

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИШНКБ ТПУ

\_\_\_\_\_ П.Ф. Баранов

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ**

Методические указания  
по выполнению лабораторной работы №4  
по курсу «Основы измерительной техники»

Томск – 2022

ББК 32.811.1я73  
УДК 621.372.037(075.8)  
Я 45

Якимов Е.В. Исследование выпрямительных вольтметров: методические указания по выполнению лабораторной работы №4 – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2022. – 15 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром отделения контроля и диагностики ИШНКБ ТПУ  
« » \_\_\_\_\_ 2022 г. протокол № \_\_\_\_\_

Руководитель ОКД ИШНКБ \_\_\_\_\_ Суржиков А.П.

*Рецензент*

Кандидат технических наук, доцент отделения  
контроля и диагностики ИШНКБ ТПУ

*Е.М. Фёдоров*

Томский политехнический университет, 2022

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1.1. Изучить устройство, принцип действия, схемы построения и характеристики выпрямительных вольтметров;
- 1.2. Исследовать влияние корректирующих конденсаторов на частотную характеристику выпрямительного вольтметра.

## 2. КРАТКИЕ ПОЯСНЕНИЯ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Высокая чувствительность, точность, малое потребление мощности выгодно отличает магнитоэлектрические приборы от других электромеханических приборов аналогичного назначения. Однако непосредственно они пригодны только в цепях постоянного тока. Для того чтобы использовать достоинства магнитоэлектрических механизмов при измерениях в цепях переменного тока, необходимо предварительно преобразовать переменный ток в постоянный.

В качестве преобразователей переменного тока в постоянный используют *выпрямительные, термоэлектрические преобразователи*, а также *преобразователи на электронных элементах* (электронных лампах, транзисторах, интегральных микросхемах и т.п.) В соответствии с этим различают *выпрямительные, термоэлектрические и электронные приборы*.

### 2.1. Общие сведения

Измеряемое переменное напряжение обычно оценивается следующими параметрами: мгновенным, амплитудным, средним, средневыпрямленным и действующим значениями.

**Амплитудное значение** (амплитуда)  $U_m$  измеряемого напряжения  $u(t)$  определяется как его наибольшее значение за период  $T$  (рис. 1.а). Для несимметричного относительно нуля напряжения вводят понятие пиковых отклонений вверх  $U_{m+}$  и вниз  $U_{m-}$  (рис.1.б). Среднее значение напряжения в этом случае определяется выражением

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) dt. \quad (1)$$

**Средневыпрямленное значение**  $U_{cp.выпр.}$  (рис. 1.в) определяется как постоянная составляющая напряжения  $u(t)$  после его выпрямления:

$$U_{cp.выпр.} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |u(t)| dt. \quad (2)$$

Для напряжения одной полярности среднее и средневыпрямленное значения равны. Для разнополярных напряжений эти значения могут существенно отличаться друг от друга.

Так для гармонического напряжения  $U_{cp} = 0$ , а  $U_{cp.выпр.} = \frac{2}{\pi} \cdot U_m \approx 0.637 \cdot U_m$ .

**Действующее** (эффективное или среднеквадратическое) значение напряжения оценивается выражением

$$U_{скз} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) dt}. \quad (3)$$

Между амплитудным, действующим и средневыпрямленным значениями напряжения определённой формы могут быть установлены связи через коэффициент амплитуды и коэффициент формы

$$k_a = \frac{U_m}{U_{скз}}, \quad k_\phi = \frac{U_{скз}}{U_{cp.выпр.}}. \quad (4)$$

Значения коэффициентов для напряжений различной формы приведены в таблице 1.

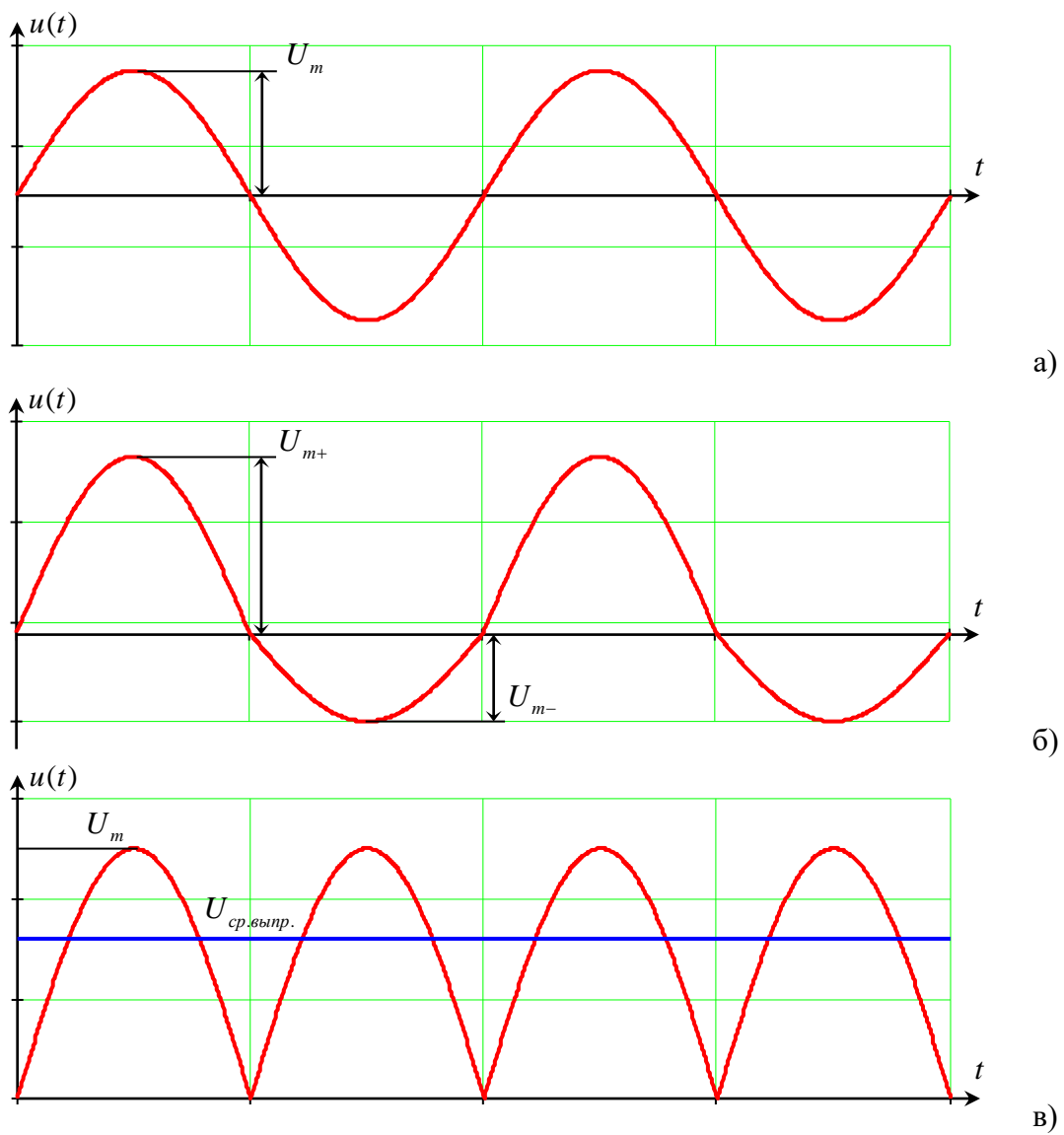
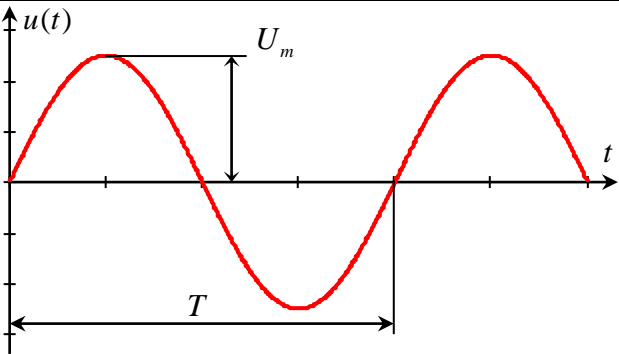
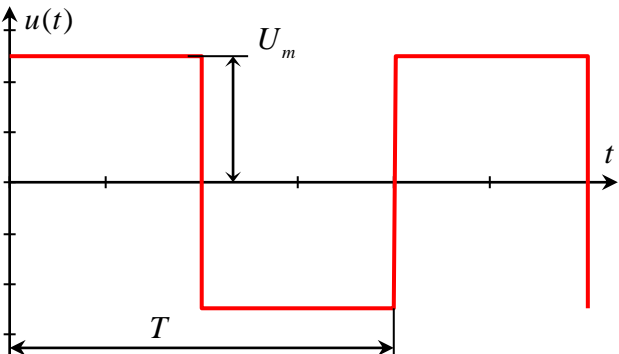
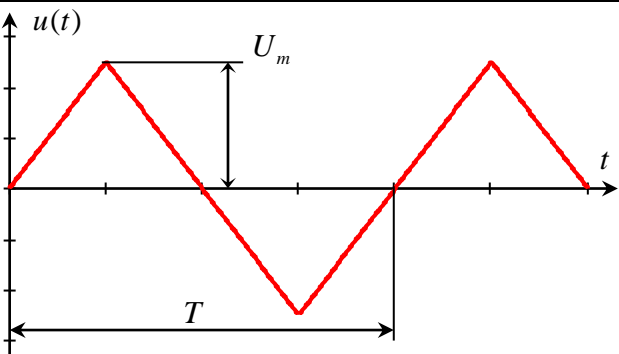
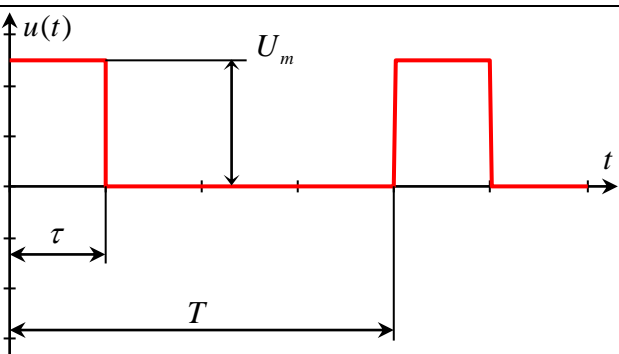


Рис. 1.

Таблица 1.

Форма переменного напряжения	$U_{скз}$	$U_{ср.выпр.}$	$k_a$	$k_\phi$
 <p>A graph showing a sine wave <math>u(t)</math> plotted against time <math>t</math>. The peak voltage is labeled <math>U_m</math> and the period is labeled <math>T</math>.</p>	$\frac{U_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{2}{\pi} \cdot U_m$	$\sqrt{2}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$
 <p>A graph showing a square wave <math>u(t)</math> plotted against time <math>t</math>. The peak voltage is labeled <math>U_m</math> and the period is labeled <math>T</math>.</p>	$U_m$	$U_m$	1	1
 <p>A graph showing a triangular wave <math>u(t)</math> plotted against time <math>t</math>. The peak voltage is labeled <math>U_m</math> and the period is labeled <math>T</math>.</p>	$\frac{U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{2} \cdot U_m$	$\sqrt{3}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$
 <p>A graph showing a pulse-width modulated (PWM) signal <math>u(t)</math> plotted against time <math>t</math>. The peak voltage is labeled <math>U_m</math>, the period is labeled <math>T</math>, and the pulse width is labeled <math>\tau</math>.</p>	$U_m \cdot \sqrt{\frac{\tau}{T}}$	$U_m \cdot \frac{\tau}{T}$	$\sqrt{\frac{T}{\tau}}$	$\sqrt{\frac{T}{\tau}}$

## 2.2. Выпрямительные вольтметры

В соответствии с измеряемым параметром напряжения различают вольтметры амплитудного (пикового), среднего, средневыпрямленного и действующего (эффективного) значений.

В данной лабораторной работе рассматриваются вольтметры средневыпрямленного значения, которые представляют собой сочетание выпрямительного преобразователя и магнитоэлектрического механизма с отсчётным устройством.

В качестве выпрямительных преобразователей в этих приборах используют преимущественно полупроводниковые диоды (германиевые или кремниевые). Наибольшее распространение получили точечные кремниевые диоды, которые имеют малую собственную ёмкость (несколько пикофарад) и могут работать в широком диапазоне частот: от низких (0 – 50 Гц) до высоких (10 – 100 кГц). Недостатком полупроводниковых диодов, как выпрямительных преобразователей, является нелинейность вольтамперной характеристики, её нестабильность во времени и зависимость от температуры и частоты.

Выпрямительные свойства диодов характеризуют коэффициентом выпрямления

$$k_B = \frac{I_{\text{ПП}}}{I_{\text{ОБР}}} = \frac{R_{\text{ОБР}}}{R_{\text{ПП}}}, \quad (5)$$

где  $I_{\text{ПП}}$ ,  $I_{\text{ОБР}}$  – токи, протекающие через диод соответственно в прямом и обратном направлениях;

$R_{\text{ПП}}$ ,  $R_{\text{ОБР}}$  – соответственно прямое и обратное сопротивления диода.

Значение  $k_B$  зависит от приложенного к диоду напряжения, частоты протекающего тока и температуры окружающей среды. Он невелик при малых значениях напряжения (меньше десятых долей вольта), но быстро возрастает при повышении напряжения.

В рабочей области напряжений, частот и температур коэффициент выпрямления диодов равен  $10^2 - 10^6$ . Следует отметить, что зависимость коэффициента выпрямления от вышперечисленных факторов, а также от формы кривой измеряемого напряжения может привести к значительным погрешностям. Снижение погрешностей обычно производится путём включения температурно-частотных корректирующих элементов в цепи прибора.

В выпрямительных вольтметрах средневыпрямленных значений используют одно- и двухполупериодные схемы выпрямления.

При использовании схемы однополупериодного выпрямления, рис.2, через измерительный механизм проходит только одна полуволна переменного тока, а обратная – через диод VD1 и резистор  $R_1$ .

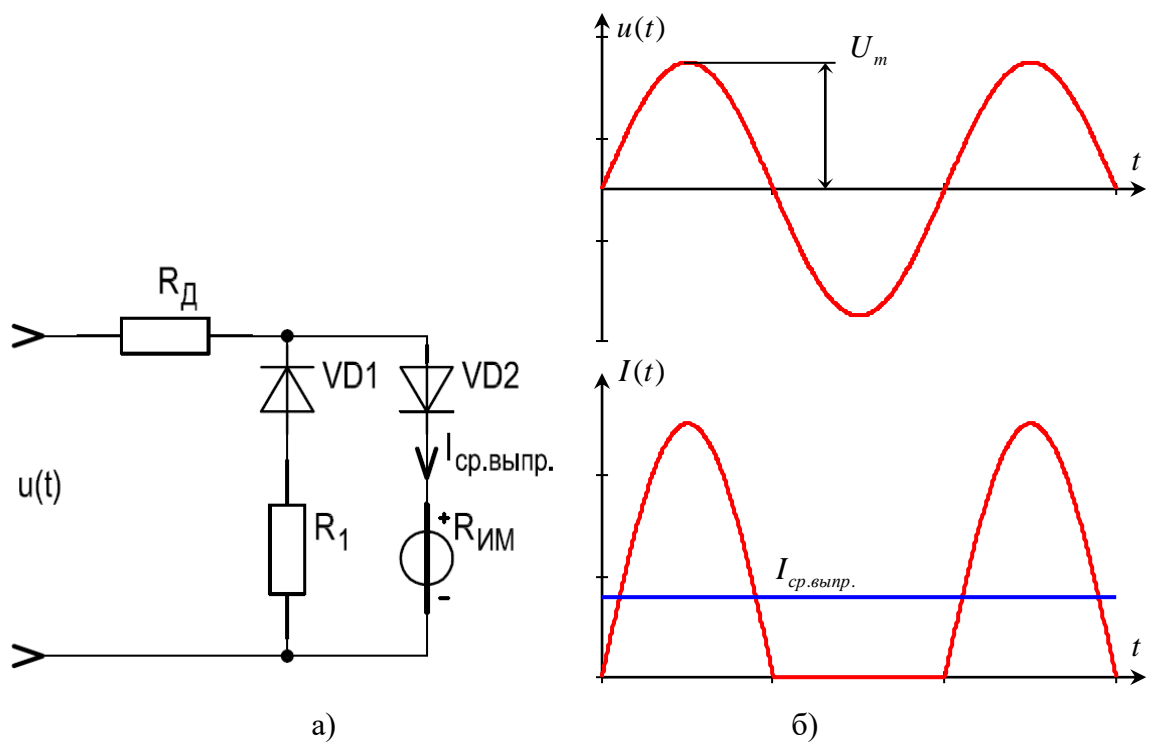


Рис. 2. Схема однополупериодного выпрямительного вольтметра (а) и временные диаграммы (б) напряжения и тока:  $R_d$  – сопротивление добавочного резистора,  $R_{ИМ}$  – сопротивление измерительного механизма,  $I_{ср.выпр.}$  – среднее значение выпрямленного тока,  $R_1$  – сопротивление симметрирующего резистора

Цепь из диода VD1 и резистора  $R_1 = R_{ИМ}$  используют для выравнивания обеих полу- волн тока в цепи источника переменного напряжения и для защиты основного диода VD2 от возможного электрического пробоя обратным напряжением.

При использовании схемы двухполупериодного выпрямления (рис. 3) выпрямленный ток проходит через измерительный механизм в обе полу-волны периода. Чувствительность этой схемы выше, чем предыдущей. В этой схеме диоды VD1 – VD4 должны иметь одинаковые параметры.

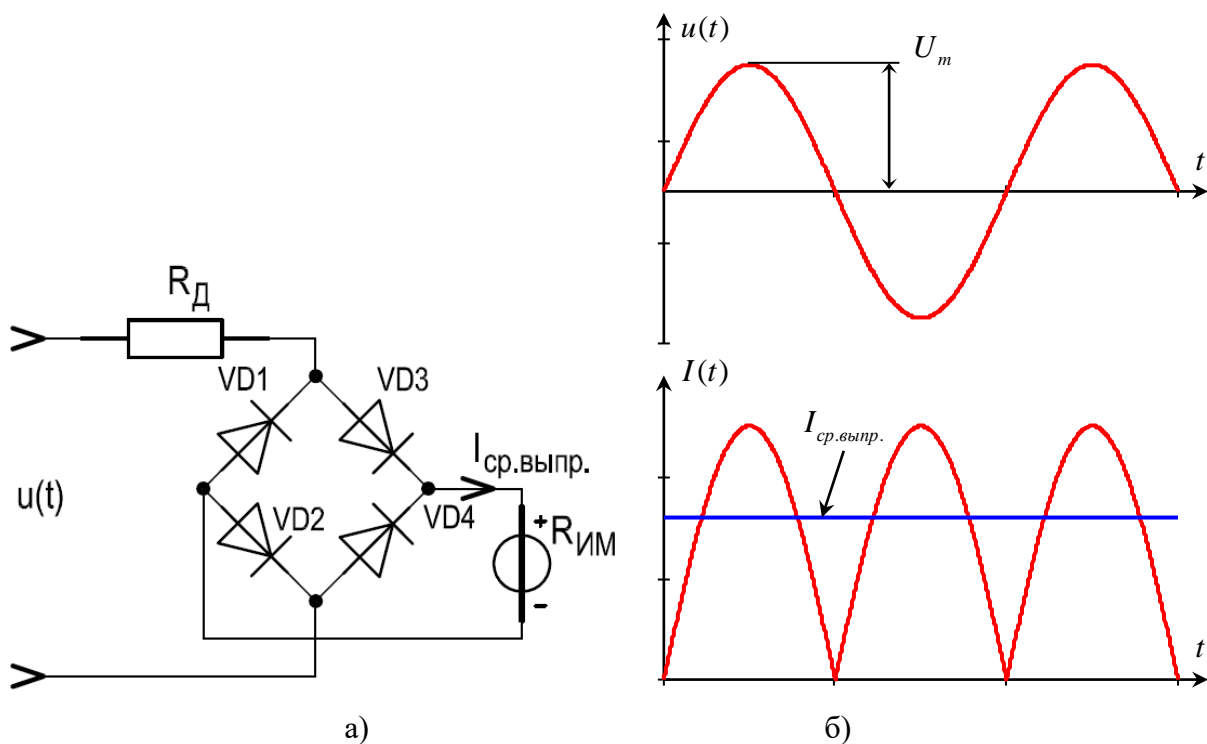


Рис. 3. Схема двухполупериодного выпрямительного вольтметра (а) и временные диаграммы (б) напряжения и тока

Выпрямительные приборы реагируют на средневыпрямленное значение тока или напряжения. Однако в практике измерений чаще важно знать не средневыпрямленное, а действующее (эффективное) значение. В этом случае шкалы таких выпрямительных приборов градуируют в действующих (эффективных) значениях синусоидального тока или напряжения путём введения при градуировке коэффициента формы ( $k_\phi = 1.11$ ).

При измерении переменных токов или напряжений, форма которых отличается от синусоидальной, возникает систематическая погрешность.

Шкала выпрямительных вольтметров, вследствие нелинейности вольтамперной характеристики диодов, в начальной части несколько сжата, но, начиная с 10 – 15 % длины шкалы имеет практически равномерный характер. Для линейаризации вольтамперной характеристики диодов применяются такие способы, как введение режима заданного тока, улучшение ключевых свойств выпрямительных цепей, смещение рабочей точки на линейный участок характеристики диодов и т.д. При любом способе линейаризации функции преобразования выпрямительных преобразователей средних значений одновременно уменьшается температурная погрешность и погрешность, обусловленная нестабильностью диодов.

Для расширения пределов измерения вольтметров по напряжению используют добавочные резисторы, значения сопротивлений которых для одно- и двухполупериодных схем выпрямления определяют соответственно из следующих выражений

$$R_D = R_\Omega \cdot \left( \frac{m}{2 \cdot k_\phi} - 1 \right), \quad (6)$$

$$R_D = R_\Omega \cdot \left( \frac{m}{k_\phi} - 1 \right), \quad (7)$$



где  $m = \frac{U_{X(\max)}}{U_{ИМ(\max)}}$ ,  $R_{\mathcal{C}} = R_{ИМ}$  ;

$U_{X(\max)}$  – предельное действующее значение измеряемого напряжения;

$U_{ИМ(\max)} = I_{ИМ(\max)} \cdot R_{ИМ}$  – номинальное среднее значение напряжения на измерительном механизме;

$I_{ИМ(\max)}$  – номинальный средний ток через механизм.

Достоинствами выпрямительных вольтметров является относительно высокая чувствительность по напряжению (0.15 – 0.2 В), малое собственное потребление мощности, широкий частотный диапазон. К недостаткам этих приборов следует отнести невысокую точность (классы точности 1.0 – 2.5) и зависимость показаний от формы кривой измеряемого переменного тока или напряжения.

### 3. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В лабораторной работе используются следующие приборы:

- магазины сопротивлений P32, P33;
- магнитоэлектрический микроамперметр M2001;
- вольтметр универсальный цифровой В7-78/1;
- цифровой осциллограф АСК-2067;
- функциональный генератор сигналов SFG-2104.

Объектами исследований в лабораторной работе являются одно- и двухполупериодные выпрямительные вольтметры. Все элементы, необходимые для сборки схем выпрямительных вольтметров, расположены на макете.

Выпрямительные преобразователи однополупериодного и двухполупериодного выпрямления выполнены соответственно на полупроводниковых диодах VD1 – VD2 и VD3 – VD6. На макете находятся также корректирующие конденсаторы, которые подключаются к добавочному резистору при помощи специальных перемычек.

При выполнении расчётов используется пакет программ Mathcad версии 2000 и выше. Отчёты по лабораторной работе необходимо представить в формате \*.doc, \*.docx или \*.pdf.

### 4. ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- 4.1. Исследовать характеристики магнитоэлектрического прибора M2001: предел по току, сопротивление, падение напряжения на рамке механизма.
- 4.2. Рассчитать и собрать выпрямительный вольтметр на базе магнитоэлектрического микроамперметра.
- 4.3. Снять и построить градуировочную характеристику выпрямительного вольтметра. Оценить погрешность от нелинейности.
- 4.4. Выполнить измерение ряда значений переменного напряжения и оценить погрешность измерения.
- 4.5. Снять и построить частотную характеристику выпрямительного вольтметра: без корректирующих конденсаторов и с корректирующими конденсаторами.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Назвать основные виды преобразователей переменного тока в постоянный.
- 5.2. Какими основными параметрами оценивают переменные напряжения?
- 5.3. Дать определения среднему и средневывпрямленному значениям переменного напряжения.
- 5.4. Что понимают под действующим значением переменного напряжения?
- 5.5. Дать определения коэффициентам амплитуды и формы периодических функций.
- 5.6. Назвать основные недостатки полупроводниковых диодов, применительно к их использованию в выпрямительных измерительных приборах.
- 5.7. Дать определение коэффициента выпрямления и перечислить основные влияющие на него факторы.
- 5.8. Изобразить схему однополупериодного выпрямительного вольтметра и пояснить назначение элементов и принцип действия.
- 5.9. Изобразить схему двухполупериодного выпрямительного вольтметра и пояснить назначение элементов и принцип действия.
- 5.10. Чем обусловлена нелинейность шкалы выпрямительного вольтметра?
- 5.11. Каким образом производят расширение пределов измерения выпрямительных вольтметров по напряжению? Привести расчётную формулу для однополупериодного вольтметра.
- 5.12. Каким образом производят расширение пределов измерения выпрямительных вольтметров по напряжению? Привести расчётную формулу для однополупериодного вольтметра.
- 5.13. Каким образом температура окружающей среды и частота измеряемого электрического сигнала влияют на показания выпрямительных приборов?
- 5.14. Каким образом производят компенсацию температурной и частотной погрешностей выпрямительных вольтметров?

## 6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ЗАДАНИЯ

### 6.1. Определение параметров магнитоэлектрического механизма.

По лицевой панели необходимо определить предел измерения  $I_{ИМ(max)}$  микроамперметра М2001: в лаборатории используются приборы с пределами 100 и 200 мкА.

Для определения сопротивления  $R_{ИМ}$  магнитоэлектрического измерительного механизма М2001 необходимо собрать схему, показанную на рис. 4.а.

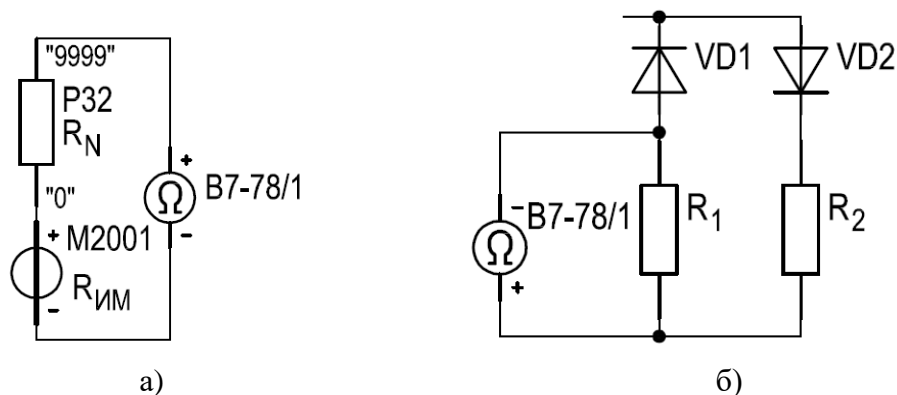


Рис. 4. Измерение сопротивления механизма М2001 (а) и резистора  $R_1$  (б)

Вольтметр В7-78/1 необходимо перевести в режим омметра и измерить суммарное сопротивление цепи  $R_{\Sigma}$ . **Особое внимание следует обратить на полярность** подключения омметра и магнитоэлектрического механизма (полярность входных клемм механизма указана на обратной стороне, рис. 5.б).

Без дополнительного резистора  $R_N$  ток через механизм М2001 будет больше, чем предел измерения, поскольку тестовый ток омметра В7-78/1 в этом случае равен 1 мА.



Рис. 5. Магнитоэлектрический механизм М2001 (а, б) и магазин сопротивлений Р32 (в)

В качестве образцового резистора  $R_N$  использовать магазин сопротивлений Р32 (или Р33), рис. 5.в. Клеммы магазина показаны символами «0» и «9999» (для магазина Р33 «99999»). Необходимо выставить сопротивление  $R_N = 8$  кОм.

Значение  $R_{ИМ}$  определяется разностью

$$R_{ИМ} = R_{\Sigma} - R_N. \quad (8)$$

Также следует измерить в соответствии с полярностью, указанной на рис. 4.б, сопротивление резистора  $R_1$ , которое понадобится при расчёте сопротивления добавочного резистора выпрямительного вольтметра.

## 6.2. Градуировка однополупериодного выпрямительного вольтметра.

Расчитать сопротивление добавочного резистора  $R_D$ , необходимое для обеспечения предела измерения однополупериодного выпрямительного вольтметра на основе микроамперметра М2001, в соответствии с выражением (6). Предел измерения  $U_{X(max)}$  задаётся преподавателем по вариантам (номер варианта соответствует номеру рабочей подгруппы).

При расчёте учесть, что сопротивление  $R_{\Sigma}$  равно эквивалентному сопротивлению параллельно подключенных сопротивлений  $R_{ИМ}$  и  $R_1$ .

Таблица 2.

Вариант	1	2	3	4	5	6
$U_{X(max)}, В$	2	3	4	5	6	7

Для экспериментального исследования собрать электрическую схему, изображённую на рис. 6, с учётом полярности магнитоэлектрического механизма.

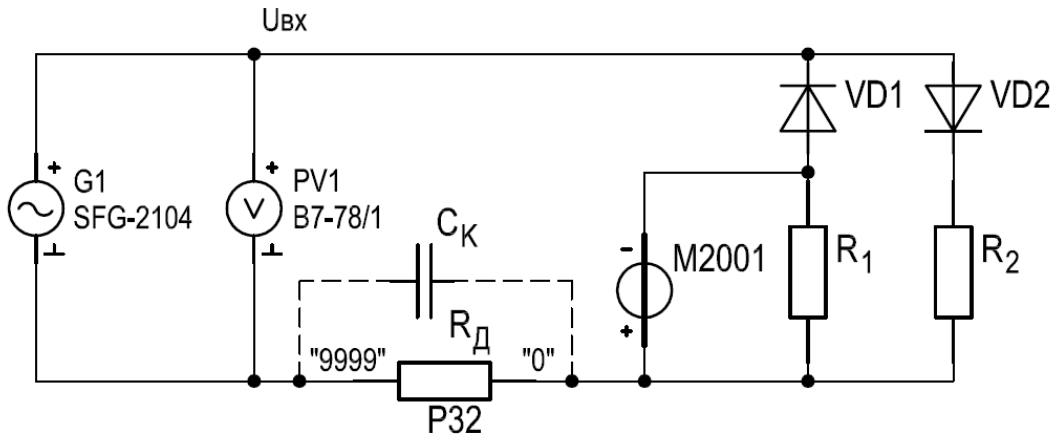


Рис. 6. Схема эксперимента для исследования однополупериодного выпрямительного вольтметра

В качестве добавочного резистора использовать магазин сопротивлений P32 (или P33).

На частоте  $f = 100$  Гц установить по образцовому вольтметру В7-78/1 напряжение на выходе генератора равное  $U_{X(\max)}$ . При этом указатель исследуемого выпрямительного вольтметра должен отклониться на полную шкалу. Если этого не произошло, подгонку показания осуществить плавной регулировкой сопротивления добавочного резистора.

Затем уменьшать значения напряжения с выхода генератора, одновременно снимая показания  $\alpha$  по шкале исследуемого выпрямительного вольтметра и  $U_0$  образцового вольтметра В7-78/1.

Полученные результаты измерений занести в таблицу 3.

Таблица 3.

$\alpha$ , дел.	0									20
$U_0$ , В	0									

Построить градуировочную характеристику  $\alpha = F[U_0]$  и оценить её нелинейность.

В качестве критерия оценки используют коэффициент нелинейности

$$K_H = \frac{tg(\beta_{\max}) - tg(\beta_{\min})}{tg(\beta_{cp})},$$

где  $tg(\beta_{\max})$ ,  $tg(\beta_{\min})$ ,  $tg(\beta_{cp})$  – соответственно тангенсы максимального, минимального и среднего углов наклона градуировочной характеристики;

$tg(\beta) = \frac{\Delta\alpha}{\Delta U_0}$  – тангенс угла наклона градуировочной характеристики, определяемый

отношением разности показаний выпрямительного вольтметра на разность показаний образцового вольтметра.

### 6.3. Исследование однополупериодного выпрямительного вольтметра.

Используя градуировочную характеристику, измерить выпрямительным вольтметром ряд напряжений  $U_x$ , соответствующих оцифрованным делениям  $\alpha$  его шкалы. Одновременно напряжение измерять образцовым вольтметром ( $U_0$ ) действующих значений В7-78/1.

Определить наибольшее значение приведённой погрешности  $\gamma_{\max}$  и оценить класс точности исследуемого выпрямительного вольтметра. Приведённая погрешность определяется выражением

$$\gamma = \frac{U_x - U_0}{U_0} \cdot 100\% .$$

Результаты эксперимента занести в таблицу 4.

Таблица 4.

№	$\alpha$ , дел.	$U_x$ , В	$U_0$ , В	$\Delta U$ , В	$\gamma$ , %
1	$0.2 \cdot \alpha_{\max}$				
2	$0.4 \cdot \alpha_{\max}$				
3	$0.5 \cdot \alpha_{\max}$				
4	$0.6 \cdot \alpha_{\max}$				
5	$0.8 \cdot \alpha_{\max}$				
6	$\alpha_{\max}$				

### 6.4. Исследование частотной характеристики однополупериодного выпрямительного вольтметра.

По показаниям исследуемого выпрямительного вольтметра установить на выходе генератора SFG-2104 напряжение, соответствующее середине диапазона показаний  $0.5 \cdot \alpha_{\max}$  и, изменяя частоту генератора  $f$  в диапазоне от 100 Гц до 1 МГц, снять показания выпрямительного вольтметра без корректирующей ёмкости. Напряжение на выходе генератора поддерживать постоянным по ходу всего эксперимента (рекомендуется при этом вместо вольтметра В7-78/1 использовать осциллограф АСК-2067 в режиме измерения размаха сигналов  $U_{p-p}$ , среднеквадратических значений  $U_{RMS}$  или курсорных измерений). Шаг по частоте рекомендуется выбирать адаптивно, ориентируясь на изменение показаний исследуемого вольтметра.

Снять аналогичные частотные характеристики с корректирующими конденсаторами  $C_{K1}$ ,  $C_{K2}$  (для этого их подключают параллельно добавочному резистору).

Результаты эксперимента занести в таблицу 5.

Построить частотные характеристики в логарифмическом масштабе по частоте ( $\alpha = F [\lg(f)]$ ) и сравнить их между собой.

Таблица 5.

$f$ , кГц		0.1							1000
без корр. ёмкости	$\alpha$ , дел.								
с корр. ёмкостью $C_{K1}$	$\alpha$ , дел.								
с корр. ёмкостью $C_{K2}$	$\alpha$ , дел.								

## 7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишмарев В.Ю. Технические измерения и приборы: учебник для вузов – 2-е изд. – М.: Академия, 2012. – 384 с.
2. Панфилов В.А. Электрические измерения. – 8-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 288 с.
3. Лачин В.И., Савёлов Н.С. Электроника: учебное пособие для вузов. – 8-е изд. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2010. – 704 с.
4. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы: аналоговые и цифровые. – К.: Вища школа, 1986. - 503 с.
5. Электрические измерения. / Под ред. А.В. Фремке, Е.М. Душина. - Л.: Энергия, 1980. – 392 с.
6. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. – М.: Дрофа, 2005. – 405 с.
7. Измерения в электронике: справочник/ Под ред. В.А. Кузнецова.- М.: Энергоатомиздат, 1987. - 512 с.
8. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника в 2 т. Т.1 – М.: ДМК Пресс, 2015. – 828 с.
9. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника в 2 т. Т.2 – М.: ДМК Пресс, 2015. – 942 с.
10. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 303 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ

Методические указания к лабораторной работе №4  
по курсу «Основы измерительной техники»

Составитель Якимов Евгений Валерьевич