1.

Резистором «НАГРУЗКА» изменять величину тока нагрузки от минимального до максимального значения, контролируя его миллиамперметром PA1, с шагом 50...100 мА при углах управления  $\alpha < 90^\circ$  и шагом 25...50 мА при углах управления  $\alpha > 90^\circ$ . При каждом фиксированном значении тока нагрузки измерить величину постоянного напряжения на нагрузке вольтметром PV1.

Результаты измерений занести в таблицу 16.2.

Повторить операции и измерения при положении переключателя SA2 «УПРАВЛЕНИЕ» «135°».

Провести операции и измерения при положениях переключателя SA3 «ФИЛЬТР» «*L+VD*» и «*L*».

Для фильтра «*L*» измерения провести при углах управления 45° и 60°.

Результаты измерений занести в таблицу 16.2.

По данным таблицы 16.2 определить выходное сопротивление управляемого выпрямителя по формуле

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{\text{Н}}}{\Delta I_{\text{Н}}}, \quad (16.5)$$

где  $\Delta U_{\text{Н}}$ ,  $\Delta I_{\text{Н}}$  – разность между соседними измеренными значениями напряжения на нагрузке и тока нагрузки соответственно.

Таблица 16.2 – Нагрузочная характеристика управляемого выпрямителя

Фильтр	Угол $\alpha$	Параметр	Значения параметров				$R_{\text{ВЫХ}}$ , Ом
<i>Lin</i>	45°	$I_{\text{Н}}$ , мА					
		$U_{\text{Н}}$ , В					
	135°	$I_{\text{Н}}$ , мА					
		$U_{\text{Н}}$ , В					
<i>L+VD</i>	45°	$I_{\text{Н}}$ , мА					
		$U_{\text{Н}}$ , В					
	135°	$I_{\text{Н}}$ , мА					
		$U_{\text{Н}}$ , В					
<i>L</i>	45°	$I_{\text{Н}}$ , мА					
		$U_{\text{Н}}$ , В					
	60°	$I_{\text{Н}}$ , мА					
		$U_{\text{Н}}$ , В					

Рассчитанные значения выходного сопротивления занести в соответствующие графы таблицы 16.2. Построить графические зависимости  $U_{\text{Н}} = f(I_{\text{Н}})$ ,  $R_{\text{ВЫХ}} = f(\alpha)$ .

### 16.5.3 Снять осциллограммы в контрольных точках выпрямителя

При максимальном токе нагрузки зарисовать осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы управляемого выпрямителя с отображением фазовых соотношений между сигналами на углах управления 45° и 135° для фильтров *Lin*, *L+VD* и 45°, 60° – для фильтра *L*. Входные щупы двухлучевого осциллографа попарно подсоединять к контрольным гнездам XS1-XS3/XS2-XS6; XS1-XS3/XS4-XS6; XS4-XS3/XS5 - XS6.

Форма графического оформления осциллограмм напряжений в контрольных точках управляемого выпрямителя приведена на рисунке 16.8.

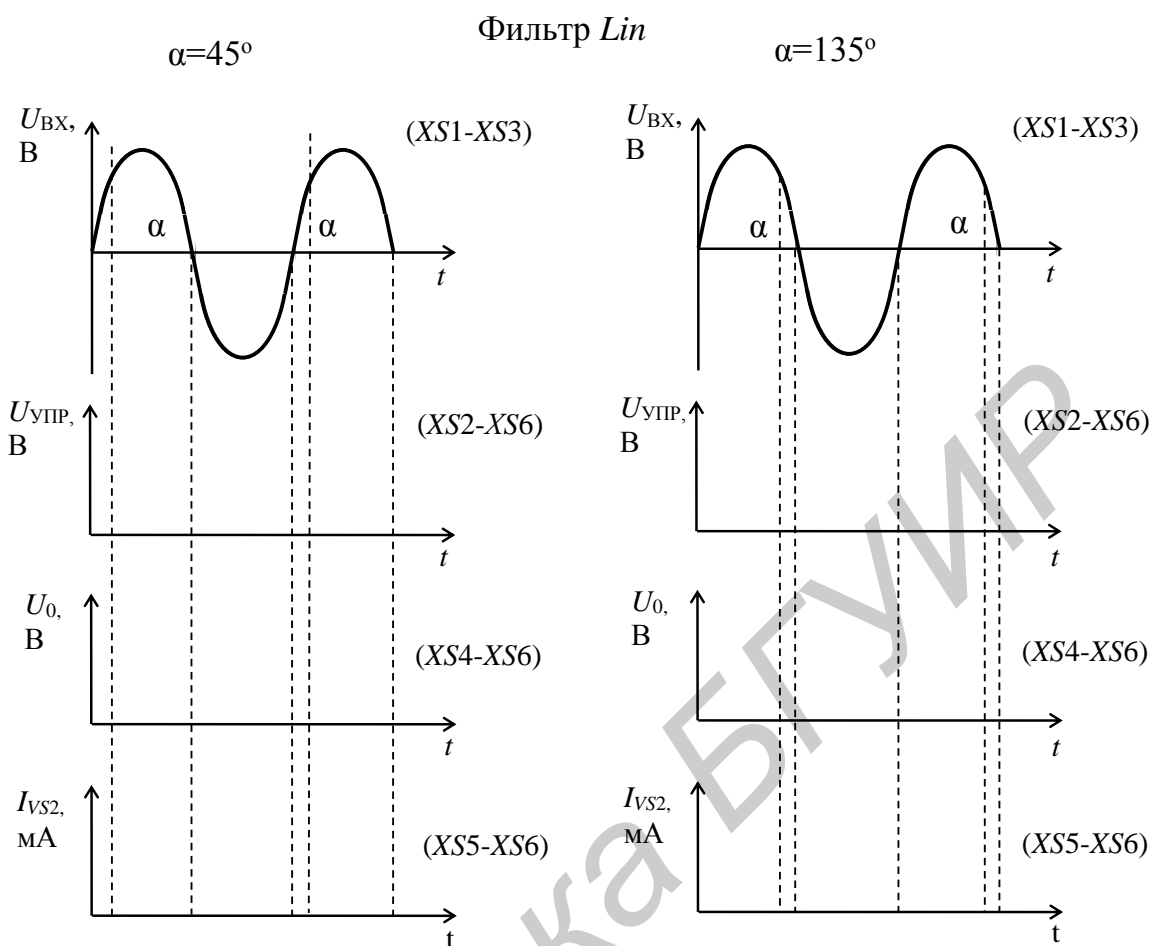


Рисунок 16.8 – Осциллограммы напряжений в контрольных точках управляемого выпрямителя

### 16.6 Завершение работы

Резистором «НАГРУЗКА» установить минимальное значение тока нагрузки.

Доложить преподавателю о завершении работы и показать результаты измерений.

С разрешения преподавателя отключить лабораторную установку тумблером «СЕТЬ» на лицевой панели.

Отсоединить от лабораторной установки входные щупы осциллографа и отключить осциллограф.

## *16.7 Содержание отчета*

- 1 Цель работы.
- 2 Принципиальная схема лабораторной установки.
- 3 Таблицы с результатами измерений и расчетов.
- 4 Графики зависимостей, указанные в подразделе 16.3.
- 5 Зарисованные осциллограммы пульсаций выходного напряжения управляемого выпрямителя.
- 6 Краткая характеристика результатов работы и выводы по ней.

## *16.8 Контрольные вопросы*

- 1 На каких элементах строятся управляемые выпрямители?
- 2 Поясните устройство и принцип действия тиристора.
- 3 Назовите основные параметры тиристоров.
- 4 Как работает простейший управляемый выпрямитель?
- 5 Какие методы управления управляемыми выпрямителями вы знаете?
- 6 Как работает емкостный фазовращатель?
- 7 Что такое регулировочная характеристика выпрямителя?
- 8 Какие вы знаете режимы работы управляемого выпрямителя при работе на нагрузку, с индуктивной реакцией?
- 9 При каких условиях режим непрерывного тока в дросселе нарушается?
- 10 Какой характер нагрузки представляет собой управляемый выпрямитель для сети переменного тока?
- 11 Почему КПД управляемого выпрямителя выше, чем КПД неуправляемого выпрямителя при регулировке выходного напряжения?
- 12 Как влияет величина угла регулирования на коэффициент пульсаций выходного напряжения?

## Лабораторная работа №17 МНОГОФАЗНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

*Цель работы* – изучить особенности работы многофазных выпрямителей при различных нагрузках.

### 14.1 Краткие теоретические сведения

Работа выпрямительных устройств при различных нагрузках (активных, реактивных, индуктивного характера, емкостного характера) отличается определенной спецификой.

Наиболее простой для анализа является работа при чисто активной нагрузке. Рассмотрим особенности этого режима на примере однофазного выпрямителя для трехфазной сети переменного тока, выполненного по схеме Миткевича.

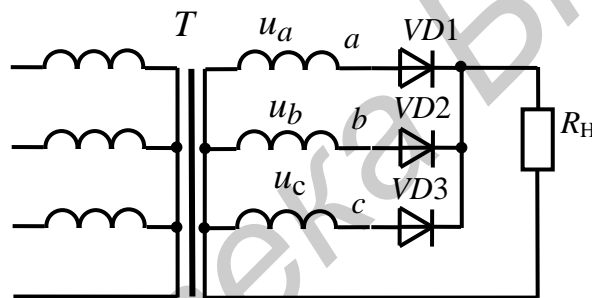
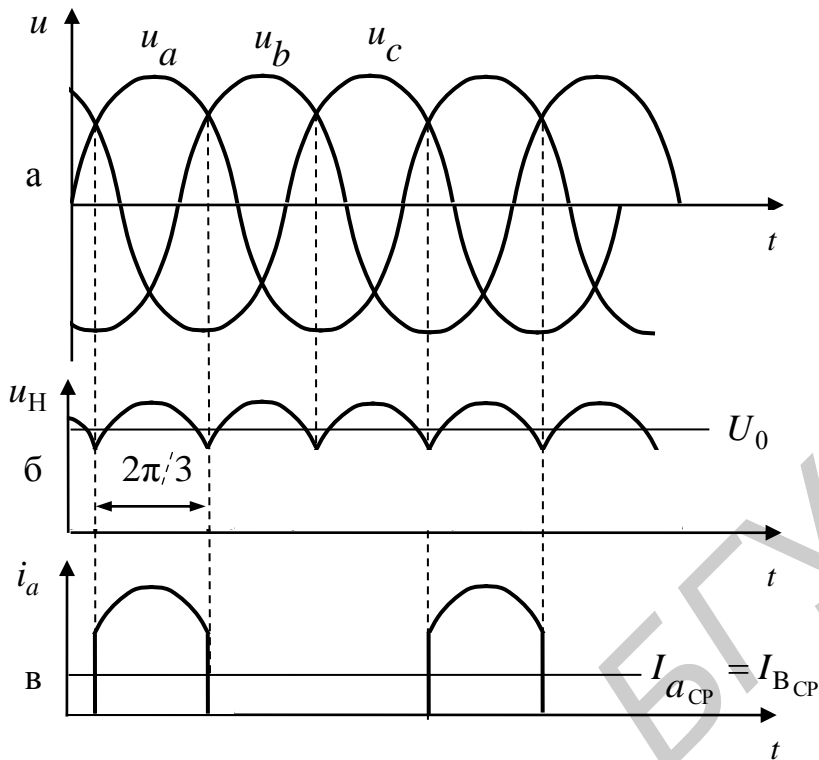


Рисунок 17.1 – Трехфазный однофазный выпрямитель (схема Миткевича) с чисто активной нагрузкой

Выпрямитель состоит из трансформатора, имеющего  $n$ -фазную вторичную обмотку (на схеме показан частный случай трехфазной обмотки, соединенной в звезду). Свободные зажимы обмоток подключены к анодам вентилей. Катоды всех вентилей соединены в общую точку, образующую положительный полюс на выходе выпрямителя. Отрицательным полюсом является нулевая точка вторичных обмоток трансформатора.

Для упрощения анализа будем считать вентили и трансформатор идеальными, т. е. сопротивление вентиля в прямом направлении равно нулю, а в обратном – бесконечно велико, и трансформатор не имеет ни активных, ни реактивных сопротивлений.

Анализ удобно провести, пользуясь временными диаграммами токов и напряжений, действующих в цепях и элементах схемы (рисунок 17.2).



а – фазные напряжения; б – напряжение на нагрузке;  
в – ток в фазе *a*

Рисунок 17.2 – Диаграммы работы однотактной трехфазной схемы выпрямления (схемы Миткевича) при активной нагрузке

Напряжение в каждой фазе может обеспечить ток через вентиль в этой фазе при выполнении двух условий:

- это напряжение для вентиля является прямым;
- оно больше, чем положительное напряжение в смежных фазах.

Таким образом, в идеальном выпрямителе, нагруженном на активное сопротивление, каждая фаза вторичной обмотки трансформатора работает один раз за период в течение части периода  $2\pi/m$ , причем ток в работающей фазе равен току нагрузки. Поэтому ток в фазе *a* вторичной обмотки имеет форму прямоугольника с основанием  $2\pi/3$ , ограниченного сверху отрезком синусоиды. Токи в фазах *b* и *c* изобразятся подобными кривыми, сдвинутыми по фазе относительно кривой тока фазы *a* на  $2\pi/3$  и  $4\pi/3$  соответственно.

Постоянная составляющая напряжения на нагрузке при *n*-фазной вторичной обмотке равна

$$U_0 = \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi/m}^{+\pi/m} U_{2m} \cos \omega t d\omega t = \frac{m}{\pi} U_{2m} \sin \frac{\pi}{m}. \quad (17.1)$$

Среднее квадратическое (действующее) значение напряжения на вторичной обмотке  $U_2$  связано с постоянной составляющей напряжения на нагрузке  $U_0$  соотношением

$$U_2 = \frac{U_0 \cdot \pi}{m \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\pi/m)}. \quad (17.2)$$

Подобно формулам для напряжений могут быть выведены формулы для токов.

Средние квадратические (действующие) значения тока во вторичной обмотке  $I_2$  и тока вентиля  $I_B$  находятся по формуле

$$\begin{aligned} I_B = I_2 &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/m}^{+\pi/m} i_2^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/m}^{+\pi/m} (I_{2m} \cos \omega t)^2 d\omega t} = \\ &= I_{2m} \sqrt{\frac{1}{2m} + \frac{1}{4\pi} \sin^2 \frac{\pi}{m}}, \end{aligned} \quad (17.3)$$

где  $I_{2m} = I_{Bm} = U_{2m}/R_H$  – амплитуда тока во вторичной обмотке и вентиле.

Среднее значение тока через вентиль  $I_{CP}$  равно

$$I_{CP} = \frac{U_0}{m}. \quad (17.4)$$

Амплитуда тока в вентиле связана постоянной составляющей тока в нагрузке  $I_0$  соотношением

$$I_{Bm} = \frac{U_{2m}}{R_H} = \frac{U_0 \cdot \pi}{R_H m \sin(\pi/m)} = I_0 \frac{\pi}{m \sin(\pi/m)}. \quad (17.5)$$

Для схемы Миткевича приведенные выше соотношения будут иметь вид

$$U_0 = \frac{3}{\pi} U_{2m} \cdot \sin \frac{\pi}{3} = 0,827 U_{2m}, \quad (17.6)$$

$$U_2 = \frac{U_0 \cdot \pi}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\pi/3)} = 0,855 U_0, \quad (17.7)$$

$$I_2 = I_B = I_{2m} \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 3} + \frac{1}{4\pi} \sin^2 \frac{\pi}{3}} = 0,47 I_{2m}, \quad (17.8)$$

$$I_{Bm} = I_0 \frac{\pi}{3 \cdot \sin(\pi/3)} = 1,21 I_0. \quad (17.9)$$

Для расчета тока первичной обмотки трансформатора необходимо учесть тот факт, что постоянная составляющая тока, протекающего по фазам вторичной системы обмоток, не трансформируется.



Трансформируется через коэффициент трансформации только переменная составляющая.

По рассчитанным значениям тока и напряжения в 1-й и во 2-й обмотках могут быть определены полные мощности в 1-й и во 2-й обмотках и габаритная мощность.

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 = 1,25 \cdot P_0, \quad (17.10)$$

$$S_2 = U_2 \cdot I_2 = 1,51 \cdot P_0, \quad (17.11)$$

$$S_{tr} = \frac{S_1 + S_2}{2} = 1,38 \cdot P_0. \quad (17.12)$$

Относительно пульсаций выходного напряжения в данной схеме необходимо отметить следующее:

- как видно из временных диаграмм, за период выпрямляемого напряжения ток в нагрузке появляется 3 раза;
- пульсация напряжения в связи с этим имеет вид полуволн;
- колебания (интенсивность пульсаций) можно оценить, рассматривая их гармонические составляющие, т. е. разлагая их в ряд Фурье:

$$U_{2k \max} = \frac{1}{2\pi/m} \int_{-\pi/m}^{\pi/m} U_0(t) \cdot \cos(m \cdot k \cdot \omega t) d\omega t = 2U_0 / [(km)^2 - 1], \quad (17.13)$$

где  $k$  – номер гармоники;

$m$  – число фаз.

Запишем коэффициент пульсаций по  $k$ -гармоникам:

$$K_{\Pi k} = \frac{2}{[(k \cdot m)^2 - 1]}. \quad (17.14)$$

В схеме Миткевича  $m = 3$  и коэффициент пульсации по первой наиболее интенсивной гармонике составит  $K_{\Pi 1} = 0,25$ .

Как видно из проведенного анализа, особенностью работы выпрямителя при чисто активной нагрузке является:

- напряжение на выходе выпрямителя как функция времени определяется огибающей ЭДС действующих фаз;
- каждая фаза в рассмотренной схеме работает 1 раз за период, а импульсы тока через нагрузку вентиля совпадают по форме с действующей фазой ЭДС. Длительность импульса тока равна  $2\pi/m$ , где  $m$  – число импульсов тока за период выпрямляемого напряжения.

Работа выпрямителей при чисто активной нагрузке на практике распространена сравнительно мало, т. к. выпрямленное напряжение содержит значительную пульсацию. Для сглаживания этой пульсации применяют различные рода фильтры нижних частот, которые называют сглаживающими.

Простейшими сглаживающими фильтрами (СФ) являются индуктивные фильтры или емкостные.

Режимы работы при нагрузке с индуктивной или емкостной реакцией имеют определенные отличия от режима работы при чисто активной нагрузке. Эти отличия определяют и различия требований к элементам схемы, а также особенности расчетных формул, связывающих напряжение и ток в нагрузке с напряжениями и токами в вентильях и трансформаторах.

Схема выпрямителя с емкостной реакцией нагрузки изображена на рисунке 17.3.

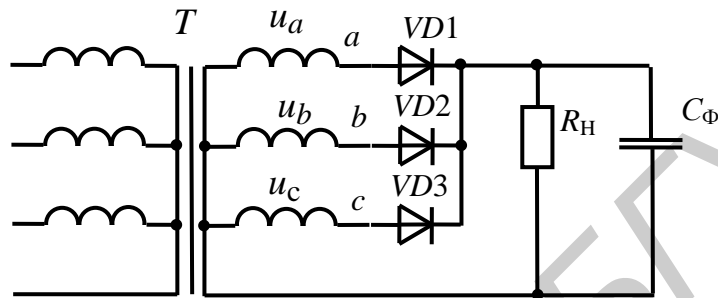
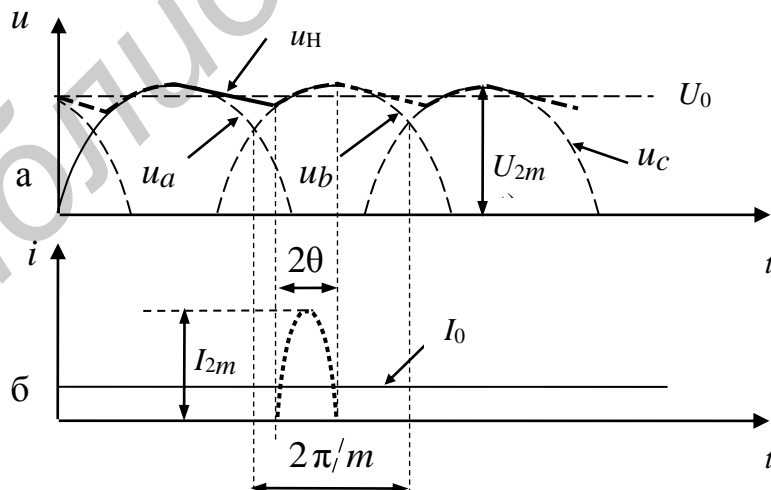


Рисунок 17.3 – Трехфазный однокатный выпрямитель (схема Миткевича) с емкостным характером нагрузки

Емкостная реакция в схеме будет иметь место при  $(1/\omega C_{\Phi}) \ll R_H$ .

Считаем, что трансформатор идеальный, т. е.  $r_{ТР} = 0$  и  $x_{ТР} = 0$ , вентили идеальны и схема совершенно симметрична.

Временные диаграммы токов и напряжений в схеме представлены на рисунке 17.4.



а – диаграммы напряжений; б – диаграммы токов

Рисунок 17.4 – Временные диаграммы токов и напряжений в схеме Миткевича при емкостном характере нагрузки

Емкость  $C_\Phi$  мгновенно заряжается до напряжения в фазе и напряжение на емкости изменяется в соответствии с ЭДС по достижении его максимального значения. При уменьшении напряжения в фазе емкость разряжается на нагрузку по экспоненциальному закону и если напряжение на ней выше, чем в фазе, вентиль закрывается разностью этих воздействий.

Принято оценивать длительность импульса тока угловой мерой  $2\theta$ , где  $\theta$  – угол отсечки.

Если мы увеличиваем сопротивление нагрузки, то длительность импульса тока уменьшается и наоборот.

При работе выпрямителя при нагрузке емкостного характера имеются следующие особенности:

- напряжение на выходе выпрямителя представляет собой сравнительно сложную функцию, составленную из периодически чередующихся отрезков косинусов и экспоненты;

- длительность импульса тока в фазе меньше времени работы фазы:

$$2\theta < \frac{2\pi}{m}.$$

При прочих требованиях к току в нагрузке ток через вентиль в импульсном режиме, соответствующем емкостному характеру нагрузки, имеет большую амплитуду, чем в случае чисто активного сопротивления нагрузки.

Таким образом, требования к пропускной способности вентиля по току при работе на емкостную нагрузку существенно увеличиваются против случая с активной нагрузкой, что является платой за достигаемое сглаживание пульсаций.

Для упрощения анализа применим следующие предположения:

1 Напряжение на нагрузке  $U_H(t)$  как функция времени в силу малости пульсаций по сравнению с постоянной составляющей  $U_0$  может быть положено тождественно равным  $U_0$ :  $U_H(t) \cong U_0$ .

2 Пульсацию относим на счет падения напряжения на внутреннем сопротивлении фазы.

3 Внутреннее сопротивление фазы считаем чисто активным и равным (в схеме Миткевича):

$$r_\Phi = r_B + r_{TP}. \quad (17.15)$$

При сделанных предположениях:

$$i_a = i_B = \frac{U_a(t) - U_0}{r_\Phi} = \frac{U_{2m} \cdot \cos\omega t - U_0}{r_\Phi}, \quad (17.16)$$

$$I_0 = \frac{1}{2\pi m} \int_{-\theta}^{\theta} \frac{U_{2m} \cdot \cos\omega t - U_0}{r_\Phi} d\omega t. \quad (17.17)$$

Из диаграмм на рисунке 17.4 имеем:

$$U_0 = U_{2m} \cdot \cos\theta, \quad (17.18)$$

$$I_0 = \frac{1}{2\pi m} \int_{-\theta}^{\theta} \frac{U_{2m} \cdot \cos\omega t - U_{2m} \cdot \cos\theta}{r_{\Phi}} d\omega t = \frac{mU_0}{2\pi r_{\Phi}} (\operatorname{tg}\theta - \theta). \quad (17.19)$$

Представляет особый интерес определить коэффициент, связанный с характеристиками схемы и зависящий только от  $\theta$ :

$$A(\theta) = (\operatorname{tg}\theta - \theta) = \frac{\pi \cdot r_{\Phi} \cdot I_0}{m \cdot U_0} = \frac{\pi \cdot r_{\Phi}}{m \cdot U_0 / I_0} = \frac{\pi \cdot r_{\Phi}}{m \cdot R_H}. \quad (17.20)$$

С другой стороны, если оценить ориентировочно параметр  $A$  по полученной формуле, то можно найти угол  $\theta$ , а также выражающиеся через него ток и напряжение.

В частности, из формулы  $U_0 = U_{2m} \cos\theta$  следует:

$$U_{2m} = \frac{1}{\cos\theta} U_0, \quad (17.21)$$

$$U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = \left[ \frac{1}{\sqrt{2} \cos\theta} \right] U_0. \quad (17.22)$$

Множитель  $\left[ \frac{1}{\sqrt{2} \cos\theta} \right]$  однозначно определяется углом  $\theta$  и связанным с ним параметром  $A(\theta)$ . Существующую связь можно заранее проанализировать и представить в виде графической зависимости

$$B = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos\theta. \quad (17.23)$$

На практике часто кроме активной составляющей сопротивления фазы приходится принимать во внимание индуктивное сопротивление, связанное с потоком рассеяния в трансформаторе.

Соотношение между активными и реактивными составляющими сопротивления фазы принято характеризовать углом  $\phi$ :

$$\phi = \operatorname{arctg} \left( \frac{x_{\text{ТР}}}{r_{\Phi}} \right). \quad (17.24)$$

В общем случае параметр  $B$  оказывается зависящим не только от параметра  $A(\theta)$ , но также и от угла  $\phi$ .

В справочниках имеются данные для коэффициента  $B$  (в упрощенном виде они представлены на рисунке 17.5).

С помощью коэффициентов  $D$ ,  $F$ ,  $H_m$ , представленных на рисунках 17.6, 17.7, 17.8, можно определить другие электрические характеристики трансформатора и выпрямителя.

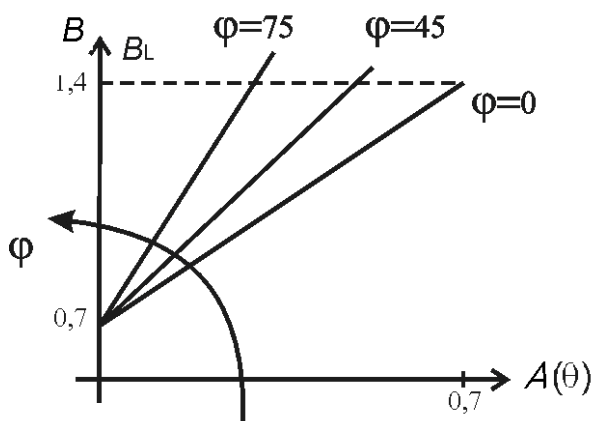


Рисунок 17.5 – Зависимость параметра  $B$  от параметра  $A(\theta)$  и угла  $\varphi$

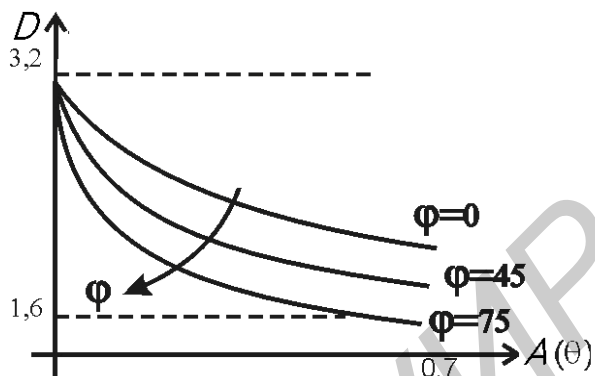


Рисунок 17.6 – Зависимость параметра  $D$  от параметра  $A(\theta)$  и угла  $\varphi$

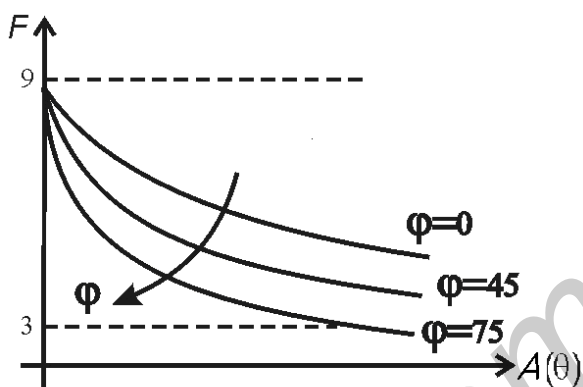


Рисунок 17.7 – Зависимость параметра  $F$  от параметра  $A(\theta)$  и угла  $\varphi$

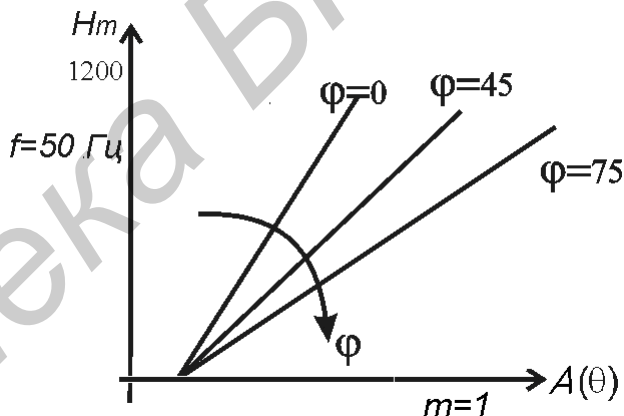


Рисунок 17.8 – Зависимость параметра  $H_m$  от параметра  $A(\theta)$  и угла  $\varphi$

Например, для схемы Миткевича токи вентиляей, вторичных обмоток трансформатора и коэффициент пульсаций определяются по формулам

$$I_{Bm} = I_{2m} = \frac{1}{m} F \cdot I = 0,33F \cdot I_0, \quad (17.25)$$

$$I_B = I_2 = \frac{1}{m} D \cdot I_0 = 0,33D \cdot I_0, \quad (17.26)$$

$$K_{\Pi} = \frac{H_m}{r_{\Phi}} C_{\Phi}. \quad (17.27)$$

В трехфазных выпрямителях с большими токами нагрузки чаще всего используются индуктивные фильтры (рисунок 17.9).

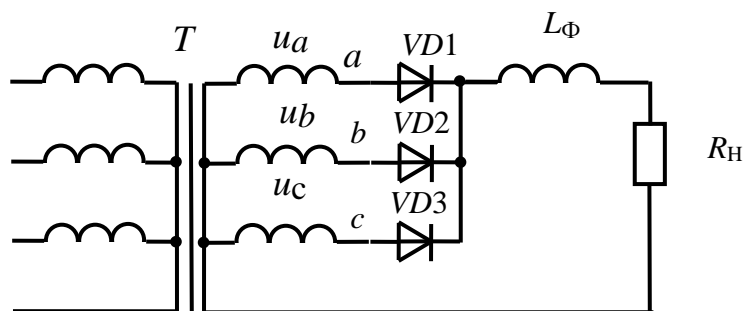
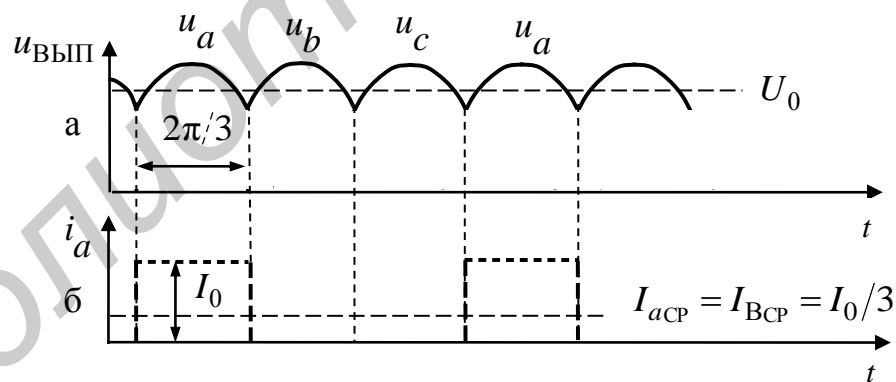


Рисунок 17.9 – Трехфазный однотактный выпрямитель (схема Миткевича) при индуктивном характере нагрузки

Реакция нагрузки на выпрямитель будет определяться индуктивностью  $L_\Phi$  при выполнении условия  $\omega L_\Phi \gg R_H$ . Если принять индуктивность дросселя бесконечно большой ( $L_\Phi = \infty$ ), то любое приращение тока в дросселе будет индуцировать в его обмотке бесконечно большую ЭДС самоиндукции  $e_S = -L(di_0/dt)$ , препятствующую изменениям тока. Следовательно, ток, как в дросселе, так и в нагрузке, не может претерпевать изменений во времени.

При идеальных вентилях ( $r_{ПР} = 0$  и  $r_{ОБР} = \infty$ ) и трансформаторе ( $r_{ТР} = 0$  и  $x_{ТР} = 0$ ) выпрямленное напряжение  $u_{ВЫП}$  на катодах вентилях как и при работе с активной нагрузкой имеет форму огибающей зависимостей ЭДС в фазах вторичных обмоток трансформатора (рисунок 17.10).



а – диаграмма напряжения на нагрузке; б – диаграммы токов в фазе  $a$

Рисунок 17.10 – Диаграммы работы схемы Миткевича при индуктивном характере нагрузки

Все формулы, связывающие напряжение на нагрузке с напряжением в трансформаторе и вентильном звене, одинаковы с формулами, соответствующими чисто активной нагрузке.

Так как ток в нагрузке не претерпевает изменений во времени (при  $R_H = \text{const}$ ), то и напряжение на нагрузке постоянно и равно

$$U_0 = U_{2m} \frac{\pi}{m} \cos\left(\frac{\pi}{m}\right). \quad (17.28)$$

Очевидно, что при бесконечно большой индуктивности дросселя переменная составляющая кривой выпрямленного напряжения будет приложена к зажимам дросселя и пульсации на нагрузке отсутствуют.

Каждая фаза вторичной обмотки трансформатора работает в течение периода один раз, и длительность работы фазы составляет  $1/m$  часть периода. При этом ток в работающей фазе вторичной обмотки трансформатора и вентиле неизменен и равен току нагрузки, т. е. ток в фазе вторичной обмотки может быть изображен прямоугольником с высотой  $I_0$  и основанием  $2\pi/m$  (см. рисунок 17.10).

Среднее значение тока в вентиле и в фазе вторичной обмотки трансформатора  $I_{CP} = I_0/m$ , а среднее квадратическое (действующее) значение этих токов

$$I_B = I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/m} I_0^2 \cdot d(\omega t)} = \frac{I_0}{\sqrt{m}}. \quad (17.29)$$

Таким образом, коэффициент формы кривой тока вторичной обмотки трансформатора при работе выпрямителя с нагрузкой индуктивного характера  $K_f = I_2/I_{CP} = 1/\sqrt{m}$ . Это выражение показывает, что с увеличением числа фаз выпрямления действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора возрастает при неизменном среднем значении, т. к. при этом сокращается время работы каждой фазы и содержание высших гармонических в кривой тока увеличивается. Вследствие этого ухудшается использование трансформатора и его габаритная мощность увеличивается с увеличением числа фаз выпрямления.

Габаритная мощность вторичной обмотки трансформатора

$$S_2 = mU_2 \cdot I_2 = m \cdot \frac{\pi}{\sqrt{2m}} \cdot \frac{U_0}{\sin(\pi/m)} \cdot \frac{I_0}{\sqrt{m}} = \frac{\pi}{\sqrt{2m \sin(\pi/m)}} P_0. \quad (17.30)$$

Ток в фазе первичной обмотки трансформатора зависит от схемы соединения обмоток и от числа фаз вторичной и первичной обмоток. При одинаковых числах фаз первичной и вторичной обмоток  $m$  среднее квадратическое (действующее) значение тока фазы  $I_1$  и габаритная мощность  $S_1$  первичной обмотки трансформатора равны

$$I_1 = \frac{1}{n} \sqrt{I_2^2 - I_{CP}^2} = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{I_0^2}{m} - \frac{I_0^2}{m^2}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{I_0}{m} \sqrt{m-1}, \quad (17.31)$$

$$S_1 = mU_1 \cdot I_1 = \frac{\pi\sqrt{m-1}}{\sqrt{2}[m \cdot \sin(\pi/m)]} P_0, \quad (17.32)$$

где  $n = U_1/U_2$  – коэффициент трансформации трансформатора.

Недостаток схемы Миткевича заключается в эффекте подмагничивания вторичных обмоток током  $I_{\text{ПОДМ}} = I_0/3$ , что приводит к существенному увеличению габаритной мощности трансформатора.

Исключение подмагничивания вторичных обмоток трансформатора достигается в двухтактной трехфазной схеме выпрямления (схема Ларионова), изображенной на рисунке 17.11.

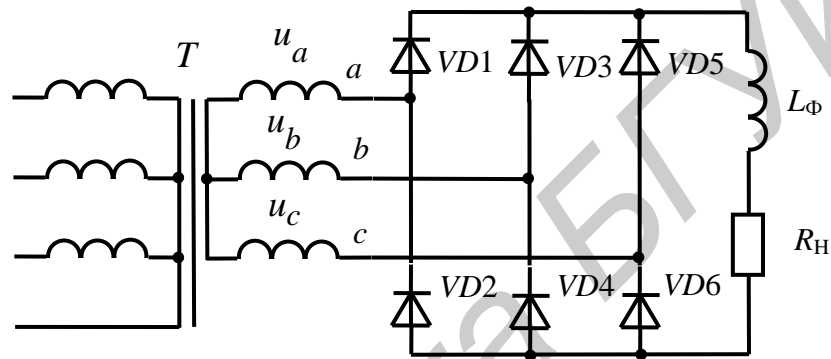


Рисунок 17.11 – Трехфазный двухтактный выпрямитель (схема Ларионова) при индуктивном характере нагрузки

В этой схеме к нагрузке приложено линейное напряжение, и ток протекает в любой момент времени в двух фазах, причем положительное направление ток имеет в фазе с наибольшим потенциалом, а отрицательное – в фазе с наименьшим потенциалом (рисунок 17.12). Поскольку напряжение в фазах изменяется от положительного до отрицательного значения, ток в каждой фазе в интервале времени  $\pi/3$  имеет положительное и в таком же интервале – отрицательное значение. Среднее значение тока в фазе за период колебаний равно нулю, следовательно, подмагничивание отсутствует.

Схема Ларионова при индуктивном характере нагрузки характеризуется следующими соотношениями между напряжениями и токами:

$$U_2 = 0,43U_0, \quad (17.33)$$

$$U_{\text{ОБР}} = 1,05U_0, \quad (17.34)$$

$$I_{\text{ПР СР}} = 0,33I_0, \quad (17.35)$$

$$I_{\text{ПР}m} = I_0, \quad (17.36)$$

$$I_{\text{ПР}} = 0,58I_0, \quad (17.37)$$

$$I_2 = 0,82I_0, \quad (17.38)$$



$$S_1 = S_2 = S_{\text{ТР}} = 1,05P_0, \quad (17.39)$$

$$K_{\text{П1}} = 0,057, \quad (17.40)$$

где  $U_2, I_2$  – фазные средние квадратические (действующие) напряжения и токи во вторичных обмотках трансформатора соответственно;

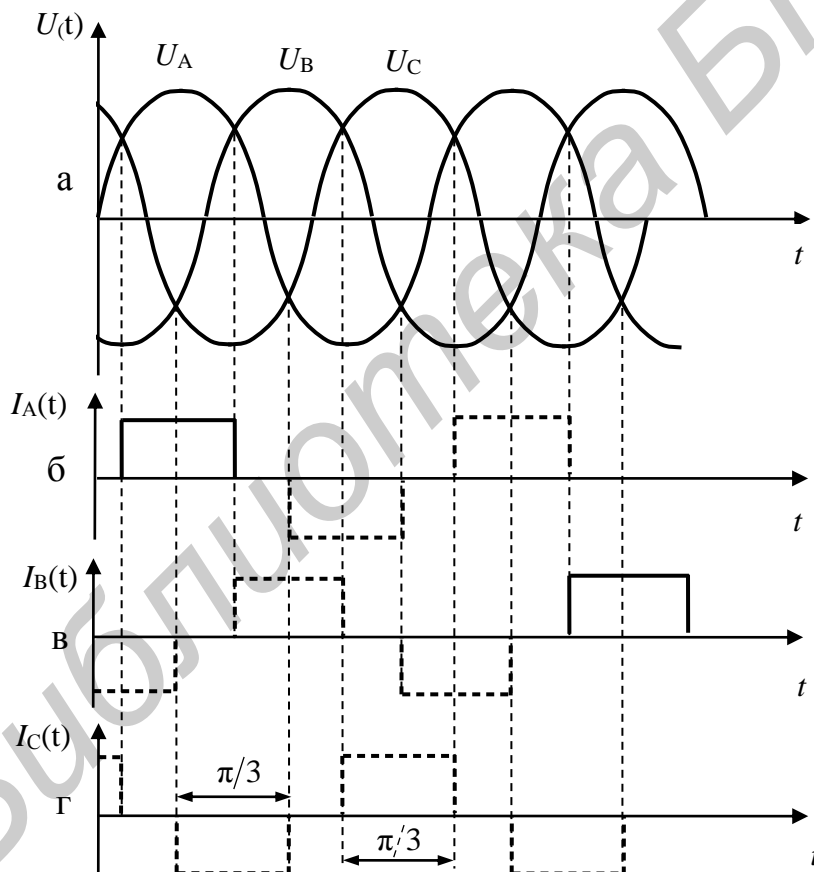
$U_0, I_0$  и  $P_0$  – напряжение на нагрузке, ток нагрузки и мощность в нагрузке соответственно;

$U_{\text{ОБР}}$  – максимальное обратное напряжение на вентилях;

$I_{\text{ПРm}}, I_{\text{ПР CP}}, I_{\text{ПР}}$  – максимальное, средневывпрямленное и среднее квадратическое (действующее) значение токов вентиляей соответственно;

$S_1, S_2, S_{\text{ТР}}$  – габаритная мощность первичной обмотки, вторичной обмотки и трансформатора в целом соответственно;

$K_{\text{П1}}$  – коэффициент пульсаций по первой гармонике.



а – диаграммы фазных напряжений; б, в, г – диаграммы фазных токов

Рисунок 17.12 – Диаграммы работы двухтактной трехфазной схемы выпрямления (схемы Ларионова) при индуктивном характере нагрузки

Реальный выпрямитель обладает внутренним активным сопротивлением  $r_{\Phi} = r_{\Gamma P} + r_{T P}$ , состоящим из суммы прямого сопротивления вентиля  $r_{\Gamma P}$  и активного сопротивления трансформатора  $r_{T P}$ , а также индуктивностью рассеяния  $L_S$  обмоток трансформатора, которые влияют на работу выпрямителя, изменяя как величину, так и форму кривой выпрямленного напряжения и тока вентиля.

Кроме того, в многофазных схемах выпрямления за счет внутреннего сопротивления возникает перекрытие фаз, т. е. их одновременная работа (рисунок 17.13). Положительные значения ЭДС в фазах вторичных обмоток оказываются больше выпрямленного напряжения  $U_0$  и в течение некоторой части периода, соответствующей углу перекрытия фаз  $\gamma$ , две фазы  $a$  и  $b$  вторичных обмоток трансформатора работают одновременно. В фазе  $a$ , заканчивающей работу, ток  $i_a$  уменьшается за время перекрытия фаз от значения  $I_0$  до 0, а в фазе  $b$ , вступающей в работу, — увеличивается от 0 до  $I_0$ , причем сумма токов двух фаз равна току нагрузки  $i_a + i_b = I_0$ , который при бесконечно большой индуктивности на выходе выпрямителя неизменен.

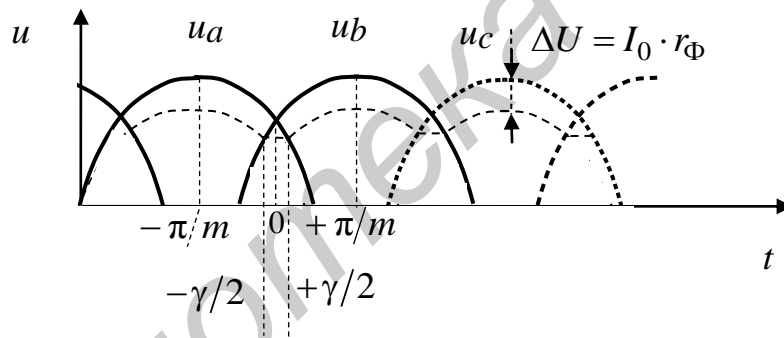


Рисунок 17.13 – Временные диаграммы напряжений в схеме Миткевича при перекрытии фаз

Напряжение на нагрузке как функцию времени  $U_0(t)$  можно найти как полусумму следующих электрических взаимодействий:

$$\begin{aligned}
 U_0(t) &= \frac{1}{2} \left[ U_{2m} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{m}\right) - i_a r_{\Phi} + U_0(t) + U_{2m} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{m}\right) - i_b r_{\Phi} \right] = \\
 &= \frac{U_{2m}}{2} \left[ \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{m}\right) + \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{m}\right) - (i_a - i_b) r_{\Phi} \right].
 \end{aligned}
 \tag{17.41}$$

В точках  $\omega t = \frac{\gamma}{2}$  выполняется равенство:

$$-\cos\left(\frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{m}\right) + \cos\left(\frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{m}\right) = \frac{I_0 r_{\Phi}}{2U_{2m}},
 \tag{17.42}$$

откуда следует

$$\sin \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\pi}{m} = \frac{I_0 r_{\Phi}}{2U_{2m}}. \quad (17.43)$$

В конечном счете угол перекрытия фаз  $\gamma$  определяется формулой

$$\sin \frac{\gamma}{2} = \frac{mr_{\Phi}}{2\pi R_H}. \quad (17.44)$$

С учетом неизменности токов в нагрузке можно прийти к выводу, что в интервале перекрытия фаз  $\gamma$  ток в фазе, заканчивающей работу, линейно спадает, а в фазе, начинающей работу, – линейно возрастает (рисунок 17.14).

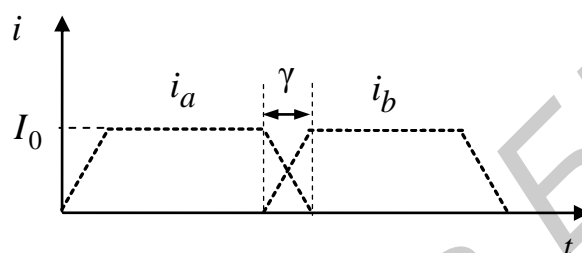


Рисунок 17.14 – Временные диаграммы токов при перекрытии фаз в случае активного сопротивления фаз

В случае комплексного сопротивления фазы, т. е. при наличии индуктивности рассеяния трансформатора также имеет место одновременная работа смежных фаз в некотором интервале перекрытия. Причем форма токов в фазах и напряжение на выходе видоизменяются (рисунок 17.15).

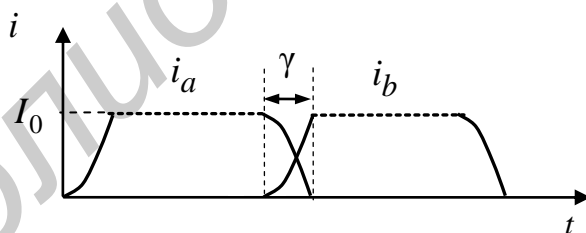


Рисунок 17.15 – Временные диаграммы токов при перекрытии фаз в случае комплексного сопротивления фаз

При рассмотрении временных диаграмм для напряжения на выходе выпрямителя видно, что явление перекрытия фаз имеет в целом негативный характер:

- уменьшается среднее значение выходного сопротивления;
- раздробляется пульсация;
- увеличивается коэффициент пульсации;
- работающие одновременно фазы рассеивают мощность на своих внутренних активных сопротивлениях, что приводит к уменьшению КПД.

## 17.2 Описание лабораторной установки

Электрическая принципиальная схема лабораторной установки приведена на рисунке 17.16.

Лабораторная установка питается от трехфазной сети переменного тока 230/400 В, 50 Гц. Включение лабораторной установки осуществляется тумблером  $SA1$  «Сеть». При замыкании тумблера  $SA1$  срабатывает магнитный пускатель  $K1$ , подключенный к фазе «С» трехфазной сети.

Фазные напряжения  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  через предохранители  $FU1$ ,  $FU2$ ,  $FU3$  и замкнутые контакты магнитного пускателя  $K1$  поступают на первичные обмотки трехфазного трансформатора  $T2$ . Наличие фазных напряжений на лабораторной установке контролируется индикаторами  $HL1$ ,  $HL2$ ,  $HL3$ .

Первичные обмотки трехфазного трансформатора  $T2$  соединены по схеме «звезда». Начала обмоток через контакты магнитного пускателя  $K1$  и фазные предохранители  $FU1 \dots FU3$  подключены к соответствующим фазам трехфазной сети, концы обмоток объединены и подключены к нейтральному проводу «N».

Эффективное значение фазного напряжения, в частности фазы «С», измеряется вольтметром переменного тока  $PV1$ . Эффективное значение тока, протекающего через первичную обмотку, измеряется миллиамперметром переменного тока  $PA1$ .

В одну из первичных обмоток трансформатора  $T2$  включен датчик тока, состоящий из токового резистора  $R1$  и измерительного трансформатора  $T1$ . Датчик тока позволяет визуально контролировать с помощью осциллографа форму тока в первичной обмотке трехфазного трансформатора  $T2$ .

Вторичные обмотки трехфазного трансформатора  $T2$  соединены по схеме «звезда». Концы обмоток объединены и подключены к переключателю  $SA2$  «Выпрямитель», а начала обмоток подсоединены к трехфазному мостовому выпрямителю. Параллельно одной из вторичных обмоток трехфазного трансформатора  $T2$  подсоединен измерительный трансформатор  $T4$ , позволяющий визуально с помощью осциллографа контролировать форму напряжения на вторичной обмотке.

Эффективное значение фазного напряжения вторичной обмотки трехфазного трансформатора  $T2$  измеряется вольтметром переменного тока  $PV2$ . Эффективное значение тока, протекающего через вторичную обмотку трансформатора  $T2$ , измеряется миллиамперметром переменного тока  $PA2$ .

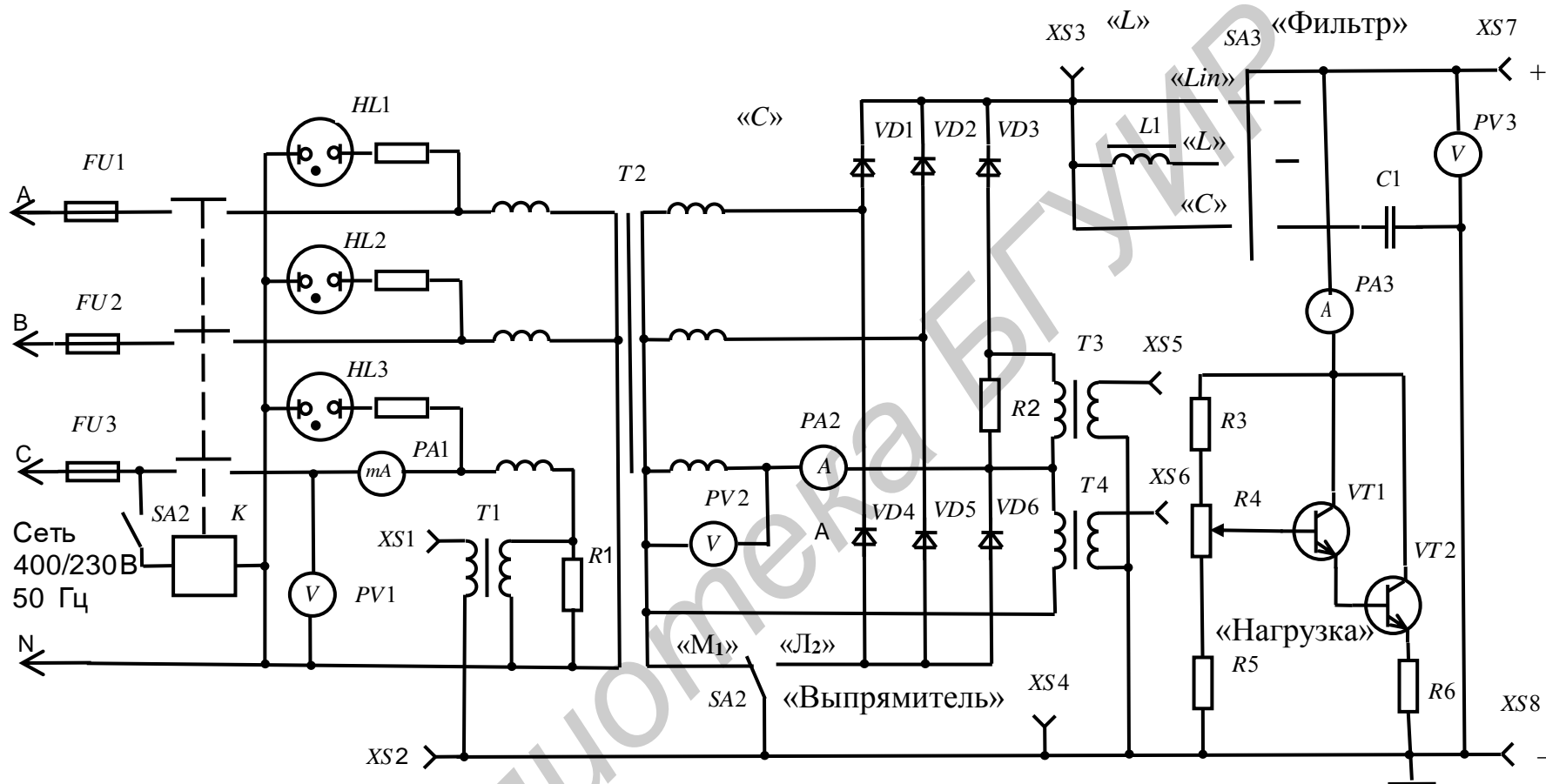


Рисунок 17.16 – Лабораторная установка для исследования трехфазных выпрямителей.  
 Схема электрическая принципиальная

Трехфазный мостовой выпрямитель построен на полупроводниковых диодах  $VD1...VD6$  и содержит три параллельных плеча, каждое из которых состоит из двух последовательно соединенных диодов. Трехфазное напряжение подается в точки соединения диодов каждого плеча. Диоды объединены в две группы: катодную, в которой катоды трех диодов соединены вместе, и анодную, в которой соединены вместе аноды.

Выбор схемы трехфазного выпрямителя осуществляется переключателем  $SA2$  «Выпрямитель», положения которого соответствуют следующим схемам включения:

« $M_1$ » – однополупериодная трехфазная схема выпрямления Миткевича;

« $L_2$ » – двухполупериодная трехфазная схема выпрямления Ларионова.

В одно плечо трехфазного мостового выпрямителя включен датчик тока, состоящий из токового резистора  $R2$  и измерительного трансформатора  $T3$ . Датчик тока позволяет визуально с помощью осциллографа контролировать форму тока, протекающего через диоды выпрямителя.

К выходу трехфазного выпрямителя подключены сглаживающие  $L$ - и  $C$ -фильтры. Индуктивный сглаживающий фильтр образован дросселем  $L1$ , соединяемым последовательно с нагрузкой. Емкостный сглаживающий фильтр образован конденсатором  $C1$ , подключаемым параллельно нагрузке. В режиме « $Lin$ » трехфазный выпрямитель работает без сглаживающих фильтров.

Переключателем  $SA3$  «Фильтр» выходы сглаживающих фильтров подключаются к нагрузке. В качестве нагрузки трехфазного выпрямителя используется составной транзисторный каскад, образованный транзисторами  $VT1, VT2$  одного типа проводимости.

Резисторы  $R3...R5$  образуют делитель напряжения смещения транзисторного каскада. Изменение тока, потребляемого транзисторным каскадом, осуществляется изменением напряжения смещения на базе транзистора  $VT1$  с помощью резистора  $R4$  «Нагрузка». Резистор  $R6$  – токостабилизирующий.

Значение тока нагрузки измеряется амперметром постоянного тока  $PA3$ . Значение напряжения на нагрузке измеряется вольтметром постоянного тока  $PV3$ .

Контрольные гнезда  $XS1...XS8$  предназначены для визуального контроля и измерения напряжения на различных участках трехфазного выпрямителя посредством осциллографа. При этом на контрольные гнезда выведены следующие контрольные напряжения схемы:

$XS1$ - $XS2$  – выходное напряжение датчика тока первичной обмотки трехфазного трансформатора;

$XS3$ - $XS4$  – выходное напряжение трехфазного выпрямителя;

$XS5$ - $XS4$  – выходное напряжение датчика тока трехфазного выпрямителя;

$XS6$ - $XS4$  – напряжение вторичной обмотки трехфазного трансформатора;

$XS7$ - $XS8$  – выходное напряжение на нагрузке.

### 17.3 Задание на исследование

1 Исследовать нагрузочную характеристику однополупериодной и двухполупериодной трехфазных схем выпрямления с различными сглаживающими фильтрами и построить графические зависимости  $U_H = f(I_H)$ .

2 Определить коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке и внутреннее выходное сопротивление трехфазных схем выпрямления с различными сглаживающими фильтрами.

3 Определить параметры трехфазного трансформатора при работе выпрямителей с различными сглаживающими фильтрами.

4 Зарисовать осциллограммы напряжения и тока трехфазных выпрямителей при работе с различными сглаживающими фильтрами и определить параметры импульсов.

### 17.4 Подготовка к работе

Изучить описание лабораторной установки, ознакомиться с органами управления и регулирования макета и используемыми контрольно-измерительными приборами.

Доложить преподавателю о готовности к выполнению работы.

С разрешения преподавателя включить лабораторную установку тумблером «СЕТЬ» на лицевой панели.

Включить осциллограф.

### 17.5 Порядок выполнения работы

17.5.1 Исследовать нагрузочные характеристики трехфазных схем выпрямления.

Переключатель «ВЫПРЯМИТЕЛЬ» поставить в положение «M<sub>1</sub>», переключатель «ФИЛЬТР» – в положение «Lin». К контрольным гнездам XS7-XS8 подсоединить входные щупы осциллографа.

Резистором «НАГРУЗКА» изменять величину тока нагрузки от минимального до максимального значения, контролируя его амперметром PA3.

При каждом фиксированном значении тока нагрузки измерить величину постоянного напряжения на нагрузке вольтметром PV3. Результаты измерений занести в таблицу 17.1.

Переключатель «ФИЛЬТР» поставить поочередно в положение «L» и «C» и для каждого положения переключателя повторить указанные выше операции и измерения. Результаты измерений занести в соответствующие графы таблицы 17.1.

Переключатель «ВЫПРЯМИТЕЛЬ» поставить в положение «Л<sub>2</sub>». Переключатель «ФИЛЬТР» поставить поочередно в положение «Lin», «L», «C» и повторить указанные выше операции и измерения.

Дополнить таблицу 17.1 результатами измерений для каждого из указанных положений переключателя.

Таблица 17.1 – Нагрузочные характеристики трехфазных схем выпрямления

Выпрямитель	Фильтр	Параметр	Значения параметров					$R_{\text{ВЫХ}}$ , Ом	$K_{\text{ПН}}$
			0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
M <sub>1</sub>	Lin	I <sub>Н</sub> , А	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
		U <sub>Н</sub> , В							
	L	I <sub>Н</sub> , А	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
		U <sub>Н</sub> , В							
	C	I <sub>Н</sub> , А	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
		U <sub>Н</sub> , В							
Л <sub>2</sub>	Lin	I <sub>Н</sub> , А	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
		U <sub>Н</sub> , В							
	L	I <sub>Н</sub> , А	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
		U <sub>Н</sub> , В							
	C	I <sub>Н</sub> , А	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
		U <sub>Н</sub> , В							

По данным таблицы 17.1 для каждой схемы выпрямления и сглаживающих фильтров построить графическую зависимость  $U_{\text{Н}} = f(I_{\text{Н}})$ .

17.5.2 Определить выходное сопротивление схем выпрямления и коэффициенты пульсаций напряжения на нагрузке.

По данным таблицы 17.1 для максимального тока нагрузки определить выходное сопротивление схем выпрямления по формуле

$$R_{\text{ВЫХ}} = \Delta U_{\text{Н}} / \Delta I_{\text{Н}}, \quad (17.45)$$

где  $\Delta U_{\text{Н}}$ ,  $\Delta I_{\text{Н}}$  – разность между соседними измеренными значениями напряжения и тока нагрузки соответственно.

Рассчитанные значения выходного сопротивления схем выпрямления занести в соответствующие графы таблицы 17.1.

Одновременно с измерениями, проводимыми при исследовании нагрузочной характеристики, определить значение напряжения пульсаций при максимальном токе нагрузки как полуразмах изображения сигнала на экране осциллографа по формуле

$$U_{\text{Н ПР}} = (m/2)k \text{ (В)}, \quad (17.46)$$

где  $k$  – чувствительность осциллографа по оси «Y», В/дел;



$m$  – количество клеток по вертикали, занимаемых изображением переменного сигнала на экране осциллографа.

Рассчитать коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке  $K_{ПН}$  по формуле

$$K_{ПН} = U_{Н ПР} / U_{Н} \cdot \quad (17.47)$$

Рассчитанные значения коэффициента пульсаций схем выпрямления занести в соответствующие графы таблицы 17.1.

### 17.5.3 Определить параметры трехфазных схем выпрямления.

На максимальном токе нагрузки, устанавливаемом резистором «НАГРУЗКА» в пределах шкалы амперметра  $PA3$ , для каждой схемы выпрямления и сглаживающих фильтров измерить электрический режим работы трехфазного трансформатора:

- первичная обмотка ( $U_1, I_1$ ) – по показаниям приборов  $PV1, PA1$ ;
- вторичная обмотка ( $U_2, I_2$ ) – по показаниям приборов  $PV2, PA2$ ;
- нагрузка ( $U_{Н}, I_{Н}$ ) – по показаниям приборов  $PV3, PA3$ .

Измеренные значения напряжений и токов занести в таблицу 17.2

Таблица 17.2 – Параметры трехфазных схем выпрямления

Выпрямитель	Фильтр	Значения токов и напряжений						Параметр		
		$U_1,$ В	$I_1,$ мА	$U_2,$ В	$I_2,$ мА	$U_{Н},$ В	$I_{Н},$ мА	$K_{P1}$	$K_{P2}$	$K_{PTP}$
M <sub>1</sub>	<i>Lin</i>									
	<i>L</i>									
	<i>C</i>									
L <sub>2</sub>	<i>Lin</i>									
	<i>L</i>									
	<i>C</i>									

По данным таблицы 17.2 определить параметры трехфазных схем выпрямления трансформатора по формулам:

- коэффициент использования по мощности первичной обмотки

$$K_{P1} = U_{Н} \cdot I_{Н} / (3U_1 \cdot I_1); \quad (17.48)$$

- коэффициент использования по мощности вторичной обмотки

$$K_{P2} = U_{Н} \cdot I_{Н} / (3U_2 \cdot I_2); \quad (17.49)$$

- коэффициент использования по мощности трансформатора

$$K_{PTP} = 2U_{Н} \cdot I_{Н} / [3(U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2)]. \quad (17.50)$$

Рассчитанные значения параметров занести в соответствующие графы таблицы 17.2.

17.5.4 Изобразить осциллограммы напряжения и тока в фазе трехфазных выпрямителей.

Переключатель «ВЫПРЯМИТЕЛЬ» поставить в положение «М<sub>1</sub>». К контрольным гнездам XS5-XS4, XS6-XS8 подсоединить входные щупы двухлучевого осциллографа. Переключатель «ФИЛЬТР» поочередно поставить в положение «Lin», «L», «C». На максимальном токе нагрузки, устанавливаемом резистором «НАГРУЗКА» в пределах шкалы амперметра PА3, для каждого положения переключателя «ФИЛЬТР» зарисовать осциллограммы напряжения и тока с отображением фазовых соотношений между сигналами.

Переключатель «ВЫПРЯМИТЕЛЬ» поставить в положение «Л<sub>2</sub>» и повторить указанные выше операции.

Форма графического оформления осциллограмм напряжения и тока трехфазного выпрямителя приведена на рисунке 17.17.

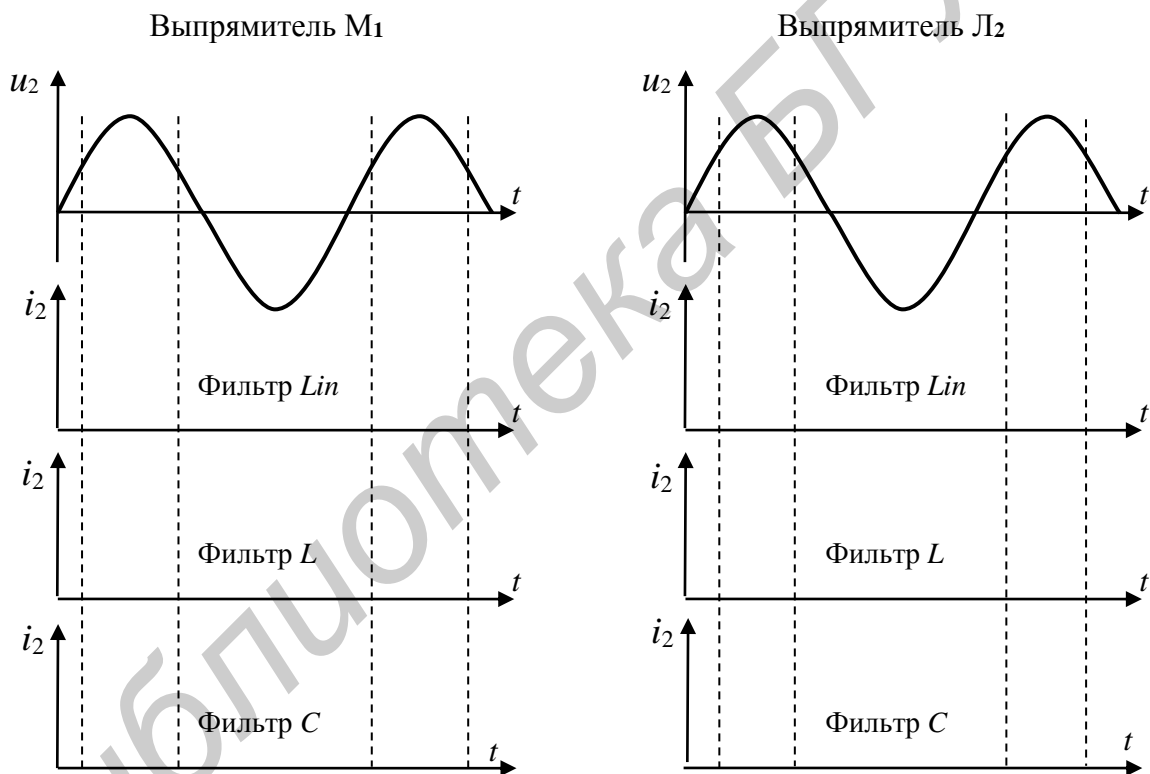


Рисунок 17.17 – Осциллограммы напряжения и тока трехфазного выпрямителя

По осциллограммам тока при емкостном сглаживающем фильтре определить угол отсечки тока по формуле

$$\theta = \frac{n \cdot 360^\circ}{2p}, \quad (17.51)$$

где  $n$  – длительность импульса тока (в клетках по шкале осциллографа);

$p$  – расстояние между импульсами тока (в клетках по шкале осциллографа).

### 17.6 Завершение работы

Ручкой резистора «НАГРУЗКА» установить минимальное значение тока нагрузки.

Доложить преподавателю о выполнении работы и показать результаты измерений.

С разрешения преподавателя отключить лабораторную установку тумблером «СЕТЬ» на лицевой панели.

Отсоединить от лабораторной установки входные щупы осциллографа и отключить его.

### 17.7 Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Принципиальная схема лабораторной установки.

3 Таблицы с результатами измерений и расчетов.

4 Графики зависимостей  $U_H = f(I_H)$ ,  $K_{\text{ПН}} = f(I_H)$  для всех исследованных схем выпрямителей при чисто активной нагрузке и применении различных сглаживающих фильтров.

5 Зарисованные осциллограммы пульсаций выходного напряжения выпрямителей.

6 Параметры трехфазного трансформатора.

7 Краткая характеристика результатов работы и выводы по ней.

### 17.8 Контрольные вопросы

1 Какие схемы применяются в многофазных выпрямителях?

2 Как работают многофазные схемы выпрямления?

3 Покажите контур прохождения тока в каждой из изученных схем.

4 Как и зачем строятся временные диаграммы токов и напряжений?

5 Почему и как влияет характер нагрузки на форму токов в выпрямителе?

6 Какова частота пульсаций в изучаемых схемах?

7 Как определяются основные соотношения между токами и напряжениями в схемах выпрямления?

8 Сравните многофазные схемы выпрямления по основным показателям.

9 Укажите области применения различных схем выпрямления.

## Литература

1 Иванов-Цыганов, А. И. Электропреобразовательные устройства РЭС / А. И. Иванов-Цыганов. – М. : Высш. шк., 1999.

2 Березин, О. К. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры / О. К. Березин, В. Г. Костиков, В. А. Шахнов. – М. : Три Л., 2000.

3 Китаев, В. Е. Расчет источников электропитания устройств связи / В. Е. Китаев, А. А. Бокуняев, М. Ф. Калканов. – М. : Радио и связь, 1983.

Библиотека БГУИР

## Содержание

Лабораторная работа №14. Однофазные выпрямители с различными сглаживающими фильтрами.....	3
Лабораторная работа №15. Однофазные выпрямители с умножением напряжения.....	19
Лабораторная работа №16. Однофазный управляемый выпрямитель...	31
Лабораторная работа №17. Многофазные выпрямители.....	46

Библиотека БГУИР

*Учебное издание*

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И  
ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

В 4 частях

Часть 3

**Климович Владимир Викторович  
Машара Георгий Георгиевич  
Шатило Николай Иванович**

**ВЫПРЯМИТЕЛИ**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

Редактор *М. А. Зайцева*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная правка, оригинал-макет *А. А. Лущикова*

Подписано в печать 10.12.2014. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Гаймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 100 экз. Заказ 156.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.  
220013, Минск, П. Бровки, 6