

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
Институт компьютерных наук и кибербезопасности
ВШ КТиИС

Исследование силовых выпрямителей
и сглаживающих фильтров

**Методические указания к лабораторным работам по дисциплине
«Электроника и схемотехника»**

Санкт-Петербург
2025

1. Общие сведения

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

Выпрямители, как правило, используются в источнике питания постоянного тока и устанавливаются после понижающего трансформатора. Для улучшения качества выпрямленного напряжения на его выходе устанавливают сглаживающий фильтр.

Выпрямители бывают неуправляемыми и управляемыми. С помощью неуправляемых выпрямителей на выходе выпрямителя получают постоянное напряжение неизменного значения. Такие выпрямители строятся на диодах. Управляемые выпрямители применяют тогда, когда необходимо изменять значение выпрямленного тока или напряжения. Управляемые выпрямители строятся на тиристорах.

В зависимости от числа фаз первичного источника питания (сети переменного тока) различают однофазные и трёхфазные выпрямители. Выпрямители малой и средней мощности, как правило, являются однофазными, а выпрямители большой мощности – трёхфазными.

По форме выпрямления напряжения выпрямители разделяют на однополупериодные и двухполупериодные. В двухполупериодных выпрямляется оба полупериода входного переменного напряжения.

У выпрямителя бывают четыре основных вида нагрузки: активная, активно – индуктивная, активно – ёмкостная, и с противо – Э.Д.С. (когда он питает двигатель постоянного тока или зарядное устройство).

Основные характеристики выпрямителя:

1. Среднее значение выпрямленного тока и напряжения $I_{н.ср.}$ и $U_{н.ср.}$.

2. Мощность нагрузочного устройства $P_{н.ср.} = I_{н.ср.} \cdot U_{н.ср.}$.
3. Амплитуда основного выпрямленного напряжения $U_{н.ср.m.}$.
4. Действующие значения тока и напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора I_1, U_1, I_2, U_2 .
5. Типовая мощность трансформатора $S_{тр} = (S_1 + S_2)/2$, $S_1 = I_1 \cdot U_1$, $S_2 = I_2 \cdot U_2$.
6. Коэффициент полезного действия выпрямителя $\eta = S_2/P_{н.ср.}$.

В работе исследуют выпрямители двух типов: однополупериодный и мостовой двухполупериодный. Эксперименты проводят как при отсутствии, так и при наличии на выходе выпрямителей сглаживающих фильтров C или LC типа, имеющих различные параметры. Кроме того, снимают нагрузочные характеристики выпрямителей при изменении сопротивления нагрузки.

Однополупериодный выпрямитель (рис. 2.1) является простейшим выпрямителем и включает в себя один вентиль (диод или тиристор).

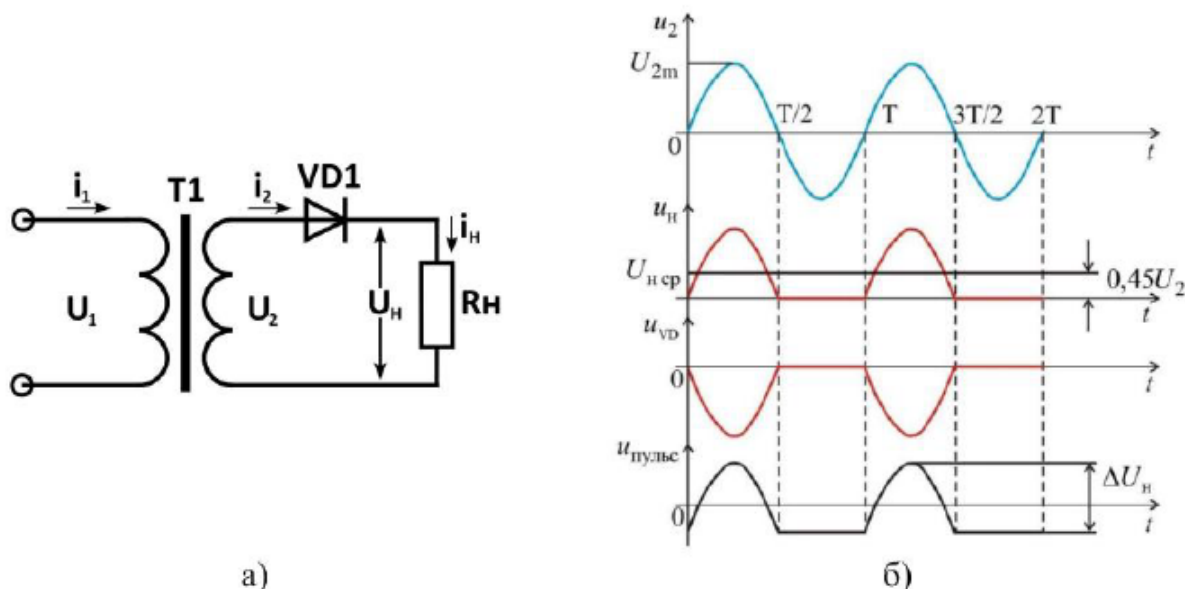


Рис. 2.1 – Схема (а) и диаграммы работы (б) однополупериодного выпрямителя

Напряжение со вторичной обмотки трансформатора проходит через вентиль на нагрузку только в положительные полупериоды переменного напряжения. В отрицательные полупериоды вентиль закрыт, всё падение

напряжения происходит на вентиле, а напряжение на нагрузке U_n равно нулю.

Среднее значение выпрямленного напряжения по отношению к подведенному действующему составит

$$U_{n\text{ ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} \cong 0,45 U_2 \quad (2.1)$$

Важно отметить, что действующее значение напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя будет в корень из 2 меньше подведенного действующего, а потребляемая нагрузкой мощность в 2 раза меньше (для синусоидальной формы сигнала).

Коэффициент пульсаций, равный отношению амплитуды основной гармоники пульсаций к среднему значению выпрямленного напряжения, для описываемой схемы однополупериодного выпрямителя равен

$$K_p = U_{\text{пульс. max}} / U_n = \pi / 2 = 1,57 \quad (2.2)$$

Однофазный мостовой выпрямитель - это двухполупериодный выпрямитель, состоящий из четырех диодов соединенных по мостовой схеме. По сравнению с однополупериодным выпрямителем он обеспечивает лучшее качество выходного напряжения, т.к. выпрямляется обе полуволны входного переменного напряжения (рис. 2.2).

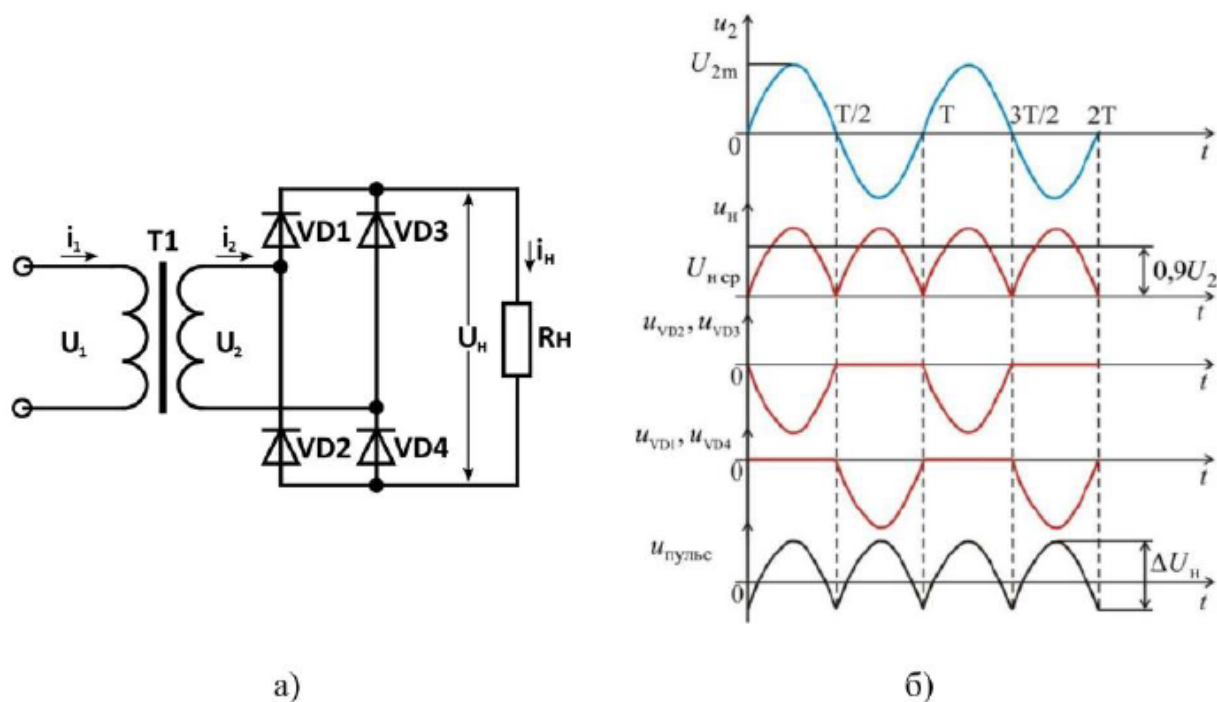


Рис. 2.2 - Схема (а) и временные диаграммы работы (б) мостового выпрямителя

Напряжение со вторичной обмотки трансформатора проходит через вентили VD1, VD4 на нагрузку в положительные полупериоды переменного напряжения, и через вентили VD2, VD3 в отрицательные.

Среднее значение выпрямленного напряжения по отношению к подведенному действующему составит

$$U_{H\text{ ср}} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \cong 0,9U_2 \quad (2.3)$$

Коэффициент пульсаций, равный отношению амплитуды основной гармоники пульсаций к среднему значению выпрямленного напряжения, для описываемой схемы мостового выпрямителя равен

$$K_{\text{п}} = U_{\text{пульс max}} / U_{H\text{ ср}} = 0,67 \quad (2.4)$$

Для снижения уровня пульсаций на выходе выпрямителя включаются разнообразные **индуктивно-емкостные фильтры**.

Важным показателем фильтра является коэффициент сглаживания

$$K_{\text{сгл}} = \frac{K_{\text{п}(1)\text{ВХ}}}{K_{\text{п}(2)\text{ВЫХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \cdot \frac{U_{m(1)\text{ВХ}}}{U_{m(1)\text{ВЫХ}}}, \quad (2.5)$$

где $K_{п(1)вх}$, $K_{п(1)вых}$ – коэффициенты пульсаций входного и выходного напряжений (по первой гармонике); $U_{вх}$, $U_{вых}$ – среднее напряжение на входе и выходе фильтра; $U_{м(1)вх}$, $U_{м(1)вых}$ – амплитуды первой гармоники напряжения на входе и выходе фильтра.

Диапазон требуемых коэффициентов пульсаций выходного напряжения $K_{пвых}$ для различного рода устройств колеблется от 0,001 до 0,5. При выборе схемы и параметров фильтра, кроме $K_{сг}$ необходимо также учитывать характер нагрузки и условия ее работы.

В маломощных выпрямителях обычно применяют простейший **емкостный фильтр**, который представляет собой конденсатор $C1$, включенный параллельно нагрузке (рис. 2.3).

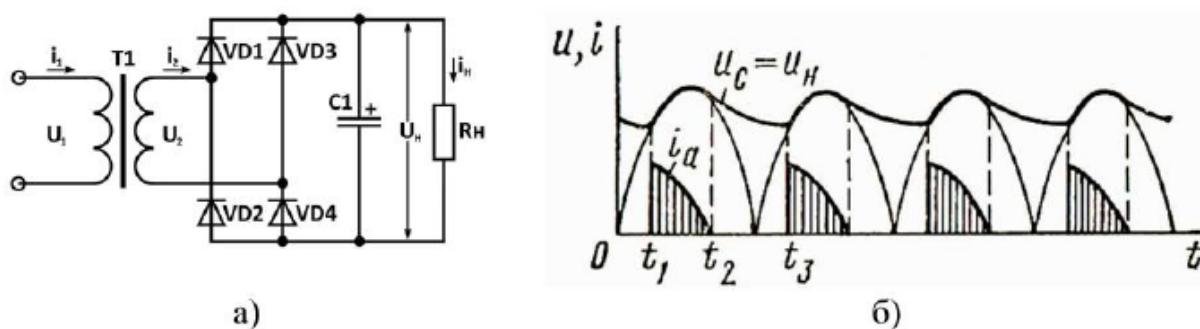


Рис. 2.3 - Схема выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром (а) и временные диаграммы работы (б)

В установившемся режиме работы, когда напряжение на входе выпрямителя $U_{вх}$ больше напряжения на нагрузке $U_{н}$ и диод выпрямителя открыт, конденсатор будет подзаряжаться, накапливая энергию, поступающую от внешнего источника. Когда же напряжение на входе выпрямителя упадет ниже уровня открывания диода и он закроется, конденсатор начнет разряжаться через $R_{н}$, предотвращая при этом быстрое падение уровня напряжения на нагрузке. Таким образом, результирующее напряжение на выходе выпрямителя (на нагрузке) будет значительно сглажено, причем тем сильнее, чем большую емкость будет иметь применяемый конденсатор.

Обычно, емкость конденсатора фильтра выбирают такой, чтобы его реактивное сопротивление было намного меньше сопротивления нагрузки ($1/\omega C \ll R_H$). В этом случае пульсации напряжения на нагрузке малы и допустимо предполагать, что это напряжение постоянно ($U_H \approx \text{const}$). Для двухполупериодных выпрямителей емкость фильтра выбирается согласно выражению

$$C_1 \geq \frac{1}{2\omega R_H K_H}, \quad (2.6)$$

где ω – круговая частота напряжения сети, питающей выпрямитель, K_H – коэффициент пульсаций выходного напряжения, R_H – сопротивление нагрузки.

В **индуктивном фильтре** выпрямленный ток протекает не импульсами, а непрерывно, что облегчает режим работы диодов и трансформатора (рис. 2.4).

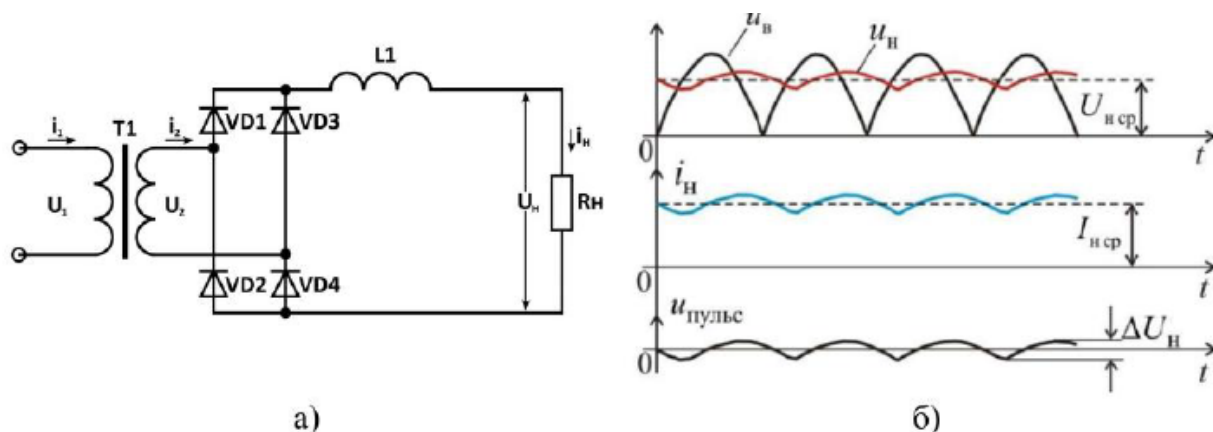


Рис. 2.4 - Схема выпрямителя с индуктивным L-фильтром (а) и временные диаграммы работы (б)

Для индуктивного фильтра однофазного двухполупериодного выпрямителя

$$L_1 \geq \frac{R_H}{3\omega K_H} \quad (2.7)$$

LC-фильтр дает еще более низкие пульсации тока и напряжения (рис. 2.5).

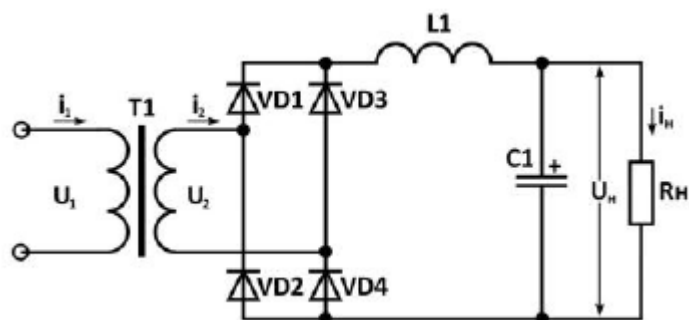


Рис. 2.5 - Схема выпрямителя с LC-фильтром

2. Порядок выполнения работы

Схема лабораторного модуля выпрямителя с фильтрами «Трансформатор. Выпрямитель. Фильтр» приведена на рис. 2.6. Переключатели $S3$, $S4$ позволяют изменить конфигурацию выпрямителя – однополупериодный или двухполупериодный, $S5$ обеспечивает наличие или отсутствие в схеме последовательной индуктивности $L1$.

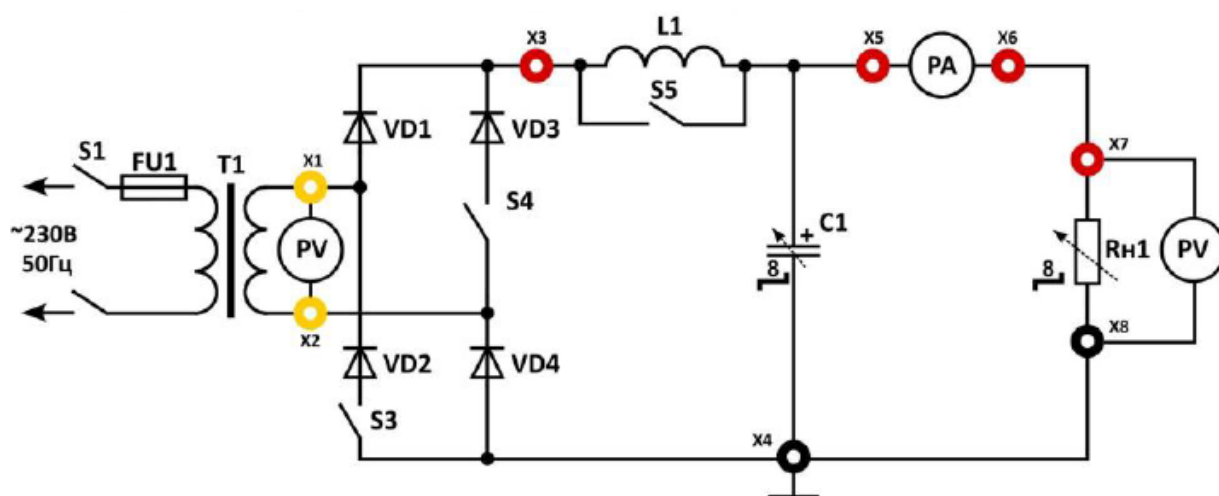


Рис. 2.6. Схема модуля выпрямителя с фильтрами

В качестве амперметра PA используют «Измеритель универсальный». Вольтметры PV – цифровые мультиметры, в которых выбирают режим измерения с учетом того, что напряжение на вторичной обмотке трансформатора $T1$ переменное, а на нагрузке $Rn1$ постоянное. В работе, также, используют модуль «Нагрузка RLC ».

2.1. Исследование однополупериодного выпрямителя

2.1.1 Исследование однополупериодного выпрямителя без сглаживающих фильтров

1. В схеме рис. 2.1 устанавливают переключатели $S3$, $S4$ в положение «ОТКЛ» (разомкнуто), $S5$ в положение «ВКЛ» (замкнуто), следовательно, индуктивность $L1$ отсутствует. Подключают резистор нагрузки $R_{н1}$, измерительные приборы и осциллограф к $R_{н1}$.

2. Устанавливают $R_{н1} = 100$ Ом, $C1 = 0$ (емкость отключена, нагрузка только активная).

3. Включают переключатель $S1$, на схему со вторичной обмотки трансформатора $T1$ поступает переменное напряжение U_2 .

4. Измеряют напряжения U_2 ($X1 \div X2$), U_H ($X7 \div X8$), ток I_H ($X5 \div X6$).

5. Определяют размах напряжения пульсаций ΔU_H на $R_{н1}$, используя курсорные измерения в осциллографе.

Методика курсорных измерений описана в руководстве по эксплуатации на осциллограф ADS-2111MV (п.4.15.16 на стр.60-61, по примеру рис.64 результат измерения амплитуды синусоидального сигнала составил $\Delta u = 220.00$ В). Данное руководство загружено на курс СДО дисциплины.

6. Результаты измерений заносят в табл. 2.1.

7. Фиксируют осциллограммы напряжений U_2 и U_H и на диоде U_{VD4} .

8. Рассчитывают коэффициент пульсаций K_p по формуле:

$$K_p = \frac{0,5 \cdot \Delta U_H}{U_H} \cdot 100\%, \quad (2.8)$$

Таблица 2.1

Экспериментальные данные для схемы однополупериодного выпрямителя без фильтра и с фильтром С-типа

$C1$, мкФ	U_2 , В	U_H , В	I_H , мА	ΔU_H , В	K_p , %
0					
22					

Продолжение табл. 2.1

47					
100					
220					
470					
680					
1000					

2.1.2 Исследование однополупериодного выпрямителя со сглаживающим фильтром С-типа при постоянной нагрузке

1. В предыдущей схеме изменяют емкость конденсатора $C1$ сглаживающего С-фильтра в пределах, указанных в табл. 2.1.
2. Измеряют напряжения U_2 , U_H и ток I_H
3. Определяют размах напряжения пульсаций ΔU_H на R_{H1} , используя курсорные измерения в осциллографе. При измерении малых пульсаций использовать в осциллографе режим входа по переменному сигналу AC .
4. Результаты измерений заносят в табл. 2.1.
5. Фиксируют осциллограммы напряжений U_H и на диоде U_{VD4} при $C1 = 100$ мкФ и $C1 = 680$ мкФ.
6. Рассчитывают коэффициент пульсаций K_H по формуле (2.1).
7. Строят графики зависимостей, отражающих влияние значения емкости $C1$ в диапазоне $(0 \div 1000)$ мкФ на работу устройства: $U_{BX} = f(C1)$ и $U_H = f(C1)$ на одном графике, $K_H = f(C1)$.

2.1.3 Исследование однополупериодного выпрямителя со сглаживающим фильтром LC-типа при постоянной нагрузке

Устанавливают переключатель $S5$ в положение «ОТКЛ» (разомкнуто), что приводит к подключению последовательной индуктивности $L1$ в схему.

Эксперименты проводят так же, как и для выпрямителя с фильтром С-типа. Результаты измерений заносят в таблицу 2.2, аналогичную таблице 2.1.

2.1.4 Исследование однополупериодного выпрямителя со сглаживающим фильтром С-типа при переменной нагрузке

1. Устанавливают переключатель $S5$ в положение «ВКЛ» (замкнуто), $C1 = 1000$ мкФ.
2. Изменяют сопротивление $R_{н1}$ в полном диапазоне ($\infty \div 100$) Ом, измеряют напряжения U_2 , U_n , ток I_n .
3. Определяют размах напряжения пульсаций ΔU_n на $R_{н1}$, используя курсорные измерения в осциллографе.
4. Результаты измерений заносят в табл. 2.3.
5. Рассчитывают коэффициент пульсаций K_n по формуле (2.1).
7. Строят графики зависимостей, отражающих влияние тока нагрузки I_n на работу устройства: $U_n = f(I_n)$, $K_n = f(I_n)$, исключая точку $I_n = 0$.

Таблица 2.3

Нагрузочная характеристика однополупериодного выпрямителя со сглаживающим фильтром С-типа

R_n , Ом	U_2 , В	U_n , В	I_n , мА	ΔU_n , В	K_n , %
∞					
1000					
800					
600					
400					
300					
200					
100					

2.1.5 Исследование однополупериодного выпрямителя со сглаживающим фильтром LC-типа при переменной нагрузке

Устанавливают переключатель $S5$ в положение «ОТКЛ» (разомкнуто).

Эксперименты проводят так же, как и для выпрямителя с фильтром C-типа. Результаты измерений заносят в таблицу 2.4, аналогичную таблице 2.3.

2. Исследование двухполупериодного выпрямителя

Переход к схеме двухполупериодного выпрямителя осуществляется установкой переключателей $S3$, $S4$ в положение «ВКЛ» (замкнуто).

Методика проведения экспериментов, обработки и представления результатов полностью аналогична методике для однополупериодного выпрямителя.

Таким образом в работе будет 8 таблиц с результатами измерений и вычислений: по 4 таблицы для схемы однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.

В выводах по работе необходимо проанализировать полученные значения коэффициентов пульсаций. Сравнить между собой данные коэффициенты в схемах:

- 1) однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей с фильтром C-типа – отсюда можно сделать вывод о том, как мостовая схема влияет на коэффициент пульсации при тех же значениях емкостей;
- 2) аналогично сравнить те же выпрямители с фильтром LC-типа.

Сделать вывод о том, как влияет сопротивление нагрузки на пульсации в схемах однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей с фильтрами C- и LC-типов.

Как влияет значение емкости на пульсации в схемах?

Какой вариант схемы наиболее предпочтителен с точки зрения уменьшения пульсаций в цепи?