



СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФИЛИАЛ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И
ИНФОРМАТИКИ»

Кафедра: «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

"ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ДИОДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ"

Методическое руководство
по лабораторной работе

Ростов-на-Дону
2019 г.

Ершов В.В.

«ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ДИОДНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ»

Методическое руководство по лабораторной работе

Руководство предназначено для выполнения экспериментальных исследований однофазных диодных полупроводниковых выпрямителей для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи.

Рассмотрено и одобрено на заседании
кафедры ИТСС
Протокол № 1 от 26.08.2019 г.

Лабораторная работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ДИОДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: 1. Углубить и закрепить теоретические знания по устройству и принципу действия схем однофазного выпрямления.

2. Обучить студентов методам экспериментальных исследований основных схем выпрямления при работе на активную нагрузку и определения эксплуатационных показателей схем однофазного выпрямления.

ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Уяснить механизм протекания электромагнитных процессов в однофазных выпрямителях.

2. Определить эксплуатационные показатели исследуемых схем выпрямления.

3. Оформить бланк отчета и защитить полученные в ходе экспериментальных исследований результаты.

Основные сведения из теории

Процесс преобразования переменного тока в постоянный называется выпрямлением, а электротехнические устройства, реализующие такое преобразование, получили название выпрямителей. Наибольшее распространение в практике получили статические преобразователи переменного тока в постоянный, использующие нелинейные полупроводниковые приборы - вентили. Выпрямители могут быть построены на неуправляемых вентилях (диодах) и управляемых вентилях (тиристорах).

Работу схем выпрямителей принято характеризовать с помощью следующих показателей:

1. Коэффициента схемы – $K_{\text{СХ}}$.
2. Коэффициента обратного напряжения – $K_{\text{ОБР}}$.
3. Коэффициента формы кривой тока – $K_{\text{В}}$.
4. Коэффициента пульсаций – $K_{\text{П}}$.

В лабораторной работе проводится исследование и экспериментальное определение этих показателей для трех наиболее распространенных в практике схем однофазного выпрямления:

- однофазной однократной однополупериодной;
- двухфазной однократной двухполупериодной (схеме со средней точкой);
- однофазной двухтактной двухполупериодной (мостовой).

Рассмотрим кратко работу вышеперечисленных выпрямителей без учета влияния фильтра на их выходные параметры.

Однофазная однократная однополупериодная схема выпрямления. Энергетические параметры и показатели качества выпрямления

Простейшей из вышеперечисленных схем является однофазная однократная однополупериодная схема выпрямления (рис. 1,а).

Рассмотрим более подробно работу схемы. На рис. 1,б...г представлены графики напряжений и токов в схеме. По оси абсцисс этих графиков отложен фазовый угол ωt , где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота питающего (сетевого) напряжения. Вместо величины ωt на графиках может быть отложено текущее время t .

Известно, что условием прохождения тока через вентиль является наличие на его аноде положительного потенциала по отношению к катоду. Допустим, что положительный потенциал на аноде $VD1$ в данной схеме появляется при положительной полуволне напряжения u_2 (потенциал точки a схемы положителен, а точки b – отрицателен), следовательно, в первую половину периода диод открывается, и по цепи последовательно соединенных обмотки трансформатора, диода и резистора нагрузки R_d протекает ток

$i_2 = i_{VD} = i_d$ (рис. 1, а). Во вторую половину периода точка *a* имеет отрицательный потенциал, следовательно, диод закрывается, и ток в цепи отсутствует. Индекс *d* используется для обозначения элементов, токов и напряжений схемы на стороне постоянного тока. Этот индекс образован от английского слова “direct” – прямой.

Поскольку в идеализированной схеме выпрямления в трансформаторе и вентиле потерь нет, то в первом полупериоде все напряжение вторичной обмотки трансформатора u_2 оказывается приложенным к резистору R_d и поэтому график выпрямленного напряжения u_d повторяет положительную полуволну синусоиды графика напряжения u_2 (рис. 1, в).

Во время второго полупериода u_2 диод закрыт, а, следовательно, все напряжение вторичной обмотки трансформатора u_2 оказывается приложенным к последовательно соединенным резистору нагрузки R_d и диоду $VD1$.

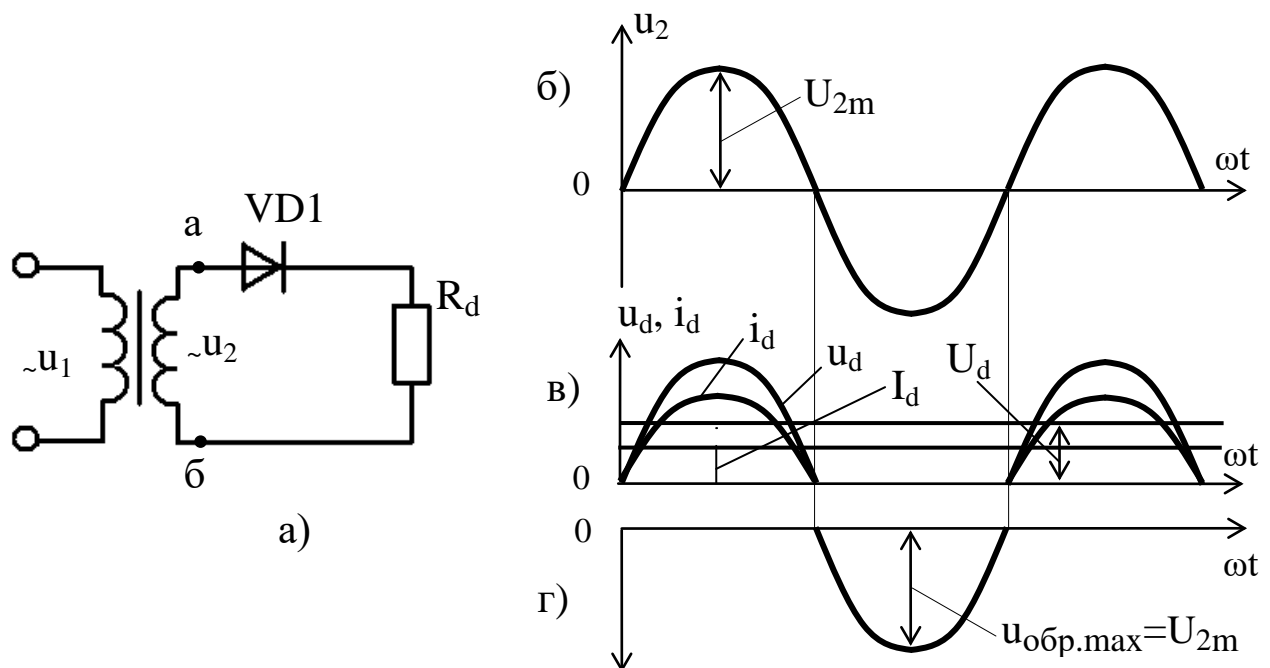


Рис. 1. Однофазная однопериодная однополупериодная схема выпрямления (а) и диаграммы напряжений и токов б...г)

Поскольку обратное сопротивление диода намного больше сопротивления резистора нагрузки R_d , то с достаточной для практики точностью сопротивлением нагрузки в данном случае можно

пренебречь; т.е. можно считать, что во время второго полупериода к зажимам диода в обратном направлении приложено напряжение $U_{\text{ОБР.}}$, график которого повторяет отрицательную полусинусоиду напряжения вторичной обмотки трансформатора u_2 (рис. 1, б, г) с амплитудой $U_{\text{ОБР.МАХ}} = U_{2m}$.

Выпрямленное напряжение U_d , как видно из рис. 1, в, является не постоянным, а пульсирующим, поскольку не изменяет своего знака. Оно содержит постоянную составляющую U_d (её получение и есть основная функция выпрямителя), и переменную составляющую, называемую пульсациями выпрямленного напряжения. В рассматриваемой схеме среднее значение выпрямленного напряжения определяется выражением

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} u_2 \cdot \omega t. \quad (1)$$

После подстановки в (2.1) $u_2 = U_{2m} \cdot \sin \omega t$ получим

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{U_{2m}}{2\pi} \cdot \left(-\cos \omega t \Big|_0^{\pi} \right) = \frac{U_{2m}}{\pi}.$$

$$U_{2m} = U_d \cdot \pi \quad (2)$$

Действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора

$$U_2 = U_{2m} / \sqrt{2} = U_d \cdot \pi / \sqrt{2} = 2,22 \cdot U_d. \quad (3)$$

Импульсное обратное напряжение, прикладываемое к вентилю, в данной схеме равно амплитудному значению вторичного напряжения, и с учетом (3) имеем

$$U_{\text{обр.мах}} = U_{2m} = U_d \cdot \pi = 3,14 U_d. \quad (4)$$

Действующее значение тока во вторичной обмотке

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_2^2 \cdot d\omega t} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_{2m}^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d\omega t}. \quad (5)$$

После интегрирования получим

$$I_2 = \frac{I_{2m}}{2}. \quad (6)$$

Учитывая, что $I_{2m} = \frac{U_{2m}}{R_d}$, и используя (4) находим

$$I_2 = I_d \cdot \pi / 2 = 1,57 \cdot I_d, \quad (7)$$

где
$$I_d = U_d / R_d = U_{2m} / R_d \pi = I_{2m} / \pi = \frac{I_{2m}}{3,14}.$$

Ток в первичной обмотке i_1 трансформатора отличается от тока во вторичной обмотке i_2 на постоянную составляющую I_d , т.е. с учетом коэффициента трансформации n , можно записать

$$i_1 = (i_2 - I_d) / n.$$

Действующее (среднеквадратичное) значение синусоидального тока в первичной обмотке

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1^2 \cdot d\omega t}$$

Подставив в это выражение $i_1 = (i_2 - I_d) / n$, получим

$$I_1 = \frac{1,21 \cdot I_d}{n}, \quad (8)$$

где $n = \frac{I_2}{I_1}$ - коэффициент трансформации по току.

Показатели качества выпрямления. К таким показателям относятся: коэффициент схемы $K_{сх}$, коэффициент обратного напряжения $K_{ОБР}$, коэффициент формы кривой тока вентиля K_B , коэффициент пульсаций $K_{П}$.

Поскольку все эти коэффициенты определяются через ряд отношений различных значений переменного напряжения во вторичной обмотке трансформатора к постоянной составляющей U_d выпрямленного напряжения, установим их связи в виде формул для рассматриваемой однофазной однопериодной однополупериодной схемы выпрямления с учетом соотношения (2).

Выпрямленное напряжение U_d согласно рис. 1, г является полусинусоидой за полупериод $T/2$ (или в пределах $0 - \pi$ по фазовому углу); его значение определяется из соотношения

$$U_d = \frac{U_2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} = 0,45 \cdot U_2.$$

Запишем формулы связи напряжений для данной схемы выпрямления (без вывода):

$$\left. \begin{aligned} U_d &= 0,45 \cdot U_2; \\ U_2 &= 2,22 \cdot U_d; \\ U_{2m} &= 3,14 \cdot U_d; \\ U_{обр} &= U_{2m} = 3,14 \cdot U_d. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

С учетом этих связей запишем все коэффициенты - показатели качества выпрямления рассматриваемой схемы выпрямления.

1. Коэффициент схемы $K_{сх}$. Это есть отношение действующего значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_2 к среднему значению выпрямленного напряжения U_d

$$K_{сх} = \frac{U_2}{U_d} = \frac{2,22 \cdot U_d}{U_d} = 2,22. \quad (10)$$

Следовательно, в данной схеме выпрямления средневывпрямленное значение (постоянная составляющая) U_d невелико, в 2,22 раза меньше действующего значения напряжения вторичной обмотки трансформатора, что свидетельствует о плохом использовании этого трансформатора.

2. Коэффициент обратного напряжения $K_{ОБР}$. Это отношение обратного напряжения на вентиле к среднему значению выпрямленного напряжения

$$K_{ОБР} = \frac{U_{обр}}{U_d} = \frac{U_{2m}}{U_d} = \frac{3,14 \cdot U_d}{U_d} = 3,14. \quad (11)$$

Данный коэффициент показывает, что для рассматриваемой простейшей схемы выпрямления с одним вентилем обратное напряжение очень велико, в 3,14 раза превышает значение U_d . Это свидетельствует о том, что схема рис.1, а требует применения высокодобротных, а значит и более дорогих, полупроводниковых диодов.

3. Коэффициент формы кривой тока K_B . Этот коэффициент определяется как отношение действующего значения тока в вентиле I_{VD} к среднему значению выпрямленного тока I_d , т.е.

$$K_B = \frac{I_{VD}}{I_d}. \quad (12)$$

Действующее значение тока I_{VD} равно действующему значению тока вторичной обмотки трансформатора I_2 . Поэтому с учетом выражения (4) в соответствии с выражением (7) имеем

$$I_2 = I_{VD} = I_d \cdot \pi/2 = 1,57 I_d. \quad (13)$$

Коэффициент формы кривой тока имеет значение

$$K_B = \frac{I_{VD}}{I_d} = \frac{1,57 \cdot I_d}{I_d} = 1,57. \quad (14)$$

то есть ток в вентиле за счет пульсаций оказывается больше среднего значения I_d выпрямленного тока в 1,57 раза.

4. Коэффициент пульсации K_Π . Это наиболее широко используемый на практике показатель качества выпрямителя. Он определяется отношением амплитудного значения первой гармоники разложения в ряд Фурье кривой выпрямленного напряжения U_{d1m} к среднему значению выпрямленного напряжения U_d

$$K_\Pi = \frac{U_{d1m}}{U_d}. \quad (15)$$

При аналитических исследованиях коэффициент пульсаций определяется по результатам разложения кривой пульсаций выпрямленного напряжения в тригонометрический ряд Фурье и оценивается отношением амплитуды первой (основной) гармоники пульсаций $U_{d1m} = U_{1m}$ к U_d

$$K_{\Pi 1} = \frac{U_{1m}}{U_d}. \quad (16)$$

Для рассматриваемой схемы выпрямления, изображенной на рис. 1, а, кривая выпрямленного напряжения u_d имеет вид, показанный на рис. 1, в. Разложение ее в тригонометрический ряд согласно [2] дает результат (приняв $u_{d \max} = U_{2m}$)

$$u_d(t) = \frac{U_{d\max}}{\pi} + \frac{U_{d\max}}{2} \cdot \sin \omega t - \frac{2}{3} \cdot \frac{U_{d\max}}{\pi} \cdot \cos 2\omega t - \dots$$

Входящие в этот ряд постоянная составляющая U_d и первая гармоника (остальные не учитываются) позволяют определить U_d и U_{1m} :

$$U_d = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{\pi} = 0,45 \cdot U_2; \quad (17)$$

$$U_{1m} = \frac{U_{2m}}{2} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{2} = 0,705 \cdot U_2. \quad (18)$$

Теперь можно рассчитать коэффициент пульсаций на основе формулы (2.16)

$$K_{\pi 1} = \frac{U_{1m}}{U_d} = \frac{0,705 \cdot U_2}{0,45 \cdot U_2} = 1,57. \quad (19)$$

Такое значение $K_{\pi 1}$ является очень большим; оно свидетельствует о том, что амплитуда первой гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения в 1,57 раза больше его постоянной составляющей. Это является существенным недостатком рассматриваемой схемы выпрямления.

Отметим, что приведенные рассуждения и формулы для $K_{сх}$, $K_{ОБР}$, K_{π} справедливы и для выпрямленных токов.

Энергетические параметры схемы выпрямления. Известно, что при обычной работе трансформатора как преобразователя уровней напряжений переменного тока, его полная мощность одинакова для первичной и вторичной обмоток и равна так называемой габаритной (средней) мощности трансформатора, т.е. $S_1 = S_2 = S_{тр}$ (где S_1 ; S_2 – полные мощности обмоток).

Иное дело, когда трансформатор работает в схеме выпрямителя. Нами уже установлено, что в однофазной однопериодной схеме выпрямления выпрямленный ток i_d и ток во вторичной обмотке трансформатора i_2 – один и тот же ток, а значит его постоянная составляющая $I_d = I_2$ подмагничивает магнитопровод, что приводит к неравенству полных мощностей в обмотках, т.е. $S_1 < S_2$. В этих условиях для обеспечения на приемнике выпрямителя заданной выходной мощности S_2 нужно существенно увеличивать входную мощность трансформатора S_1 .

Габаритная мощность трансформатора определяется полусуммой полных мощностей обмоток, т.е.

$$S_{тр} = (S_1 + S_2)/2, \quad (20)$$

где $S_1=U_1 \cdot I_1$; $S_2=U_2 \cdot I_2$ – полные мощности соответственно первичной и вторичной обмоток.

Если трансформатор содержит “N” обмоток, то габаритная мощность в этом случае определяется

$$S_{\text{тр}} = (S_1 + S_2 \dots + S_N)/2.$$

Выразим для рассматриваемой схемы выпрямления полную мощность S_1 через U_d и I_d , для чего используем (2.3), (2.8) и коэффициент трансформации по напряжению

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 = n \cdot U_2 \cdot \frac{1,21}{n} \cdot I_d = 2,22 \cdot \frac{U_d}{n} \cdot 1,21 \cdot I_d \cdot n = 2,6 \cdot P_d, \quad (21)$$

где $P_d = U_d \cdot I_d$ – активная мощность, потребляемая нагрузкой.

С учетом вынужденного подмагничивания в данной схеме расчетную мощность P_1 увеличивают до значений

$$S_1 = (3,23 \dots 3,5) P_d. \quad (22)$$

Примем
$$S_1 = \frac{3,23 + 3,5}{2} \cdot P_d = 3,36 \cdot P_d.$$

Полная мощность вторичной обмотки

$$S_2 = U_2 \cdot I_2 = 2,22 \cdot U_d \cdot 1,57 \cdot I_d = 3,49 \cdot P_d. \quad (23)$$

Подставляя S_1 и S_2 в (2.21), получим

$$S_{\text{тр}} = 0,5 \cdot (3,36 \cdot P_d + 3,49 \cdot P_d) = 3,43 \cdot P_d \quad (24)$$

Из формулы (2.24) видно, что для обеспечения заданной мощности P_d на выходе выпрямителя трансформатор должен обеспечивать почти в три с половиной раза большую мощность на входе, то есть трансформатор в этой схеме выпрямления используется плохо, что является существенным недостатком рассматриваемой схемы выпрямления. Обычно оценка эффективности работы трансформатора в выпрямителе осуществляется по коэффициенту использования трансформатора $K_{\text{тр}}$, под которым понимают отношение активной мощности на выходе выпрямителя к средней (габаритной) мощности трансформатора

$$K_{\text{тр}} = \frac{P_d}{S_{\text{тр}}} = \frac{P_d}{3,43 \cdot P_d} = 0,29. \quad (25)$$

Следовательно, трансформатор одноконтурного однополупериодного выпрямителя используется только на 29%.

Для приближенной оценки этого показателя в лабораторной работе определяется активная мощность, потребляемая нагрузкой

$$P_d = U_d \cdot I_d. \quad (26)$$

Затем на основе выражений (22), (24) и (25) определяется K_{TP}

Оценим окончательно достоинства и недостатки однополупериодной однофазной схемы выпрямления.

Ее достоинства - простота и надежность. Недостатки существенные: требует добротных вентилях, велики пульсации, плохое использование трансформатора и его обмоток.

Применение - ограниченное, в маломощных ИВЭП, где низкий КПД несущественен. Используется в электроизмерительных приборах детекторной системы, в маломощных неответственных модуляторах.

Двухфазная одноконтная двухполупериодная схема выпрямления. Энергетические параметры и показатели качества выпрямления

Эта схема (рис. 2, а) представляет собой сочетание двух схем однополупериодных выпрямителей, работающих на общую активную нагрузку.

При положительной полуволне напряжения, когда потенциал точки а будет положительным, а потенциал точки б – отрицательным, диод $VD1$ будет открыт и ток протекает через диод $VD1$, резистор нагрузки R_d и верхнюю половину вторичной обмотки трансформатора в направлении, показанном сплошными стрелками. Диод $VD2$ в это время закрыт, ток через него не течет, поскольку к нему приложено обратное напряжение.

При отрицательной полуволне напряжения, когда потенциал точки б становится положительным, а точки а – отрицательным, $VD2$ открывается, а $VD1$ закрывается и ток течет через диод $VD2$, нагрузку R_d и нижнюю половину вторичной обмотки трансформатора в направлении, показанном пунктирными стрелками. Диод $VD1$ в это время находится под обратным напряжением. Таким образом, через нагрузку протекают токи в одном и том же направлении в те-

чение обеих полуволн (положительной и отрицательной) питающего напряжения.

В силу принятых ранее допущений (см. подраздел 2), можно считать, что форма выпрямленного напряжения на работающих половинках вторичной обмотки трансформатора, т.е. график u_d является огибающей положительных полусинусоид графиков u'_2 и u''_2 .

В каждую полуволну напряжения u_2 по половинам вторичной обмотки трансформатора, диоду и нагрузке протекают равные между собой токи, т.е. $i'_2 = i_{VD1} = i'_d$ и $i''_2 = i_{VD2} = i''_d$, причем ток $i_d = i'_d + i''_d$ в идеализированной схеме определяется только сопротивлением нагрузки и равен u_d / R_d . В силу этого токи i'_2 и i''_2 , протекающие по половинам вторичной обмотки трансформатора, имеют в каждый момент времени такие направления, при которых постоянные составляющие этих токов создают встречно направленные магнитные потоки. Поэтому вынужденное подмагничивание магнитопровода трансформатора в данной схеме отсутствует (рис. 2, б).

Рассмотрим более подробно форму графика $u_{обр}$. В каждую половину периода один из диодов схемы закрыт и к его электродам приложено обратное напряжение, которое определяется разностью потенциалов между анодом и катодом этого диода.

В первую половину периода (рис. 2, а) закрыт VD2. Потенциал его анода равен отрицательному потенциалу точки б, который определяется отрицательной полусинусоидой u''_2 . Катод диода VD2 в это время имеет положительный потенциал точки а (положительная полусинусоида u'_2), поскольку открыт VD1, и падение напряжения на нем в идеализированной схеме равно нулю.

Таким образом, в течение первого полупериода диод VD2 находится под обратным напряжением, равным разности потенциалов между концами вторичной обмотки трансформатора (точки а и б), и максимальное значение этой разности потенциалов равно удвоенному амплитудному значению напряжения одной из половин вторичной обмотки, т.е.

$$U_{обр.мах} = 2U_{2m},$$

что иллюстрирует нижний график (рис. 2, е).

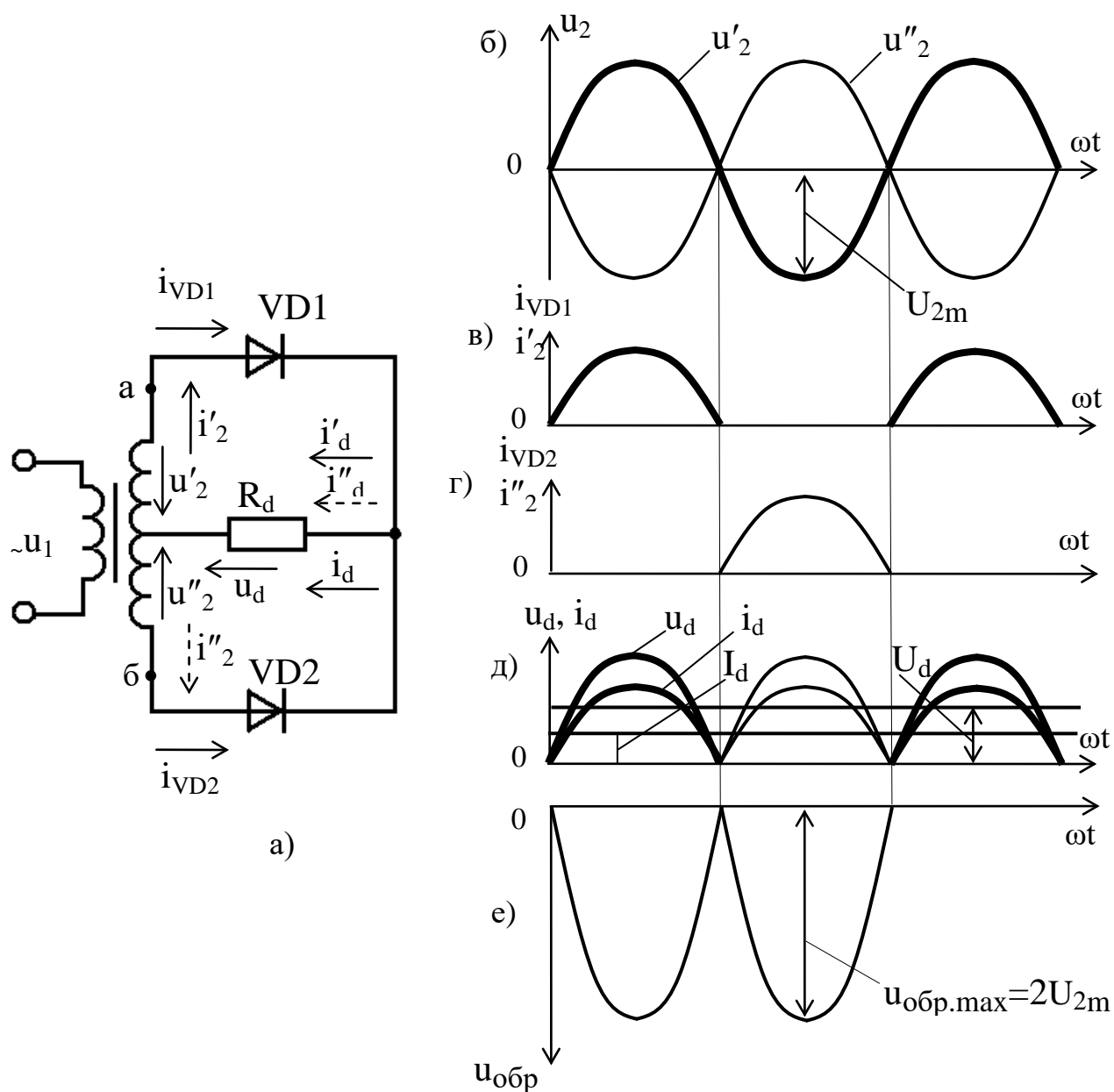


Рис. 2 Двухфазная однотоковая двухполупериодная схема выпрямления (а), диаграммы напряжений и токов (б...е)

Аналогично, во втором полупериоде изменения напряжения u_2 под таким же большим напряжением окажется диод VD1.

Большие величины обратных напряжений на вентиллях требуют использования добротных (а, значит, и более дорогих) вентиллей, что является недостатком данной схемы выпрямления.

График выпрямленного напряжения U_d и выпрямленного тока i_d данной схемы показан на рис. 2, б, из которого видно, что импульсы напряжения и тока в нагрузке двухполупериодного выпрямителя имеют место во время каждого полупериода, тогда как в однополупериодной схеме выпрямления (см. рис. 2, а) – только в течение одного полупериода.

При одинаковых амплитудах напряжения и тока вторичной обмотки U_{2m} и I_{2m} постоянные составляющие выпрямленного напряжения U_d и тока I_d будут в два раза больше, чем при однополупериодном выпрямлении, т.е.

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_2 d\omega t, \quad (27)$$

$$\text{где } u_2 = U_{2m} \cdot \sin \omega t, \quad (28)$$

$U_{2m} = U_2 \cdot \sqrt{2}$ - амплитудное значение напряжения;

U_2 – действующее значение напряжения.

Подставляя (28) в (27), получим

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \cdot \sin \omega t = \frac{2U_{2m}}{\pi} = \frac{2 \cdot 1,41}{3,14} U_2 \approx 0,9 U_2. \quad (29)$$

Имеем (без вывода) следующие соотношения и показатели качества двухфазной одноконтурной двухполупериодной схемы выпрямления (со средней точкой), изображенной на рис. 2.

$$\left. \begin{aligned} U_d &= 0,9 \cdot U_2; \quad U_2 = 1,11 \cdot U_d; \\ U_{2m} &= 1,57 \cdot U_d; \quad U_{OБР} = U_{2m} = 3,14 \cdot U_d; \\ I_2 &= 0,785 \cdot I_d. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Коэффициенты, характеризующие качество выпрямленных напряжения и тока:

$$\left. \begin{aligned} K_{CX} &= \frac{U_2}{U_d} = \frac{1,11 \cdot U_d}{0,9 \cdot U_d} = 1,23; \quad K_{OБР} = \frac{2 \cdot U_{2m}}{U_d} = \frac{3,14 \cdot U_d}{U_d} = 3,14; \\ K_B &= \frac{I_{VD}}{I_d} = 0,785. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Для рассматриваемой схемы выпрямления, изображенной на рис. 2, а, кривая выпрямленного напряжения имеет вид, показан-

ный на рис. 2, д. Разложение ее в тригонометрический ряд согласно [2] дает результат (приняв $u_{d\max} = U_{2m}$)

$$u_d(t) = \frac{2 \cdot u_{d\max}}{\pi} - \frac{4 \cdot u_{d\max}}{\pi \cdot 3} \cdot \cos 2\omega t - \frac{u_{d\max}}{\pi \cdot 15} \cdot \cos 4\omega t - \dots$$

Входящие в этот ряд постоянная составляющая U_d и первая гармоника (остальные не учитываются) позволяют определить U_d и U_{1m} :

$$U_d = \frac{2 \cdot U_{2m}}{\pi} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_2}{\pi} = 0,898 \cdot U_2; \quad (32)$$

$$U_{1m} = \frac{4 \cdot U_{2m}}{\pi \cdot 3} = \frac{4 \cdot \sqrt{2} \cdot U_2}{\pi \cdot 3} = 0,598 \cdot U_2. \quad (33)$$

Теперь можно рассчитать коэффициент пульсаций на основе формулы (2.16)

$$K_{\pi 1} = \frac{U_{1m}}{U_d} = \frac{0,598 \cdot U_2}{0,898 \cdot U_2} = 0,666. \quad (34)$$

Из (33) следует, что $K_{\pi 1}$ в данной схеме меньше, чем в предыдущей. В частности амплитуда первой гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения уже не превышает значение постоянной составляющей выпрямленного напряжения и составляет 0,666 от него. Это является достоинством данной схемы.

Коэффициент использования трансформатора K_{TP}

$$K_{TP} = \frac{P_d}{S_{mp}} = \frac{P_d}{1,48 \cdot P_d} = 0,67. \quad (35)$$

Преимущества данной схемы по сравнению с однополупериодной перечислены ниже.

1. Значительно уменьшаются габаритные размеры и масса трансформатора (вследствие отсутствия подмагничивания материала магнитопровода).

2. Амплитудное значение тока через диод вдвое меньше.

3. Значительно уменьшаются габариты и масса сглаживающего фильтра (вследствие увеличения вдвое основной частоты пульсаций первичной гармоники, т.е. $f_1 = 2f_c$, и уменьшения более чем в два раза, коэффициента пульсации).

Недостатками схемы являются:

- 1) необходимость вывода средней (нулевой) точки вторичной обмотки трансформатора;
- 2) наличие в схеме двух диодов вместо одного.
- 3) высокое обратное напряжение на диодах, что требует применения добротных вентиляей.

Однофазная двухтактная двухполупериодная (мостовая) схема выпрямления. Энергетические параметры и показатели качества выпрямления

Данная схема, называемая мостовой, как и предыдущая (со средней точкой), позволяет получить двухполупериодное выпрямление. Она содержит трансформатор и четыре диода, два из которых, соединяясь анодами, образуют общий минус выпрямителя, а два другие, соединяясь катодами, образуют общий плюс выпрямителя (рис. 3, а).

В течение первого полупериода, когда потенциал точки *а* положителен, а точки *б* - отрицателен, диоды *VD1*, *VD4* будут открыты, а диоды *VD2*, *VD3* закрыты (находятся под обратным напряжением). В результате ток на схеме пойдет в направлении, показанном сплошными стрелками.

Во втором полупериоде, когда потенциал точки *б* становится положительным, а точки *а* - отрицательным, открываются диоды *VD2*, *VD3*, а диоды *VD1*, *VD4* оказываются закрытыми и находятся под обратным напряжением. В результате ток по схеме пойдет в направлении, показанном пунктирными стрелками. Как видно из рис. 3, а, направления токов i'_d и i''_d , протекающих через нагрузку в течение обоих полупериодов, совпадают и, суммируясь, дают общий ток $i_d = i'_d + i''_d$, т.е. в схеме имеет место двухполупериодное выпрямление, как и в схеме со средней точкой (двухфазной). На рис. 3, д показаны графики выпрямленного напряжения u_d и тока i_d . В силу принятых допущений можно считать, что форма выпрямленного напряжения u_d повторяет форму напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора u_2 (рис. 3,б). Как видно из схемы, токи

i'_2 и i''_2 протекают по вторичной обмотке трансформатора в разных направлениях, и результирующий ток i_2 не содержит постоянной составляющей (рис. 3, д), поэтому вынужденное подмагничивание магнитопровода трансформатора постоянным током в данной схеме отсутствует. Ток в первичной обмотке будет синусоидальным.

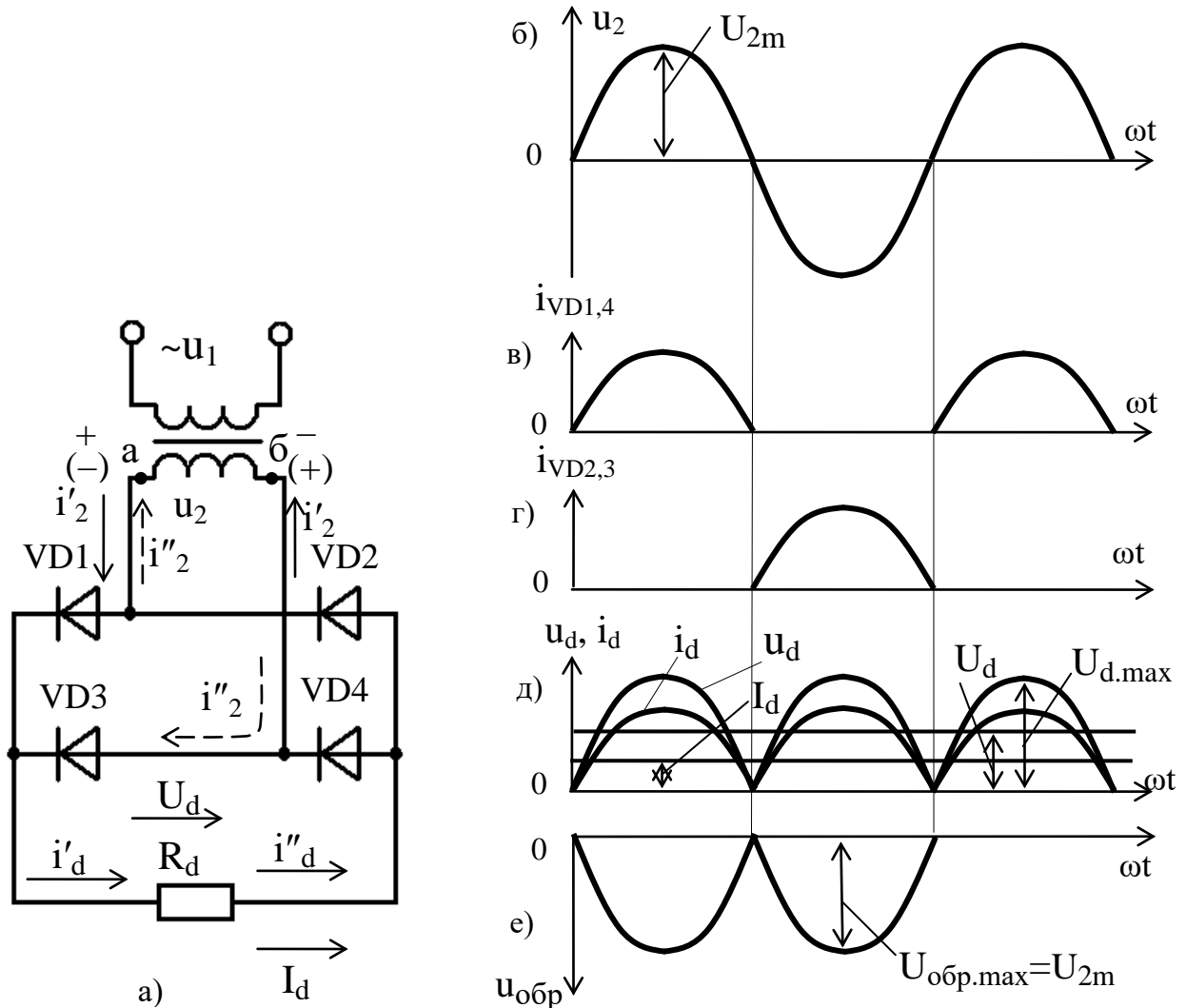


Рис. 3. Однофазная двухтактная двухполупериодная (мостовая) схема выпрямления (а), диаграммы напряжений и токов в схеме (б...е)

Так как вторичная обмотка трансформатора работает полностью в течение обеих полуолн питающего напряжения u_2 , то для получения одинаковых выпрямленных напряжений u_d в данной схеме (как и в двухфазной) достаточно, чтобы напряжение u_2 мо-

стовой схемы было равно напряжению одной из полуобмоток трансформатора двухфазной схемы. Это обуславливает вдвое меньшее число витков вторичной обмотки и вдвое меньшее $U_{обр.мах}=U_{2m}$. Однако во вторичной обмотке протекает ток i_2 , действующее значение которого I_2 больше, чем в полуобмотках двухфазной схемы, поэтому требуется применить провод большего диаметра.

Выпрямитель является двухтактным, потому что во вторичной обмотке силового трансформатора T ток имеет место, как в положительный, так и в отрицательный полупериод изменения выходного напряжения u_2 этого трансформатора. Выпрямитель является двухполупериодным, поскольку в любой полупериод изменения приложенного к схеме выпрямления напряжения u_2 напряжение на нагрузке будет иметь одну и ту же полярность, и, следовательно, ток в цепи нагрузки будет постоянным по направлению, изменяясь от нуля до некоторого максимального значения и от него опять до нуля, т.е. этот ток будет *пульсировать*. Поскольку все показатели качества выпрямителя выражаются через среднее значение выпрямленного напряжения, определим его для рассматриваемого случая.

Среднее значение выпрямленного напряжения U_d определяется выражением

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_2 d\omega t, \quad (36)$$

где $u_2 = U_{2m} \cdot \sin \omega t$,

(37)

$U_{2m} = U_2 \cdot \sqrt{2}$ - амплитудное значение напряжения;

U_2 – действующее значение напряжения.

Подставляя (37) в (36), получим

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \cdot \sin \omega t = \frac{2U_{2m}}{\pi} = \frac{2 \cdot 1,41}{3,14} U_2 \approx 0,9 U_2. \quad (38)$$

Имеем (без вывода) следующие соотношения и показатели качества однофазной двухтактной двухполупериодной (мостовой) схемы выпрямления, изображенной на рис. 3.

$$\left. \begin{aligned} U_d &= 0,9 \cdot U_2; \quad U_2 = 1,11 \cdot U_d; \\ U_{2m} &= 1,57 \cdot U_d; \quad U_{OБP} = U_{2m} = 1,57 \cdot U_d; \\ I_2 &= 1,11 \cdot I_d. \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

Коэффициенты, характеризующие качество выпрямленных напряжения и тока:

$$\left. \begin{aligned} K_{CX} &= \frac{U_2}{U_d} = \frac{1,11 \cdot U_d}{U_d} = 1,11; \quad K_{OБP} = \frac{U_{2m}}{U_d} = \frac{1,57 \cdot U_d}{U_d} = 1,57; \\ K_B &= \frac{I_{VD}}{I_d} = 0,785. \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Для рассматриваемой схемы выпрямления, кривая выпрямленного напряжения и разложение ее в тригонометрический ряд совпадают по форме и виду для двухфазной одноконтурной двухполупериодной схемы. Поэтому коэффициент пульсаций для рассматриваемой схемы выпрямления определяется также на основе формулы (16)

$$K_{П1} = \frac{U_{1m}}{U_d} = \frac{0,598 \cdot U_2}{0,898 \cdot U_2} = 0,666. \quad (41)$$

Коэффициент использования трансформатора K_{TP}

$$K_{TP} = \frac{P_d}{S_{mp}} = \frac{P_d}{1,23 \cdot P_d} = 0,81. \quad (42)$$

Для практического определения величины коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения ГОСТ устанавливает более простое отношение:

$$K_{П} = \frac{U_{d.max} - U_{d.min}}{2U_d}. \quad (43)$$

Здесь $U_{d.max}$, $U_{d.min}$ – максимальное и минимальное мгновенные значения величины выпрямленного напряжения. Их разность $U_{d.max} - U_{d.min}$ определяет размах пульсаций, а половина этой разности

$$\frac{U_{d.max} - U_{d.min}}{2}$$

дает амплитуду пульсаций. Размах пульсаций виден на экране осциллографа, поэтому его измеряют с помощью откалиброванного осциллографа, а величину U_d измеряют вольтметром. Выражением (43) пользуются в технических расчетах при определении коэффициента пульсаций.

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА И МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

С точки зрения безопасности работ, проводимых в ходе экспериментальных исследований, следует знать, что лабораторные установки конструктивно смонтированы на универсальном лабораторном столе.

На лицевых панелях выгравированы схемы исследуемых устройств и расположены органы управления. В учебной аудитории размещено два универсальных лабораторных стола. Трехфазное и однофазное напряжения к лабораторным столам подается централизованно от автоматических выключателей. На схему каждой лабораторной установки напряжение подается через соответствующий выключатель.

При проведении лабораторных работ обязательным является выполнение следующих правил:

1. Перед началом эксперимента органы управления и индикации на лицевой панели данной лабораторной установки должны быть установлены в исходное положение.
2. Включение схемы лабораторной установки допускается только с разрешения руководителя занятия.
3. Запрещается прикасаться к токоведущим частям лабораторных установок, производить переключения, не оговоренные в руководстве к данной лабораторной работе.
4. В случае поражения электрическим током необходимо:

- немедленно отключить питание лабораторной установки, а также автоматический выключатель питания всех лабораторных столов;
- освободить пострадавшего от соприкосновения с электрической цепью, обеспечив предварительно собственную безопасность;
- доложить о случившемся руководителю занятия, вызвать медицинского работника и, не дожидаясь его прибытия, без промедления приступить к оказанию первой помощи пострадавшему.

СОСТАВ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Универсальная лабораторная установка предназначена для экспериментального исследования однофазного, трехфазного и шестифазного диодных и тиристорных выпрямителей.

В состав лабораторной установки входят:

1. Лабораторный пульт.
2. Электронный осциллограф.

Лицевая панель лабораторного пульта состоит из трех составных частей: левой, центральной и правой. Левая и правая панели являются стационарными, а центральная вместе с установленными на ней элементами и платами является съемной.

На левой лицевой панели:

- выгравированы схемы трехфазного и однофазного трансформаторов с различными вариантами соединения вторичных цепей;
- размещены вольтметр PV1 и амперметр PA1, предназначенные для измерения переменных и постоянных напряжений и токов в различных точках изучаемых схем. В данной работе вольтметр PV1 измеряет действующее значение напряжения U_2 во вторичной обмотке трансформатора, а амперметр PA1 измеряет действующее значение тока I_2 в этой обмотке и тока в вентиле или группе вентилей I_{VD} ;

- установлены кнопки *зеленого* цвета ТРЕХФАЗНАЯ СЕТЬ-ВКЛ, ОДНОФАЗНАЯ СЕТЬ-ВКЛ и *красного* цвета ТРЕХФАЗНАЯ СЕТЬ-ВЫКЛ, ОДНОФАЗНАЯ СЕТЬ-ВЫКЛ.

На центральной лицевой панели выгравированы:

- схемы вентильных групп диодных трехфазных (VD1...VD12) выпрямителей;

- схемы диодов (VD13...VD16);

- схемы тиристоров (VS1, VS2);

- схемы конденсаторов (C1...C4);

На правой лицевой панели:

- выгравированы схемы электрических сглаживающих фильтров;

- размещены вольтметр PV2 и амперметр PA2, предназначенные для измерения постоянных напряжений и токов на выходе исследуемых схем выпрямления. В данной работе вольтметр PV2 измеряет среднее значение выпрямленного напряжения U_d и среднее значение выпрямленного тока на выходе исследуемых схем выпрямления.

- установлен выключатель СЕТЬ для подачи питающего напряжения на установку;

- установлены регуляторы величины сопротивления нагрузки $R_{н.грубо}$ и $R_{н.точно}$.

Приборы PV1, PA1 и PV2 имеют переключатели режима измерения для измерения переменных и постоянных напряжений и тока.

Пределы измерения приборов PV1, PA1 и PV2, PA2 переключаются автоматически в зависимости от режима измерения «переменный - постоянный» и типа подключаемого сменного блока.

Электронный осциллограф - для снятия осциллограмм выходного напряжения исследуемых выпрямителей.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Исследование однофазной однократной однополупериодной схемы выпрямления.

1.1. Собрать схему для исследования однофазной однотоковой однополупериодной схемы выпрямления (рис. 4.);

1.2. На правой лицевой панели повернуть ручку регулятора $R_{Н.ТОЧНО}$ против часовой стрелки до упора, а ручку регулятора $R_{Н.ГРУБО}$ поставить в положение «3»;

1.3. Подключить ВХОД осциллографа к гнездам 6, 7 на лицевой панели пульта. Включить осциллограф.

1.4. Представить схему на проверку преподавателю или заведующему лабораторией;

1.5. На правой лицевой панели включить выключатель СЕТЬ.

1.6. На левой лицевой панели нажать зеленую кнопку ОДНОФАЗНАЯ СЕТЬ-ВКЛ;

1.7. С помощью органов управления осциллографа получить на его экране устойчивое изображение кривой выпрямленного напряжения исследуемой схемы.

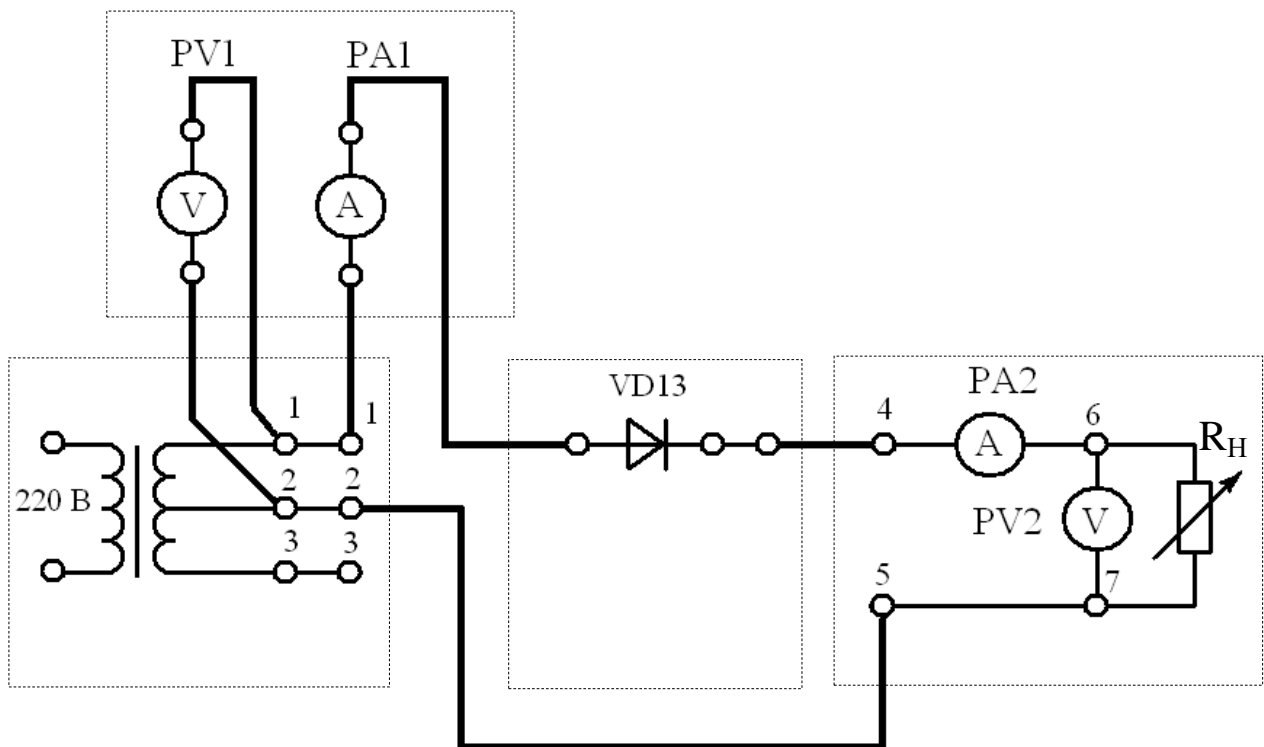


Рис. 4. Схема для исследования однофазной однотоковой однополупериодной схемы выпрямления

1.8. Занести в табл. 1. показания приборов PV1, PA1 и PV2, PA2.

1.9. По осциллограмме выходного напряжения на экране осциллографа замерить максимальное $U_{d.max}$ и минимальное $U_{d.min}$ значения выпрямленного напряжения в малых делениях шкалы. Умножить разность $U_{d.max} - U_{d.min}$ на множитель, против которого установлена ручка переключателя «V/ДЕЛ.» осциллографа. Используя выражения (17), (18) рассчитать величину постоянной составляющей и амплитудное значение первой гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения. Вычислить по формуле (19) коэффициент пульсаций K_{Π} и записать в левую часть колонки K_{Π} табл. 2.1.;

1.10. Используя данные п.п. 1.8 и 1.9, по формулам (10), (11), (12), (43) рассчитать значения коэффициентов: $K_{сх}$, $K_{обр}$, $K_{в}$ и K_{Π} и записать в табл. 1. Значение K_{Π} записать в правую часть колонки K_{Π} табл. 1. По формулам (26), (22), (23), (24) (25) рассчитать и записать в табл. 1 значение $K_{тр}$.

Таблица 1

Схема выпрям- ления	П а р а м е т р ы														
	Измеряются								Вычисляются						
	U_2 В	I_2 А	U_d В	I_d А	$U_{обр.м}$ В	I_{VD} А	$U_{d.max}$ В	$U_{d.min}$ В	U_d В	U_{1m} В	K_{Π} %	$K_{сх}$	$K_{обр}$	$K_{в}$	$K_{тр}$
ООО															
ДОД															
ОДД(мос- товая)															

1.11. Зарисовать осциллограмму выходного напряжения;

1.12. На левой лицевой панели нажать красную кнопку
ОДНОФАЗНАЯ СЕТЬ-ВЫКЛ;

1.13. На правой лицевой панели выключить выключатель
СЕТЬ;

1.14. Разобрать схему.

2. Исследование двухфазной одноконтурной двухполупериодной схемы выпрямления.

2.1.Собрать схему для исследования двухфазной одноконтной двухполупериодной схемы выпрямления (рис. 5.);

2.2. На правой лицевой панели повернуть ручку регулятора $R_{Н.ТОЧНО}$ против часовой стрелки до упора, а ручку регулятора $R_{Н.ГРУБО}$ поставить в положение «3»;

2.3. Подключить ВХОД осциллографа к гнездам 6, 7 на лицевой панели пульта. Включить осциллограф.

2.4. Представить схему на проверку преподавателю или заведующему лабораторией.

2.5. На правой лицевой панели включить выключатель СЕТЬ.

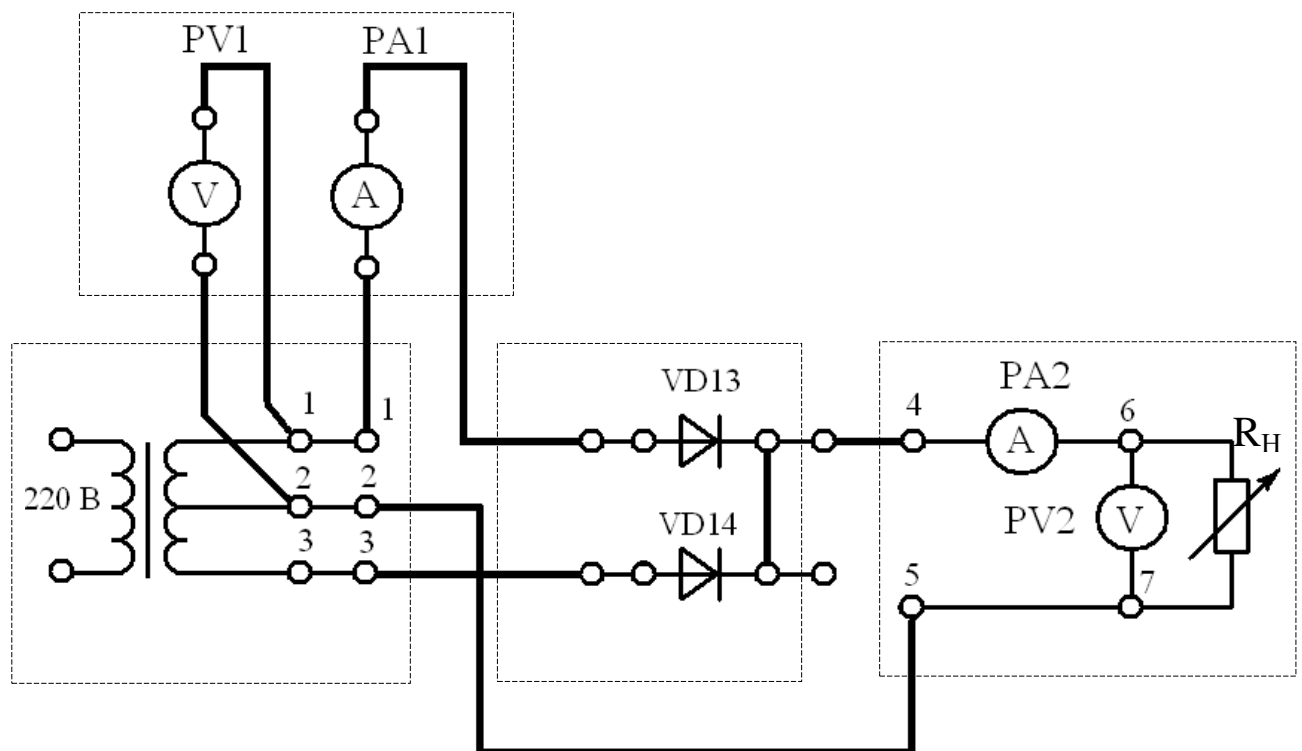


Рис. 5. Схема для исследования двухфазной одноконтной двухполупериодной схемы выпрямления

2.6. На левой лицевой панели нажать зеленую кнопку ОДНОФАЗНАЯ СЕТЬ-ВКЛ;

2.7. Выполнить п.п. 1.7...1.8.

2.8. По осциллограмме выходного напряжения на экране осциллографа замерить максимальное $U_{d.max}$ и минимальное $U_{d.min}$ значения выпрямленного напряжения в малых делениях шкалы.

Умножить разность $U_{d.max} - U_{d.min}$ на множитель, против которого установлена ручка переключателя «V/ДЕЛ.» осциллографа. Используя выражения (32), (33) рассчитать величину постоянной составляющей и амплитудное значение первой гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения. Вычислить по формуле (34) коэффициент пульсаций K_{Π} и записать в левую часть колонки K_{Π} табл. 1.;

2.9. Используя данные п.п. 2.7 и 2.8, по формулам (10), (11), (12), (43) рассчитать значения коэффициентов: $K_{СХ}$, $K_{ОБР}$, $K_{В}$ и K_{Π} и записать в табл. 1. Значение K_{Π} записать в правую часть колонки K_{Π} табл. 1.

2.10. Выполнить п.п. 1.11...1.14.

3. Исследование однофазной двухтактной двухполупериодной (мостовой) схемы выпрямления.

3.1. Собрать схему для исследования однофазной двухтактной двухполупериодной схемы выпрямления (рис. 6.);

3.2. На правой лицевой панели повернуть ручку регулятора $R_{Н.ТОЧНО}$ против часовой стрелки до упора, а ручку регулятора $R_{Н.ГРУБО}$ поставить в положение «3»;

3.3. Подключить ВХОД осциллографа к гнездам 6, 7 на лицевой панели пульта. Включить осциллограф.

3.4. Представить схему на проверку преподавателю или заведующему лабораторией.

3.5. На правой лицевой панели включить выключатель СЕТЬ.

3.6. На левой лицевой панели нажать зеленую кнопку ОДНОФАЗНАЯ СЕТЬ-ВКЛ;

3.7. Выполнить п.п. 1.7...1.8.

3.8. По осциллограмме выходного напряжения на экране осциллографа замерить максимальное $U_{d.max}$ и минимальное $U_{d.min}$ значения выпрямленного напряжения в малых делениях шкалы. Умножить разность $U_{d.max} - U_{d.min}$ на множитель, против которого установлена ручка переключателя «V/ДЕЛ.» осциллографа. Используя выражения (32), (33) рассчитать величину постоянной составляющей и амплитудное значение первой гармоники переменной со-

ставляющей выпрямленного напряжения. Вычислить по формуле (34) коэффициент пульсаций K_{Π} и записать в левую часть колонки K_{Π} табл. 1.;

3.9. Используя данные п.п. 3.7 и 3.8, по формулам (10), (11), (12), (43) рассчитать значения коэффициентов: $K_{СХ}$, $K_{ОБР}$, $K_{В}$ и K_{Π} и записать в табл. 1. Значение K_{Π} записать в правую часть колонки K_{Π} табл. 1.

3.10. Выполнить п.п. 1.11...1.14.

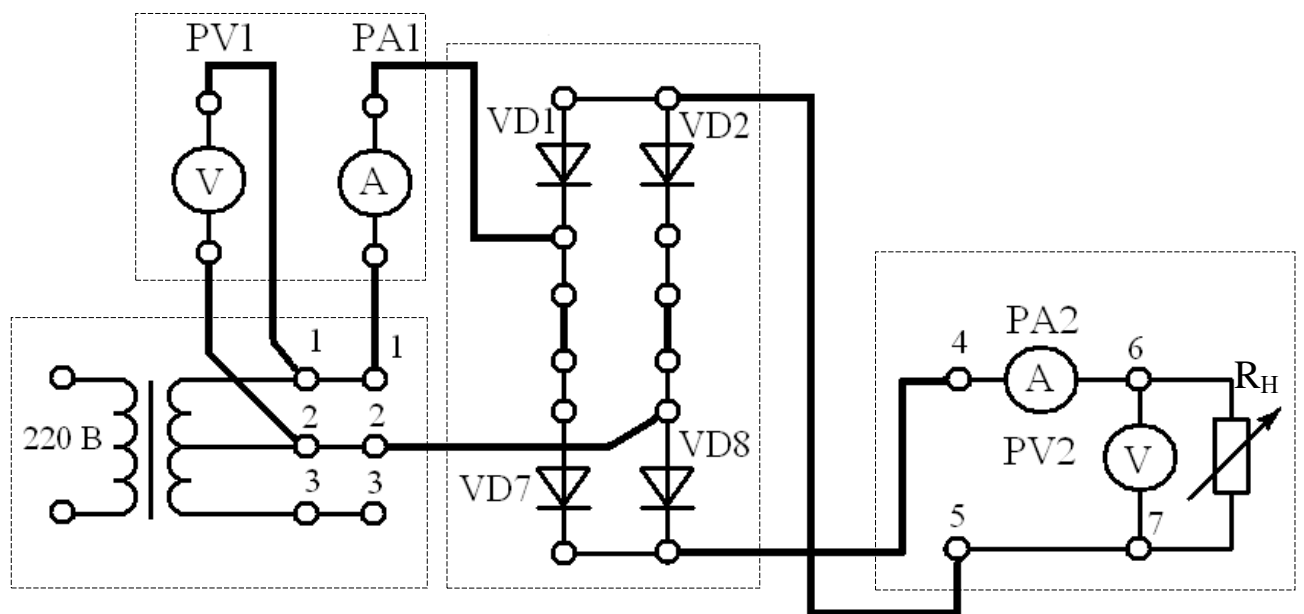


Рис. 6. Схема для исследования однофазной двухтактной двухполупериодной (мостовой) схемы выпрямления

Содержание отчета

1. Схемы электрические принципиальные исследуемых выпрямителей (Рис. 1, а, 2, а, 3, а).
2. Таблица 2.1 с результатами измерений и вычислений, осциллограммы кривых выпрямленных напряжений.
3. Выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы

1. Начертить структурную схему выпрямителя и объяснить назначение элементов схемы.

2. Перечислить показатели качества выпрямителей.

3. Классификация выпрямителей.

4. Пояснить выражение: "Однофазный двухтактный двухполупериодный выпрямитель".

5. Начертить схему однофазного мостового выпрямителя и объяснить его работу.

6. Пояснить работу двухфазной одноконтурной двухполупериодной схемы выпрямления.

7. Что называется коэффициентом пульсаций? Способы его определения?

8. Определить коэффициент обратного напряжения в однофазной одноконтурной однополупериодной схеме выпрямления, если $u_2 = 62,8 \sin \omega t$.

9. Как изменится U_d в однофазной мостовой схеме выпрямления в случае обрыва анодной цепи одного из вентилей катодной группы, если $u_2 = 31,4 \sin \omega t$?

10. Определить среднее значение выпрямленного напряжения и коэффициент обратного напряжения в однофазном мостовом выпрямителе, если $u_2 = 15,7 \sin \omega t$.

11. Определить коэффициент пульсаций в однофазном мостовом выпрямителе, если $U_{2m} = 31,4 \text{ В}$.

12. Проведите ранжирование нижеприводимых схем выпрямления по коэффициенту пульсаций:

- двухфазная одноконтурная однополупериодная;
- однофазная двухтактная двухполупериодная;
- двухфазная одноконтурная двухполупериодная

Аргументируйте свои оценки.

13. Проведите ранжирование нижеприводимых схем выпрямления по коэффициенту обратного напряжения:

- двухфазная одноконтурная однополупериодная;
- однофазная двухтактная двухполупериодная;
- двухфазная одноконтурная двухполупериодная

Аргументируйте свои оценки.

Литература

1. Бокуняев А.А. и др. "Электропитание устройств связи". Под ред. Козляева Ю.Д.-М.: Радио и связь, 1998. 328 с.
2. Электротехнический справочник. Т.1. Электротехнические материалы. – М.: Энергия, 1980. – 520 с.