

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, АВТОМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Лабораторный практикум для студентов специальностей
1-50 01 01 «Производство текстильных материалов»,
1-50 02 01 «Производство одежды, обуви и кожгалантерейных материалов»,
1-54 01 01 «Метрология, стандартизация и сертификация»
дневной и заочной форм обучения

Витебск
2022

УДК 621.3(075.08)

Составители:

С. А. Клименкова, А. М. Самусев, В. Ф. Куксевич

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 9 от 30.05.2022.

Электротехника, автоматика и автоматизация производственных процессов: лабораторный практикум / сост. С. А. Клименкова, А. М. Самусев, В. Ф. Куксевич. – Витебск : УО «ВГТУ», 2022. – 77 с.

В лабораторном практикуме изложены теоретические сведения и задания к лабораторным работам по дисциплине «Электротехника, автоматика и автоматизация производственных процессов». Издание предназначено для специальностей 1-50 01 01 «Производство текстильных материалов», 1-50 02 01 «Производство одежды, обуви и кожгалантерейных материалов», 1-54 01 01 «Метрология, стандартизация и сертификация» для дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.3(075.08)

© УО «ВГТУ», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. Исследование основных режимов работы простейшей электрической цепи постоянного тока	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. Экспериментальная проверка метода непосредственного применения законов киргофа для расчета сложных электрических цепей постоянного тока	8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. Исследование явления резонанса напряжений	14
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. Исследование трехфазной цепи при соединении фаз источника и приемника звездой	18
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. Исследование трехфазной цепи при соединении треугольником	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. Исследование режимов холостого хода и короткого замыкания однофазного трансформатора	27
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7. Исследование потенциометрических измерительных преобразователей	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8. Исследование электромагнитного усилителя	37
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9. Аналоговое измерение угла и преобразование результатов измерения в цифровой сигнал	44
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10. Изучение схем автоматического связывания нескольких асинхронных двигателей	50
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11. Тарировка первичного измерительного преобразователя давления с линейной характеристикой по уровню	56
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12. Исследование систем автоматического регулирования и управления в расчетах на ЭВМ	60
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 13. Определение качественных показателей системы регулирования	64
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 14. Исследование автоматической системы позиционного регулирования температуры теплового объекта	71
ЛИТЕРАТУРА	76

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: исследование распределения энергии на элементах простейшей электрической цепи постоянного тока при переходе от одного режима работы цепи к другому.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Электрической цепью называется совокупность устройств, предназначенных для генерирования (получения), передачи, преобразования и использования энергии электрического тока.

Составными частями электрической цепи (элементами цепи) являются:

- источники – устройства, преобразующие различные виды энергии (механическую, тепловую, ядерную, световую и др.) в электрическую энергию;
- приемники – устройства, преобразующие электрическую энергию в другие виды энергии (механическую – в электродвигателях, тепловую – в электронагревательных элементах, электрохимическую – в электролизных ваннах);
- передающие элементы – оборудование, связывающее источники и приемники (соединительные провода).

Электрические цепи бывают разветвленными и неразветвленными, линейными и нелинейными.

Рассмотрим простейшую неразветвленную линейную электрическую цепь постоянного тока (рис. 1.1). Эта цепь содержит источник электрической энергии с параметрами E (ЭДС) и r_0 (внутреннее сопротивление), приемник электрической энергии (активную нагрузку) с параметром R_n (сопротивление нагрузки) и линию электропередачи с сопротивлением $R_{л}$, соединяющую источник и приемник.

Величины U и U_n на схеме (рис. 1.1) обозначают напряжение в начале линии и на нагрузке, I – ток в электрической цепи.

Так как для данной электрической цепи сопротивление внешнего участка

$$R = R_{л} + R_n, \quad (1.1)$$

то сила тока, протекающего в цепи, определяется согласно закону Ома для полной цепи

$$I = \frac{E}{r_0 + R}. \quad (1.2)$$

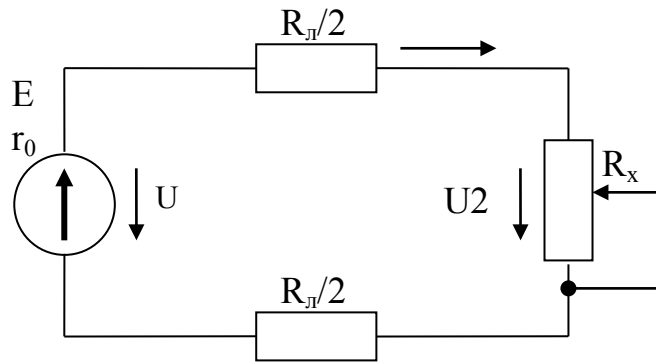


Рисунок 1.1 – Линейная электрическая цепь постоянного тока

Поскольку внутреннее сопротивление источника ЭДС обычно во много раз меньше сопротивления внешнего участка цепи, то в расчетах, не требующих большой точности, его принимают равным нулю, что позволяет считать напряжение U на зажимах источника не зависящим от тока нагрузки и равным ЭДС E источника.

Тогда ток в цепи можно определить по формуле

$$I = \frac{U}{R_{л} + R_{н}}. \quad (1.3)$$

Отсюда можно выразить соотношение между напряжениями в цепи:

$$U = I * (R_{л} + R_{н}) = I * R_{л} + I * R_{н} = U_{л} + U_{н}, \quad (1.4)$$

где $U_{л} = I * R_{л}$ – падение напряжения на сопротивлении линии.

Умножив выражение (1.4) на ток I , получим уравнение баланса мощности в цепи:

$$U * I = I^2 * R_{л} + I^2 * R_{н} = U_{л} * I + U_{н} * I \quad (1.5)$$

$$\text{или} \quad P = P_{л} + P_{н}, \quad (1.6)$$

где $P = U * I$ – мощность, отдаваемая источником в цепь,

$P_{н} = U_{н} * I$ – мощность, потребляемая приемником,

$P_{л} = U_{л} * I$ – потери мощности в линии.

Так как сопротивление нагрузки в цепи может быть как равным нулю, так и бесконечно большим, то такие параметры, как I , $U_{н}$ с изменением сопротивления $R_{н}$, будут изменяться от минимальных до максимальных

значений. Каждому режиму работы электрической цепи соответствуют определенные значения этих параметров. Из множества режимов работы характерными для любой электрической цепи являются следующие 4 режима:

1. Режим холостого хода: электрическая цепь разомкнута ($R_H = \infty$). При этом $I = 0$, $U_H = U$.

2. Режим короткого замыкания – режим работы, при котором электрическая цепь в точках 2 – 2' (рис. 1.2) замкнута накоротко ($R_H = 0$). Тогда $U_H = 0$, а ток имеет наибольшее значение:

$$I_H = \frac{U}{R_{\text{л}}} = I_{\text{max}}.$$

3. Номинальный режим – режим работы при определенных заводом-изготовителем значениях I , U , P для длительной работы данного устройства (цепи).

4. Согласованный режим – режим работы, при котором к нагрузке подводится наибольшая в сравнении с другими режимами мощность. Данный режим достигается, когда сопротивление нагрузки равно сопротивлению остальной части цепи, т. е. $R_H = R_{\text{л}}$.

Величина мощности, потребляемой при этом нагрузкой, определяется выражением

$$P_H = I^2 * R_H = \left(\frac{U}{R_H + R_{\text{л}}} \right)^2 * R_H = \frac{U^2}{4 * R_H} * R_H = P_{H \text{ max}} \quad (1.7)$$

Все вышеперечисленные режимы могут быть достигнуты путем изменения сопротивления нагрузки R_H .

Важной характеристикой любой электрической цепи является ее коэффициент полезного действия, оценивающий эффективность работы цепи и определяемый по формуле

$$\eta = \frac{P_H}{P} = \frac{U_H * I}{U * I} = \frac{U_H}{U} \quad (1.8)$$

Из (1.8) следует, что КПД электрической цепи изменяется от 1 в режиме холостого хода до 0 в режиме короткого замыкания. В согласованном режиме $\eta = 0,5$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Используя омметр, выбрать из комплекта элементов наборного поля два резистора $R1$ и $R2$ так, чтобы их суммарное сопротивление было примерно равно 500 Ом. Сопротивление данных резисторов, имитирующее сопротивление проводов линии электропередачи ($R1+R2=R_l$), указать в отчете.

2. Собрать схему по заданию преподавателя (рис. 1.2 а), реализацию в программе Electronics Workbench (рис. 1.2 б), состоящую из регулируемого источника постоянного напряжения, резисторов $R1$ и $R2$, переменного резистора R_n , являющегося нагрузкой, и измерительных приборов.

3. Исследовать схему в режиме холостого хода, для чего при отключенной нагрузке R_n в точках 2 – 2' установить заданное преподавателем значение напряжения источника U_1 . Показания приборов для данного режима занести в таблицу 1.1.

4. Подключить нагрузку к линии. Установить значение сопротивления переменного резистора $R_n = 100$ Ом и, дискретно через 100 Ом увеличивая его до 900 Ом, снять полученные данные и занести их в таблицу 1.1.

5. Рассчитать величины, содержащиеся в таблице 1.1 в графе «Вычислено».

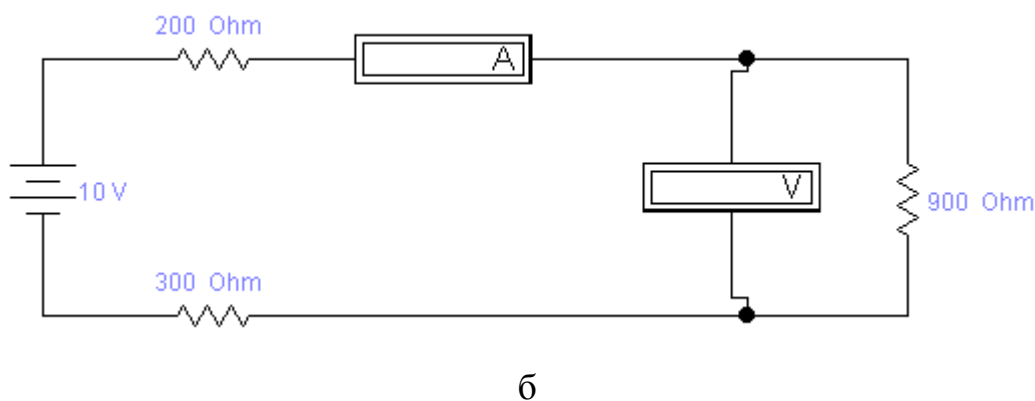
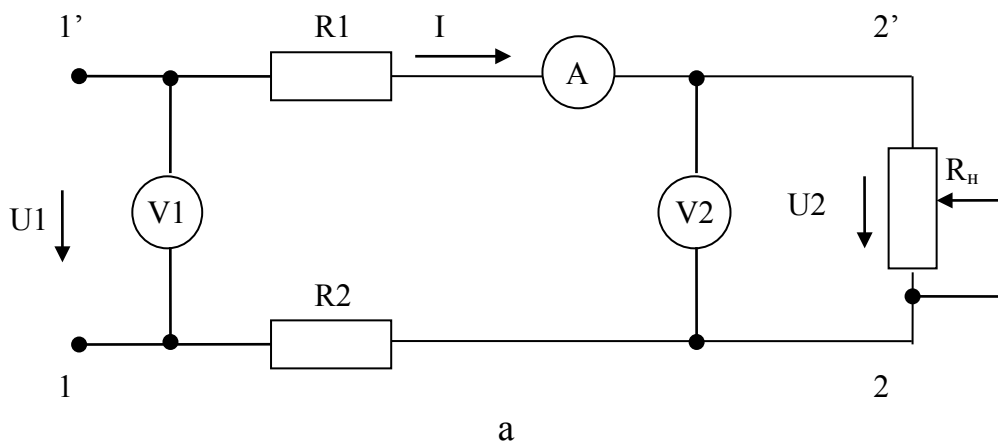


Рисунок 1.2 – Электрическая схема (а) и моделирование в программе (б)

Таблица 1.1 – Результирующие данные

№	Режим работы	Измерено			Вычислено					
		$U_{вх}, В$	$U_n, В$	$I, мА$	$U_l, В$	$P, Вт$	$P_n, Вт$	$P_l, Вт$	$R, Ом$	$\eta, \%$
1	∞	10								
2	100	10								
3	200	10								
4	300	10								
5	400	10								
6	500	10								
7	600	10								
8	700	10								
9	800	10								
10	900	10								
11	0	10								

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое электрическая цепь, из каких элементов она состоит?
2. Назовите основные элементы и параметры простейшей электрической цепи постоянного тока.
3. Составьте и объясните уравнение баланса мощности для простейшей электрической цепи постоянного тока.
4. В чем заключается режим холостого хода? Какими параметрами характеризуется электрическая цепь в данном режиме?
5. В чем заключается режим короткого замыкания? Какими параметрами характеризуется электрическая цепь в данном режиме?
6. В чем заключается номинальный режим? Какими параметрами характеризуется электрическая цепь в данном режиме?
7. В чем заключается согласованный режим? Какими параметрами характеризуется электрическая цепь в данном режиме?
8. Опишите изменение указанного преподавателем параметра электрической цепи с увеличением тока в данной цепи.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНОВ КИРГОФА ДЛЯ РАСЧЕТА СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: изучение правил расчета сложной электрической цепи постоянного тока методом непосредственного применения законов Кирхгофа и ее экспериментальное исследование.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Любая ветвь электрической цепи постоянного тока, из каких бы элементов она не состояла, может быть приведена путем преобразования к ветви, содержащей только два элемента: активный с параметром E (ЭДС) и пассивный с сопротивлением R .

Сложной электрической цепью называется цепь, содержащая две и более ветви с активными элементами (источниками электрической энергии).

Анализ сложной электрической цепи, при известной конфигурации цепи и параметрах составляющих ее элементов (R и E), сводится к нахождению токов и напряжений во всех ветвях, а также мощностей, подводимых к отдельным участкам цепи. Он может быть проведен экспериментально или решением уравнений электрического состояния цепи, составленных на основании 1-го и 2-го законов Кирхгофа.

Уравнение электрического состояния токов для узла – 1-й закон Кирхгофа – является следствием закона сохранения заряда, согласно которому в узле заряд одного знака в любой момент времени не может ни накапливаться, ни убывать. Данный закон формулируется следующим образом – сумма токов, входящих в узел электрической цепи, равна сумме токов, выходящих из этого узла, или алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (2.1)$$

В этом уравнении токи, входящие в узел, берутся с одним знаком, выходящие из узла – с противоположным.

Уравнение электрического состояния контура – 2-й закон Кирхгофа – является следствием закона сохранения энергии, согласно которому изменение потенциала в замкнутом контуре равно нулю. Определяется оно путем суммирования напряжений на отдельных участках контура с учетом их знаков. Формулируется 2-й закон Кирхгофа следующим образом – алгебраическая сумма падений напряжений на сопротивлениях контура равна алгебраической сумме ЭДС источников, входящих в данный контур.

$$\sum_{k=1}^n U_k = \sum_{i=1}^m E_i. \quad (2.2)$$

В этом уравнении напряжения и ЭДС берут со знаком “+”, если их направления совпадают с произвольно выбранным направлением обхода контура, и со знаком “-”, если их направления противоположны направлению обхода. Если падение напряжения на каждом участке выразить произведением $U = IR$, то (2.2) можно записать в виде

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^m E_i. \quad (2.3)$$

Используем схему (рис. 2.1) контура сложной электрической цепи постоянного тока для составления уравнений по законам Кирхгофа.

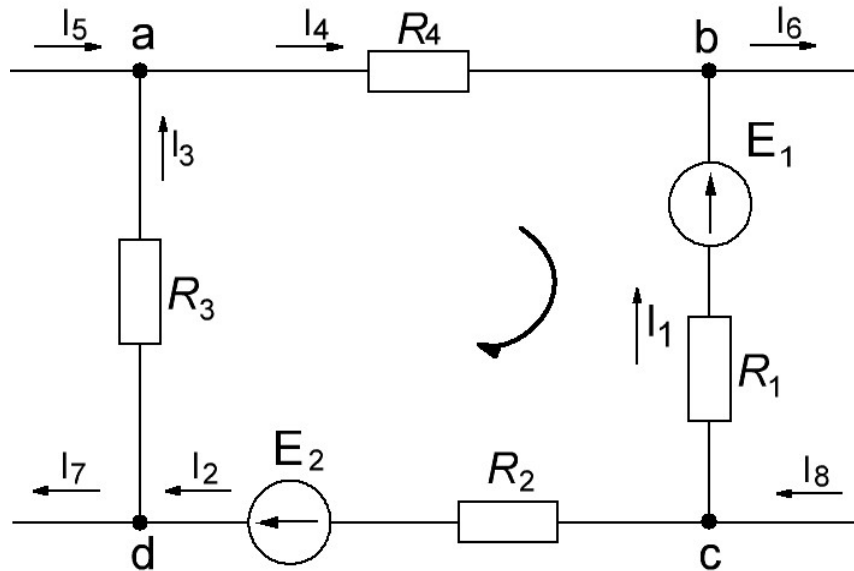


Рисунок 2.1 – Схема контура сложной электрической цепи постоянного тока

Запишем уравнение по 1-му закону Кирхгофа для узла *a*:

$$I_5 + I_3 - I_4 = 0$$

и уравнение по 2-му закону Кирхгофа для контура *abcd*, приняв направление обхода контура совпадающим с направлением вращения часовой стрелки

$$-E_1 + E_2 = -I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 + I_4 \cdot R_4.$$

Для сложной цепи постоянного тока используется несколько методов, каждый из которых основан на применении законов Кирхгофа. Рассмотрим один из методов – метод непосредственного применения законов Кирхгофа.

При использовании данного метода применяют следующий порядок расчета:

1. По возможности упрощают рассчитываемую схему, заменяя имеющиеся последовательно или параллельно соединенные резисторы одним эквивалентным.
2. Указывают на схеме известные направления ЭДС источников.
3. Так как токи неизвестны, предварительно произвольно выбирают их положительные направления и указывают их на схеме.

4. Составляют уравнения по 1-му и 2-му законам Кирхгофа. Общее число уравнений должно быть равно количеству неизвестных, т. е. количеству токов в ветвях схемы. Если цепь содержит m ветвей, то для решения задачи необходимо составить систему из m уравнений. Эти уравнения должны быть независимыми, т. е. ни одно из них не должно быть следствием других.

По 1-му закону Кирхгофа составляют $(n-1)$ уравнение, где n – количество узлов в схеме (в случае составления n уравнений одно из них будет являться следствием суммирования остальных). По 2-му закону Кирхгофа составляют $m-(n-1)$ уравнений для независимых контуров схемы. Независимым считается контур, включающий в себя хотя бы одну ветвь, не принадлежащую другим контурам.

5. Решая полученную систему уравнений известными математическими методами, находят неизвестные токи ветвей. Если в результате какие-то токи получились со знаком “-“, то это значит, что их действительные направления противоположны выбранным. Проверкой правильности расчета является составление уравнения баланса мощностей, развиваемых источниками ЭДС и потребляемых приемниками

$$\sum_{i=1}^k E_i \cdot I_i = \sum_{i=1}^p I_i^2 \cdot R_i. \quad (2.4)$$

В данном уравнении, если направления ЭДС и тока, действующих в ветви, совпадают, их произведение берут со знаком “+“ (источник работает в режиме генератора), а если не совпадают, то источник ЭДС потребляет энергию (работает в режиме приемника) и в этом уравнении будет знак “-“. Например, для электрической цепи, представленной на рисунке 2.2, при указанных положительных направлениях ЭДС, токов и направлениях обходов контуров независимые уравнения получаем следующим образом. Так как схема содержит $m = 3$ ветви и $n = 2$ узла, то составляем систему из 3 уравнений, состоящую из одного уравнения по 1-му закону Кирхгофа и двух уравнений по 2-му закону Кирхгофа:

- 1) узел a $I_1 + I_2 = I_3$;
- 2) контур abc $E_1 = I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R_3$;
- 3) контур adb $E_2 = I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3$.

Решая совместно эти уравнения, можно определить величину и направления токов в ветвях схемы.

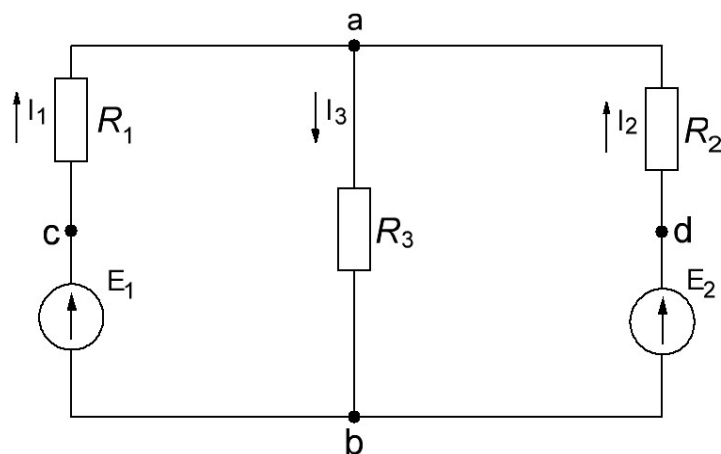


Рисунок 2.2 – Сложная электрическая цепь постоянного тока

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Выбрать произвольно из комплекта элементов наборного поля резисторы $R_1 \dots R_5$.

2. Собрать схему, представленную на рисунке 2.3, состоящую из источников нерегулируемого постоянного напряжения U_1 и регулируемого U_2 , резисторов $R_1 \dots R_5$, вольтметров V_1 и V_2 и амперметров $A_1 \dots A_5$.

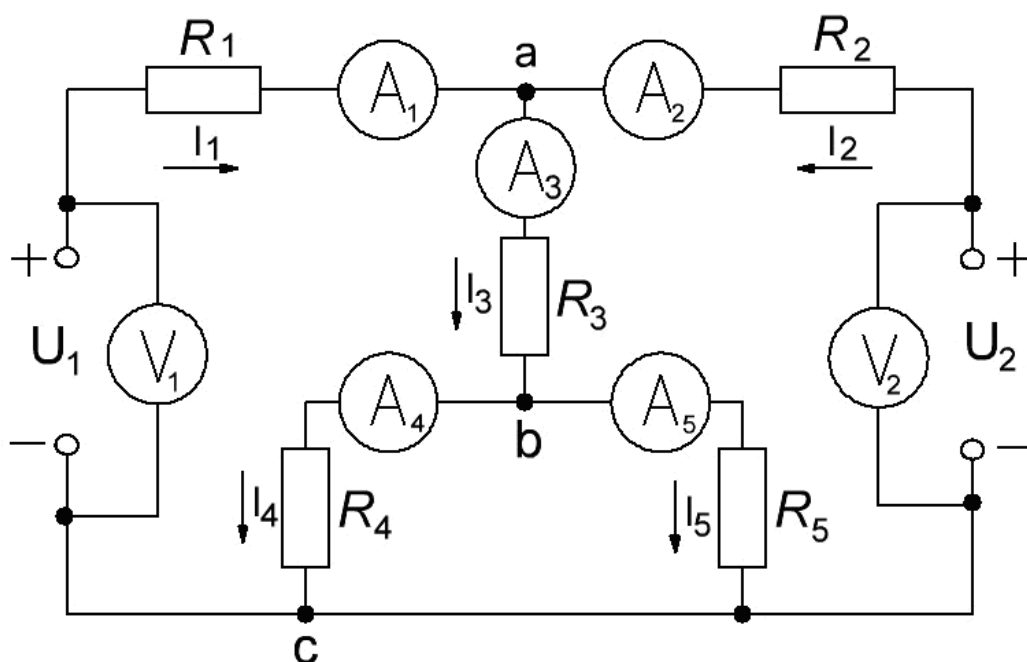


Рисунок 2.3 – Схема для исследования сложной электрической цепи постоянного тока

3. Установив значение напряжения регулируемого источника U_2 в пределах $15 \dots 20$ В и измерив напряжение U_1 , записать данные в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Экспериментальные и расчетные данные

	$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$I_3, мА$	$I_4, мА$	$I_5, мА$
Экспериментальные данные							
Расчетные данные							

4. Измерить значения токов и занести в таблицу 2.1. При занесении данных в таблицу 2.1 учесть направления токов (рис. 2.3).

5. При помощи омметра измерить сопротивления резисторов $R_1...R_5$. Данные занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Экспериментальные данные

$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$

6. Считая ЭДС источников равными их напряжениям U_1 и U_2 и используя данные таблицы 2.2, рассчитать значения токов в ветвях цепи (рис. 2.3) методом непосредственного применения законов Кирхгофа. Результаты расчета занести в таблицу 2.1.

7. Сравнить расчетные и экспериментальные данные. Составить уравнение баланса мощностей для электрической цепи, представленной на рисунке 2.3.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая электрическая цепь называется сложной? Из каких элементов и частей она состоит?

2. В чем заключается и как проводится расчет сложной электрической цепи?

3. Сформулируйте 1-й и 2-й законы Кирхгофа. Приведите пример их использования в расчетах электрических цепей.

4. Опишите порядок расчета сложной электрической цепи методом непосредственного применения законов Кирхгофа.

5. В чем заключается независимость уравнений, составляемых для расчета сложной электрической цепи? Что такое независимый контур схемы?

6. Что такое баланс мощностей электрической цепи? Как составляется уравнение баланса мощностей?

7. Составьте уравнения по законам Кирхгофа для предложенной преподавателем схемы электрической цепи.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы: исследование режимов работы цепи переменного тока, содержащей последовательное соединение резистивного, индуктивного и емкостного элементов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим цепь, в которой последовательно включены активное сопротивление r , индуктивность L и емкость C (рис. 3.1). Такую цепь называют последовательным колебательным контуром. Пусть она подключена к источнику синусоидального напряжения, тогда в ней будет протекать синусоидальный ток $i = I_m \sin \omega t$, одинаковый на всех участках цепи. При этом мгновенное значение напряжения всей цепи, согласно второму закону Кирхгофа, равно алгебраической сумме мгновенных значений напряжений на отдельных элементах цепи:

$$\begin{aligned} u &= u_r + u_L + u_C = r \cdot i + L \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{1}{C} \int i \cdot \partial t = \\ &= r \cdot I_m \cdot \sin \omega t + \omega L \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) + \frac{1}{\omega C} \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - 90^\circ) = \\ &= U_{mr} \cdot \sin \omega t + U_{mL} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) + U_{mC} \cdot \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (3.1)$$

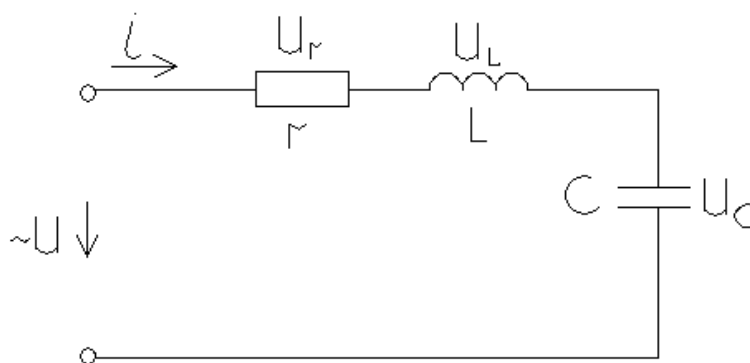


Рисунок 3.1 – Последовательный колебательный контур

В соответствии с уравнением (3.1) построим векторную диаграмму. За исходный вектор возьмём вектор амплитуды тока I_m (рис. 3.2). Вектор амплитуды напряжения на индуктивном элементе $U_{mL} = \omega L I_m$ будет опережать вектор тока на 90° , а вектор амплитуды напряжения на емкостном элементе $U_{mC} = I_m / \omega C$ отстает от вектора тока на 90° , т. е. векторы U_{mL} и U_{mC} будут

направлены противоположно. Вектор амплитуды напряжения на активном сопротивлении $U_{mr} = r \cdot I_m$ будет сонаправлен с вектором тока.

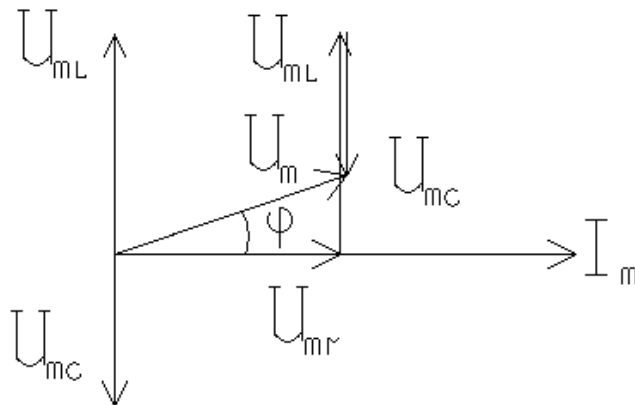


Рисунок 3.2 – Векторная диаграмма токов и напряжений цепи

Из векторной диаграммы следует, что

$$\vec{U}_m = \vec{U}_{mr} + \vec{U}_{mL} + \vec{U}_{mC}.$$

Амплитуда общего напряжения U_m в соответствии с векторной диаграммой будет равна:

$$U_m = \sqrt{U_{mr}^2 + (U_{mL} - U_{mC})^2},$$

откуда

$$U_m = \sqrt{(I_m \cdot r)^2 + (\omega L I_m - \frac{1}{\omega C} \cdot I_m)^2} = I_m \sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}. \quad (3.2)$$

Величины ωL и $1/\omega C$, имеющие размерность сопротивления (Ом), получили название индуктивного X_L и емкостного X_C сопротивлений соответственно, $X = X_L - X_C$ – расчётная величина, получившая название реактивного сопротивления цепи. Так как действующие значения синусоидального тока I и напряжения U в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудных, то из выражения (3.2) для действующих значений тока и напряжения следует:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} = \frac{U}{Z}$$

Это выражение аналогично закону Ома для цепи постоянного тока. Оно даёт возможность узнать модуль тока, но не определяет величину сдвига фаз между напряжением и током. Знаменатель $Z = \sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2}$ представляет собой модуль полного сопротивления цепи. Угол сдвига фаз между током и напряжением определяется по формуле:

$$\varphi = \arccos \frac{r}{Z} = \arcsin \frac{X}{Z} = \operatorname{arctg} \frac{X}{r} = \operatorname{arctg} \frac{U_L - U_C}{U_r}.$$

При равенстве индуктивного сопротивления ёмкостному ($X_L = X_C$) возникает резкое возрастание амплитуды тока – резонанс напряжений:

$$X_L - X_C = 0,$$

и следовательно,

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{r},$$

т. е. сопротивление цепи минимально, модуль тока достигает максимального значения. При этом $\cos \varphi = 1$, ток совпадает по фазе с напряжением, а нагрузка цепи имеет активный характер.

При резонансе на ёмкостном и индуктивном элементах напряжения окажутся равными по величине и противоположными по фазе, и каждое из них может превышать подведенное напряжение. Напряжение на конденсаторе и катушке индуктивности во столько раз больше подведенного напряжения, во сколько раз реактивные сопротивления элементов L и C больше активного:

$$\begin{aligned} U_r &= r \cdot I = r \cdot (U/r) = U \\ U_L &= X_L \cdot I = X_L \cdot (U/r) = (X_L/r) \cdot U \\ U_C &= X_C \cdot I = X_C \cdot (U/r) = (X_C/r) \cdot U \end{aligned}$$

Так как условием резонанса является равенство $\omega L = 1/\omega C$, то для заданных двух величин из трёх (ω , L , C) резонанс может быть получен подбором третьей.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. По заданным преподавателем значениям емкости (индуктивности) рассчитать значение индуктивности (емкости), необходимой для выполнения условия резонанса напряжений на частоте, равной 4 кГц, а также значение активного сопротивления, необходимое для выполнения следующего условия:

$$U_L = U_C > U_r .$$

2. Собрать схему, представленную на рисунке 3.3, задать требуемые номиналы сопротивления, индуктивности, емкости (R , L , C).

3. Установить на входе цепи напряжение 10–15 В.

4. Изменяя частоту напряжения от нуля до 8 кГц (с интервалом 1 кГц), записать в таблицу 3.1 значения всех измеряемых величин (U , U_r , U_L , U_C , I) для каждого нового значения частоты.

5. Используя экспериментальные данные, определить для каждого опыта:

– величину полного сопротивления цепи Z ,

– емкостное сопротивление X_C ,

– индуктивное сопротивление X_L ,

– $\cos \varphi$.

6. По результатам измерений и вычислений построить в соответствующем масштабе:

– три векторные диаграммы токов и напряжений для случаев

$$X_L > X_C; \quad X_L < X_C; \quad X_L = X_C;$$

– зависимости $I(f)$; $U(f)$; $U_L(f)$; $U_C(f)$; $Z(f)$; $\cos \varphi(f)$.

Полученные результаты объяснить.

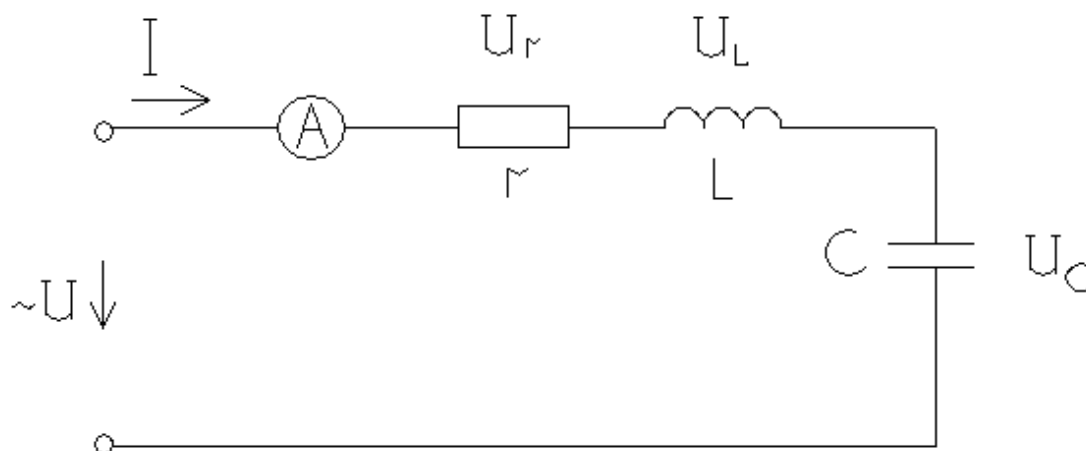


Рисунок 3.3 – Исследуемая схема

Таблица 3.1 – Результирующие данные

№	Экспериментальные данные						Расчётные данные			
	f кГц	U , В	U_r , В	U_L , В	U_C , В	I , мА	Z , Ом	X_L , Ом	X_C , Ом	$\cos \varphi$
1										
.										
.										
9										

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему в цепи с последовательным соединением r , L и C напряжение на входе цепи не равно арифметической сумме напряжений на отдельных элементах цепи?
2. Как построить диаграмму напряжений для цепи с последовательным соединением r , L и C ?
3. По каким данным электрической цепи можно вычислить $\cos \varphi$?
4. В каких цепях и при каком условии наблюдается резонанс напряжений?
5. Каковы признаки наличия резонанса напряжений в цепи?
6. Как получить резонанс напряжений при постоянной частоте тока?
7. Чему равен $\cos \varphi$ при резонансе напряжений?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ФАЗ ИСТОЧНИКА И ПРИЕМНИКА ЗВЕЗДОЙ

Цель работы: изучить особенности работы и свойства трехфазной цепи при соединении звездой фаз источника и приемника.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Трехфазная электрическая цепь может быть представлена как совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга на угол 120° . Эти однофазные составляющие называются фазами. Начала фаз генератора обозначаются буквами А, В, С, нагрузки – а, b, с. Концы фаз генератора обозначаются буквами X, Y, Z, нагрузки – x, y, z.

При соединении звездой концы фаз генератора соединяются в общую точку О, концы фаз нагрузки – в общую точку О'. Эти точки получили название нулевых (нейтральных) точек. Провода, соединяющие начала фаз

генератора и нагрузки (A-a), (B-b), (C-c), называются линейными, а провод, соединяющий точки O и O' – нулевым (нейтральным) проводом (рис. 4.1).

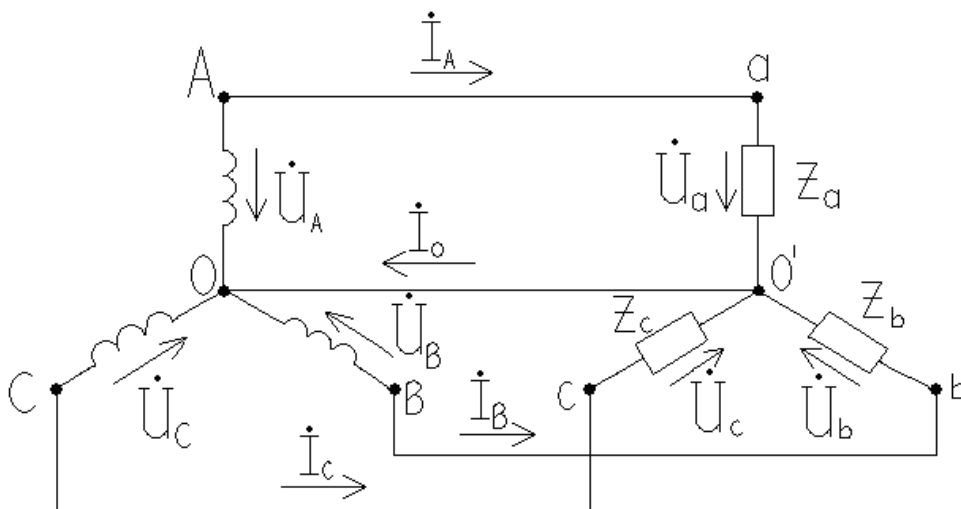


Рисунок 4.1 – Трёхфазная схема «звезда»

Напряжение на фазах генератора U_A, U_B, U_C и нагрузки U_a, U_b, U_c , а также токи в них принято называть фазными. Напряжения между линейными проводами U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} и токи в линейных проводах называются линейными.

Из схемы (рис. 4.1) следует, что:

$$I_L = I_\Phi$$

По первому закону Кирхгофа для узла O' можем записать:

$$\dot{I}_O = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (4.1)$$

Если принять сопротивление проводов равным нулю, то фазные напряжения нагрузки будут равны фазным напряжениям генератора:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_a; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_b; \quad \dot{U}_C = \dot{U}_c.$$

Отсюда фазные токи будут определяться фазными напряжениями генератора и, в общем случае, полным сопротивлением фаз приемника:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{Z_c},$$

где $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ – комплексные действующие значения фазных напряжений;
 Z_a, Z_b, Z_c – полные сопротивления фаз в комплексной форме.

Соединение на рисунке 4.1 обеспечивает независимую работу фаз, т. е. изменение нагрузки в одной из фаз не оказывает влияния на режим работы других фаз. Система в этом случае называется четырехпроводной, и векторные диаграммы для различных режимов нагрузки имеют следующий вид (рис. 4.2).

Векторы линейных напряжений связаны с векторами фазных напряжений следующими соотношениями:

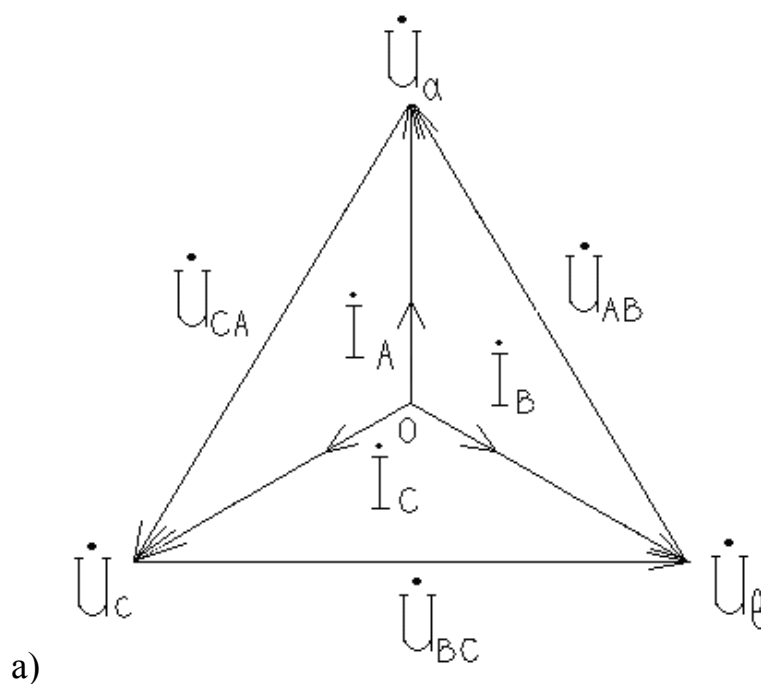
$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b; \quad \dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c; \quad \dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a. \quad (4.2)$$

Для построения векторных диаграмм использованы выражения (4.1) и (4.2).

Из равнобедренного треугольника, образованного двумя фазными и одним линейным напряжениями, следует, что

$$U_{л} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}. \quad (4.3)$$

При изменении нагрузок изменяются токи только тех фаз, где произошло изменение. При этом появляется ток в нулевом проводе. При равномерной нагрузке ток $I_0 = 0$. Следовательно, в этом режиме отпадает необходимость в нулевом проводе, и система будет являться трехпроводной.



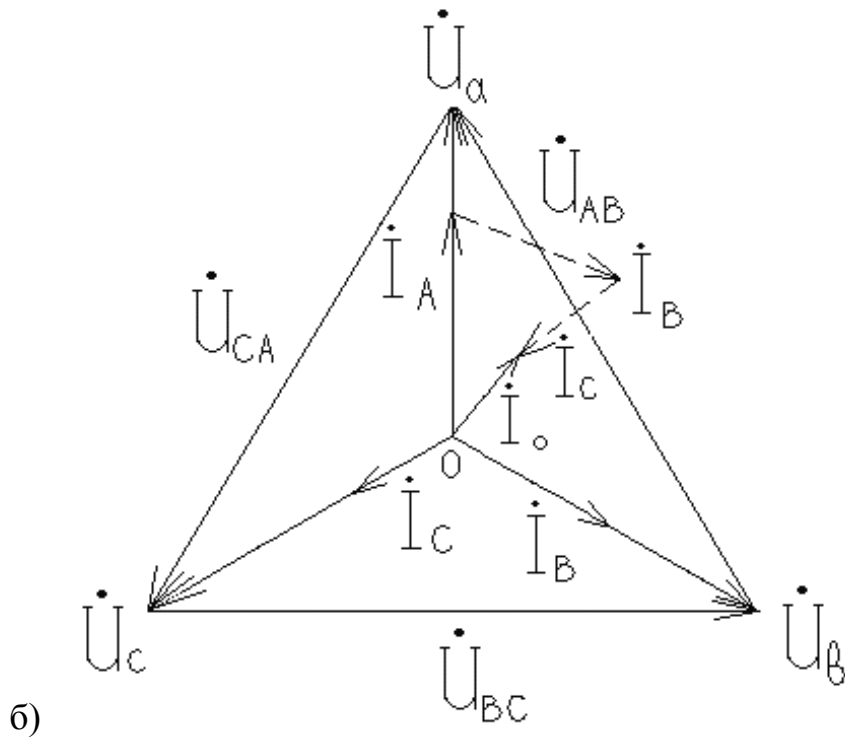


Рисунок 4.2 – Векторные диаграммы:
 а) одинаковая нагрузка, б) неодинаковая нагрузка

Эта система может использоваться только при симметричной нагрузке. При изменении сопротивления хотя бы в одной фазе между точками $O - O'$ появляется напряжение, определяемое по методу 2 узлов.

$$\dot{U}_{oo'} = \frac{\dot{U}_a \cdot Y_a + \dot{U}_b \cdot Y_b + \dot{U}_c \cdot Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c},$$

где Y_a, Y_b, Y_c – полные проводимости отдельных фаз в комплексной форме.

Вследствие этого фазные напряжения нагрузки не будут равны фазным напряжениям генератора. Они будут определяться выражениями:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{oo'}; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{oo'}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{oo'}.$$

Векторная диаграмма для трехпроводной системы при неравномерной нагрузке имеет вид (рис. 4.3).

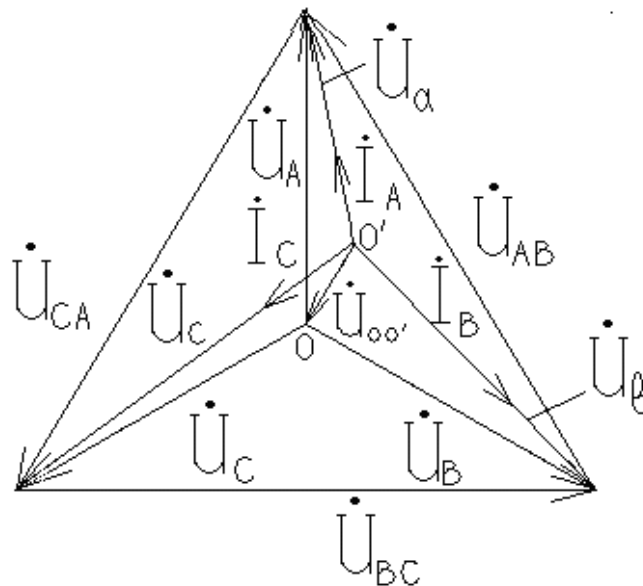


Рисунок 4.3 – Векторная диаграмма

Несимметрия нагрузки в фазах ведет к различию фазных напряжений нагрузки, и оно может быть значительным. Это видно из векторной диаграммы для случая неравномерной нагрузки (рис. 4.3).

В случае короткого замыкания одной из фаз (например, фазы С) фазные напряжения \dot{U}_a и \dot{U}_b достигают наибольших значений, равных линейным напряжениям.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему (рис. 4.4). В качестве фазных напряжений использовать источники синусоидального напряжения, установив в их настройках:

- напряжения 50 В;
- частота 50 Гц;
- сдвиг по фазе для А – 0° , для В – 120° , для С – 240° .

2. Для записанных в таблице 4.1 режимов измерить в указанных на схеме пунктиром участках цепи все обозначенные электрические величины:

I_A, I_B, I_C – фазные (они же линейные токи),

U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – линейные напряжения,

U_a, U_b, U_c – фазные напряжения (на резисторах R_a, R_b, R_c),

I_0 – ток в нулевом проводе,

$U_{oo'}$ – напряжение между нулевыми точками генератора и нагрузки.

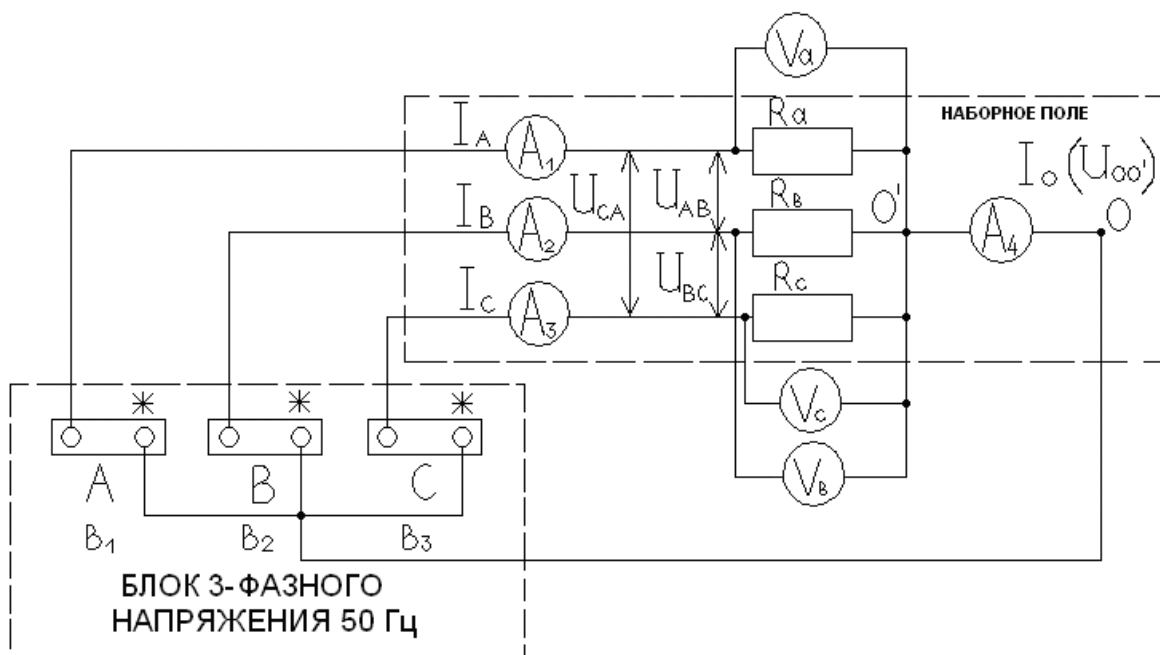


Рисунок 4.4 – Исследуемая схема

Таблица 4.1 – Результирующие данные

Схема	Режим	I_A мА	I_B мА	I_C мА	I_o мА	U_a В	U_b В	U_c В	U_{AB} В	U_{BC} В	U_{CA} В	U_{OO} В
4-проводная	одинаковая нагрузка											
	неодинаковая нагрузка											
	разгрузка фазы А											
3-проводная	одинаковая нагрузка											
	неодинаковая нагрузка											
	разгрузка фазы А											
	короткое замыкание фазы А											

3. По результатам опытов построить векторные диаграммы для 3 режимов, указанных преподавателем.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое 3- и 4-проводные системы?
2. Объясните назначение нулевого провода.

3. Область применения 3- и 4-проводной систем.
4. Объяснить особенности режима неравномерной нагрузки при обрыве нулевого провода.
5. Как связаны фазные и линейные токи и напряжения? Для каких рассмотренных режимов справедливо соотношение (4.3)?
6. Показать на схеме фазные и линейные токи и напряжения.
7. Пояснить векторные диаграммы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Цель работы: опытная проверка свойств и соотношений, присущих трехфазным цепям синусоидального тока при соединении приемников треугольником.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В цепях переменного трехфазного тока наряду с соединением звездой широко применяется соединение треугольником (рис. 5.1).

При таком соединении конец одной фазы генератора или нагрузки соединяется с началом другой, как показано на рисунке 5.1, для соединения фаз генератора. При этом обмотки фаз генератора образуют замкнутый контур, а сумма мгновенных значений ЭДС в любой момент времени равна нулю. Векторы фазных ЭДС сдвинуты относительно друг друга на угол 120° . Фазы нагрузки при соединении треугольником включаются между линейными проводами. Поэтому при соединении треугольником $U_{л} = U_{\phi}$, т. к. это одно и то же напряжение.

Если пренебречь сопротивлением линейных проводов, то фазные напряжения на нагрузке будут равны линейным напряжениям генератора.

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab}; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc}; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca}$$

При известных сопротивлениях нагрузки Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} фазные токи

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}; \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}; \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}}. \quad (5.1)$$

Следовательно, соединение треугольником обеспечивает независимую работу фаз; изменение нагрузки в любой из фаз не влияет на работу остальных.

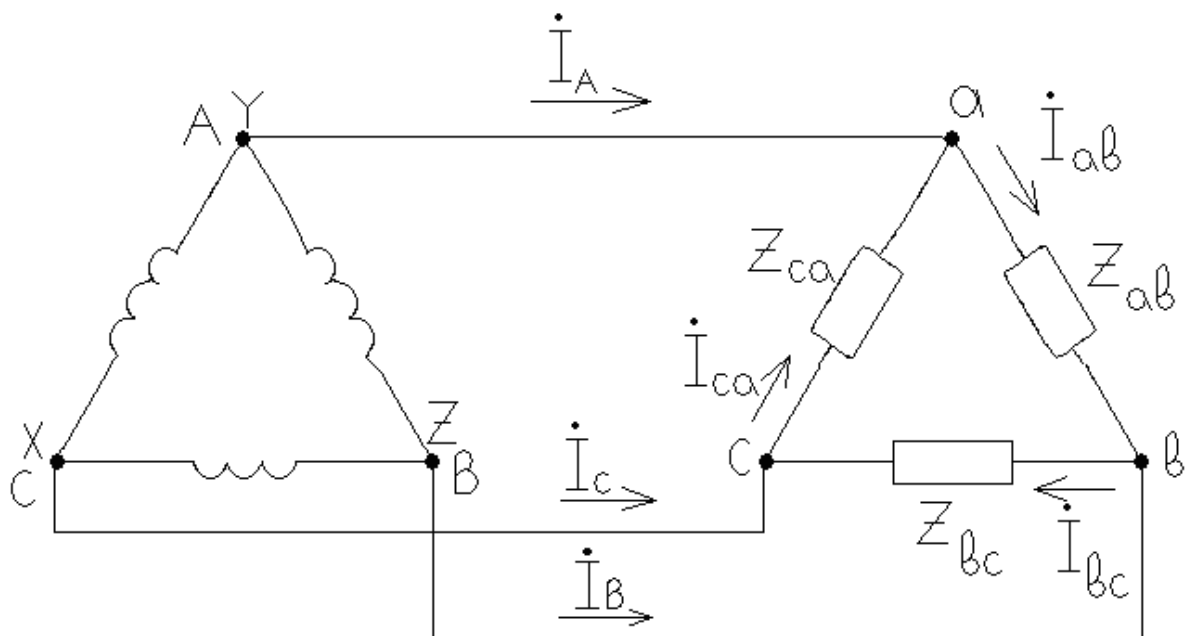


Рисунок 5.1 – Трехфазная схема «треугольник»

Токи \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C , протекающие в линейных проводах, называются линейными токами. Используя первый закон Кирхгофа для узлов а, в, с, можно определить линейные токи.

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} \quad (5.2)$$

Складывая правые и левые части уравнений (5.2), получим

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0, \quad (5.3)$$

т. е. геометрическая сумма линейных токов всегда равна нулю независимо от нагрузки в фазах приемника. При построении векторных диаграмм необходимо использовать выражение (5.1) и (5.2). При этом учитывается, что векторы линейных напряжений \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} образуют симметричную трехлучевую звезду, т. е. равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на угол 120° .

В случае симметричной нагрузки ($Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$) векторы фазных токов, определенные выражениями (5.1), сдвинуты по фазе относительно векторов линейных напряжений на одинаковый угол φ и образуют симметричную звезду. Векторы линейных токов, построенные согласно выражениям (5.2), также образуют симметричную звезду, сдвинутую относительно системы фазных токов на угол 30° . Тогда из рассмотрения равнобедренного треугольника,

образованного фазными и линейными токами, следует, что линейные токи в $\sqrt{3}$ больше фазных токов:

$$I_L = \sqrt{3}I_\phi$$

При неравномерной нагрузке фаз симметрия фазных напряжений остается, т. к. они определяются линейными напряжениями генератора. Однако симметрия фазных и линейных токов будет нарушена.

Напряжение на фазах нагрузки в случае соединения треугольником будет изменяться только при обрыве одного из линейных проводов.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему (рис. 5.2), состоящую из резисторов R_1 , R_2 , R_3 одинаковых номиналов, амперметров $A_1 \div A_6$, вольтметра V , источников синусоидального напряжения (с параметрами по аналогии лабораторной работы 4).

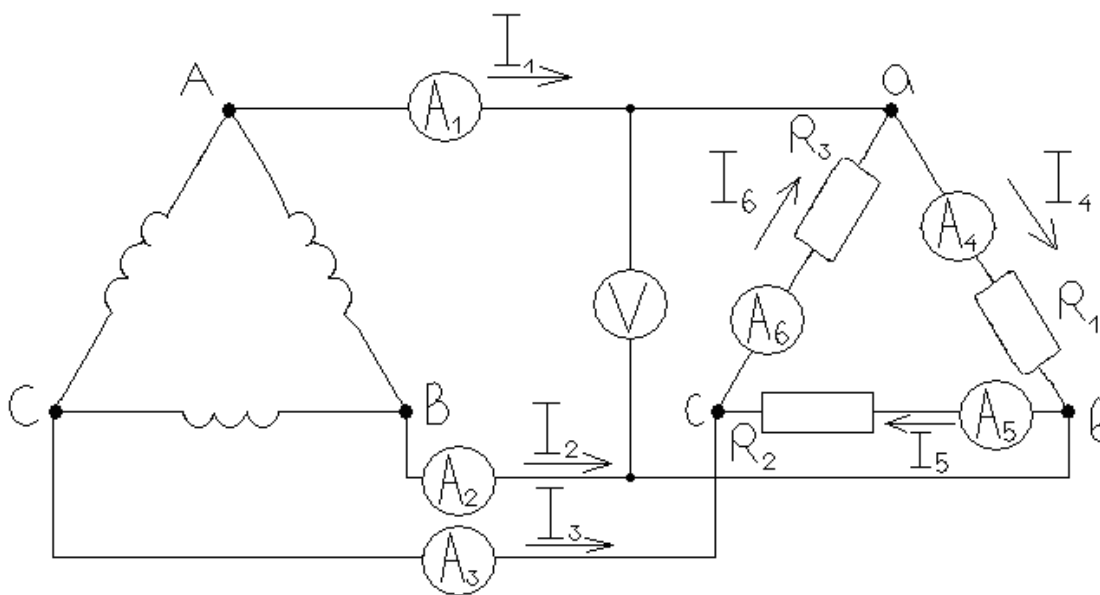


Рисунок 5.2 – Исследуемая схема

2. Измерить для симметричной нагрузки токи $I_1 \div I_6$, а с помощью вольтметра V измерить фазные (линейные) напряжения на каждой нагрузке. Данные опыта занести в таблицу 5.1.

3. Заменить номинал резистора R_1 другим, отличным от номинала R_1 , т. е. выполнить неравномерную нагрузку фаз. Измерить токи и напряжения.

4. Отключить нагрузку R_1 , т. е. выполнить разгрузку фазы А. Измерить токи и напряжения в этом режиме.

5. Собрать схему для режима симметричной нагрузки. Отсоединить линейный провод фазы А, измерить токи и напряжения.

6. По результатам опытов построить векторные диаграммы напряжений и токов для первых трех режимов.

Таблица 5.1 – Результирующие данные

Режимы	I_1 mA	I_2 mA	I_3 mA	I_4 mA	I_5 mA	I_6 mA	U_{ab} В	U_{bc} В	U_{ca} В
Одинаковая нагрузка									
Неодинаковая нагрузка									
Разгрузка фазы А									
Обрыв линейного провода									

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое соединение приемников трехфазного тока называется треугольником?

2. Какие зависимости связывают комплексы линейных и фазных напряжений и токов?

3. Когда имеет место соотношение $I_L = \sqrt{3}I_\phi$?

4. Как скажется изменение сопротивления одной из фаз на токи и напряжения в других фазах?

5. Изобразите векторные диаграммы в случае равномерной и неравномерной нагрузок фаз.

6. Как изменяются напряжения и токи фаз приемника для симметричной нагрузки при обрыве линейного провода?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: изучение предельных режимов работы и определение основных параметров однофазного трансформатора.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Трансформатор – это статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования посредством магнитного поля электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при постоянной частоте.

При работе трансформатора в реальных условиях имеются два основных вида потерь энергии – электрические и магнитные (см. рис. 6.1).

Мощность электрических потерь трансформатора обусловлена нагревом проводов обмоток трансформатора при прохождении через них электрического тока и определяется как сумма электрических потерь обеих обмоток

$$P_{\Sigma} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2, \quad (6.1)$$

где r_1 и r_2 – активное сопротивление обмоток.

Мощность магнитных потерь обусловлена явлением перемагничивания материала сердечника трансформатора. Вследствие перемагничивания возникают два вида потерь энергии: потеря энергии на преодоление остаточного магнетизма в сердечнике (явление гистерезиса) и потеря энергии на создание вихревых токов, наводимых магнитным потоком в пластинах сердечника

$$P_M = P_r + P_B. \quad (6.2)$$

Магнитные потери уменьшаются путем выполнения сердечника из магнитомягких ферромагнитных материалов, набирая его при этом из тонких изолированных друг от друга листов.

Для определения величины магнитных потерь проводят испытания трансформатора в режиме холостого хода (хх).

Первичная обмотка подключена к источнику питания с номинальным напряжением $U_{1н}$, от вторичной нагрузки отключена нагрузка, поэтому ток $I_2=0$. Ток I_1 , зависящий от I_2 , равен

$$I_1 = I_{1х} = (3 \div 10)\% I_i.$$

Так как токи малы, нагрев проводов практически не происходит и $P_{\Sigma}=0$. Ваттметр при этом фиксирует только мощность магнитных потерь P_{Σ} .

Для определения электрических потерь P_{Σ} проводят испытания трансформатора в режиме короткого замыкания

Вторичную обмотку замыкают накоротко, к первичной подводят напряжение U_k , необходимое для создания номинального тока. Так как $U_k=(3-5\%)U_{1ном}$, то магнитный поток, зависящий от U_k , невелик, а

следовательно, малы и магнитные потери. Ваттметр в схеме фиксирует только номинальную мощность электрических потерь. В общем случае режим КЗ – аварийный режим, токи в обмотках резко возрастают, обугливается изоляция, плавится медь коротко замкнутых витков.

При переходе от режима ХХ к режиму КЗ проходит режим работы при номинальной нагрузке. Ток I_1 начинает увеличиваться, что приводит к росту падения напряжения на сопротивлении проводов первичной обмотки и, следовательно, к уменьшению E_1 и Φ . Следовательно, уменьшается E_2 и U_2 уменьшается также за счет падения напряжения на сопротивлении проводов вторичной обмотки. Таким образом, возникает разность между напряжением на выходе трансформатора в режиме ХХ и напряжением в номинальном режиме, называемое **процентным изменением напряжения**

$$\Delta U_2 = \frac{U_{2x} - U_{2i}}{U_{2x}} \cdot 100\%$$

$$\Delta U_2 = (2 \div 8)\% U_{2н}$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Для исследования трансформатора TV_2 в режиме холостого хода собрать электрическую цепь, представленную на рисунке 6.1.

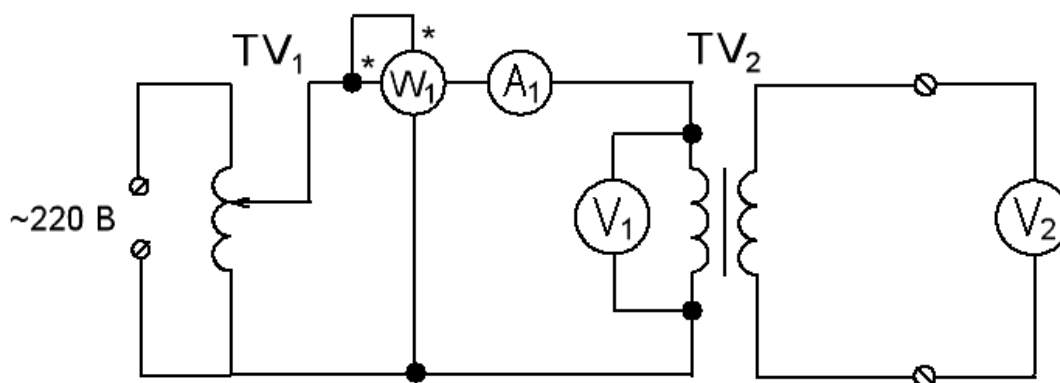


Рисунок 6.1 – Схема исследования трансформатора в режиме холостого хода

Установить ручку регулятора напряжения в крайнее левое положение. Включить питание стенда. Регулятором изменять величину напряжения U_{10} , подводимого к трансформатору, в пределах от 60 до 220 В с интервалом 40 В.

Результаты измерений занести в таблицу 6.1.

По окончании эксперимента ручку регулятора напряжения установить в крайнее левое положение и отключить питание стенда.

Используя формулы, рассчитать параметры намагничивающей цепи:

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}}; \quad r_0 = \frac{P_{10}}{I_{10}^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}; \quad \cos \varphi_0 = \frac{r_0}{Z_0}; \quad K = \frac{U_{10}}{U_{20}}.$$

Таблица 6.1 – Параметры трансформатора в режиме холостого хода

№ п/п	Экспериментальные данные				Расчетные данные					
	U_{10} , В	U_{20} , В	I_{10} , А	P_0 , Вт	Z_0 , Ом	R_0 , Ом	X_0 , Ом	$\cos \varphi_0$	$\varphi_0, ^\circ$	К
1										
2										
3										
4										
5										

По результатам измерений построить зависимости $I_{10} = f(U_{10})$ и $P_0 = f(U_{10})$.

2. Для исследования трансформатора TV_2 в режиме короткого замыкания собрать электрическую цепь, представленную на рисунке 6.2, замкнув накоротко цепь вторичной обмотки трансформатора.

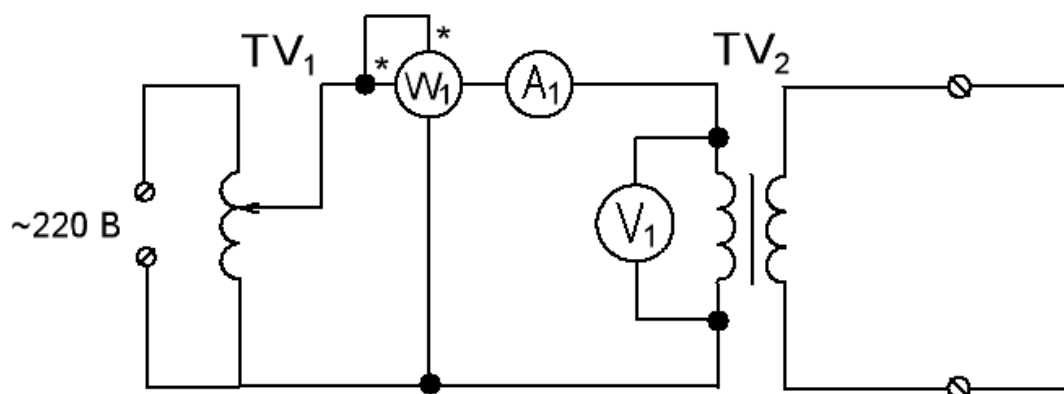


Рисунок 6.2 – Схема исследования трансформатора в режиме короткого замыкания

Установить ручку регулятора напряжения в крайнее левое положение. Включить питание стенда. Регулятором напряжения плавно увеличивать ток $I_{1к}$ первичной обмотки трансформатора в пределах от 0,12 до 0,2 А с интервалом 0,02 А. Результаты измерений занести в таблицу 6.2.

По окончании эксперимента ручку регулятора напряжения установить в крайнее левое положение и отключить питание стенда. Используя формулы, рассчитать параметры упрощенной схемы замещения трансформатора:

$$Z_K = \frac{U_{I_k}}{I_{I_k}}; r_K = \frac{P_K}{I_{I_k}^2}; X_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}; \cos \varphi_K = \frac{r_K}{Z_K}; U_K = \frac{U_{I_k}}{U_{I_n}} \cdot 100\%,$$

где $U_{I_n} = 220 \text{ В}$.

Таблица 6.2 – Параметры трансформатора в режиме короткого замыкания

№ п/п	Экспериментальные данные			Расчетные данные					
	$U_{I_k},$ В	$I_{I_k},$ А	$P_{I_k},$ Вт	$Z_K,$ Ом	$R_K,$ Ом	$X_K,$ Ом	$\cos \varphi_K$	$\varphi_K, ^\circ$	$U_K,$ %
1									
2									
3									
4									
5									

По результатам измерений построить зависимости $I_{I_k} = f(U_{I_k})$ и $P_K = f(U_{I_k})$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Изложите принцип действия трансформатора.
2. Какую роль выполняет сердечник трансформатора?
3. Дайте определение коэффициента трансформации.
4. Как проводится опыт холостого хода трансформатора, какие параметры определяются из этого опыта?
5. Как проводится опыт короткого замыкания трансформатора, какие параметры определяются из этого опыта?
6. На что расходуется энергия, потребляемая трансформатором, в опытах холостого хода и короткого замыкания?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы: освоение методики определения основных параметров потенциометрических преобразователей.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В технике широко применяются приборы для измерения величин перемещений объектов с их преобразованием в электрические сигналы.

Потенциометрический датчик в большинстве конструкций представляет собой реостат и соединенный с объектом скользящий контакт, с которого снимается сигнал. Выходной параметр – это величина электрического сопротивления, зависящего от углового или линейного перемещения подвижного элемента.

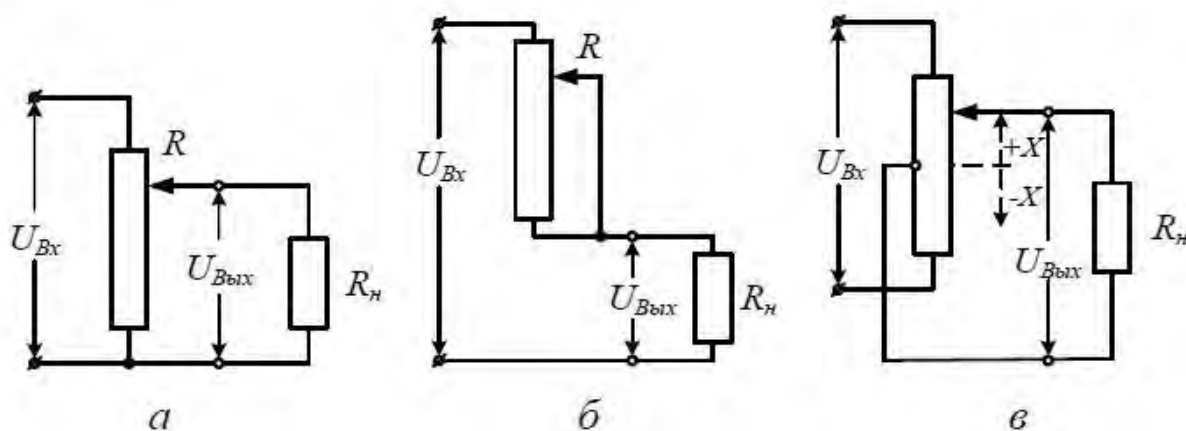


Рисунок 7.1 – Потенциометрические датчики линейных перемещений

Потенциометр преобразует линейные или угловые перемещения в соответствующие величины напряжения, тока или сопротивления. За счет этого можно работать со многими неэлектрическими величинами: давлением, уровнем, расходом и др. Потенциометрические датчики, принцип действия которых заключается в измерении перемещения или места расположения положения, соединяются своими подвижными контактами переменного резистора с объектами. Это могут быть клапаны, антенны, режущие инструменты и многое другое. После подачи питания на датчик с него снимается сигнал положения движка потенциометра, как с делителя напряжения.

Таким образом, входной величиной датчика является перемещение X или угол поворота движка, тогда как выходной величиной можно считать сопротивление R , ток I или напряжение U .

В простых датчиках между сопротивлением и перемещением (статическая характеристика) существует линейная зависимость:

$$R_x = R_n \frac{X}{L} \text{ – для прямых} \quad (7.1)$$

$$R_x = R_n \frac{\alpha}{f} \text{ – угловых} \quad (7.2)$$

где f – длина кругового сектора.

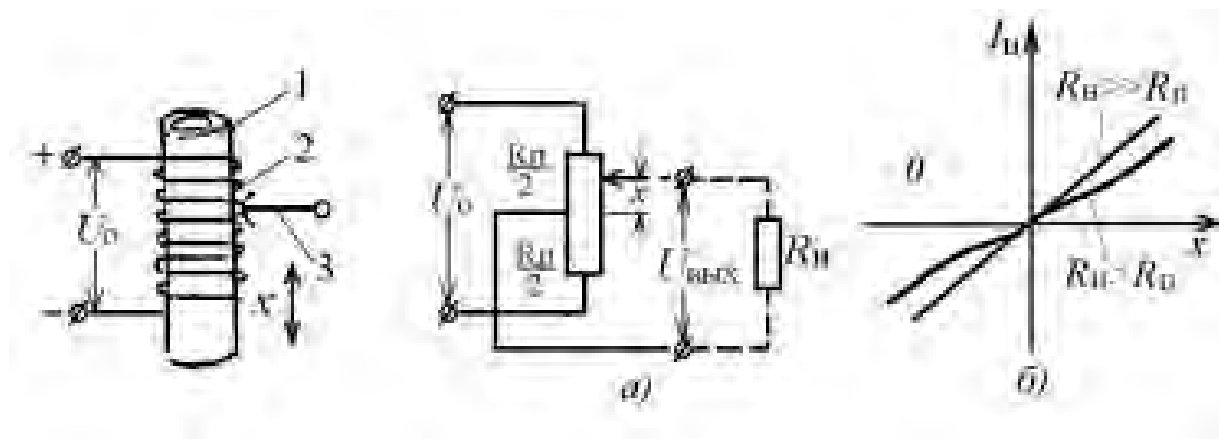


Рисунок 7.2 – Конструкция потенциометра: 1 – каркас; 2 – провод; 3 – ползунок; а) схема включения; б) статическая характеристика

Потенциометрическим проволочным датчикам присуще наличие зоны нечувствительности, которая обусловлена диаметром токопроводящей проволоки. Базовый метод регистрации во всех моделях остается одним и тем же, но имеются конструктивные отличия. Сигнал может сниматься напрямую или с помощью электронной схемы после его обработки и нормализации. Важно, чтобы он соответствовал определенным стандартам.

Основными эксплуатационными характеристиками потенциометров являются: величина активного сопротивления, номинальная мощность рассеивания, уровень внешних шумов, износоустойчивость и вибропрочность, стабильность величины сопротивления.

Статическая характеристика определяет функциональную зависимость выходного напряжения потенциометра от перемещения его движка:

$$U_{\text{вых}} = U_2 = f(x) \text{ или } U_2 = f(\alpha).$$

Для большинства типов потенциометров, используемых в автоматических системах, эта зависимость линейна при условии компенсации влияния нагрузки на точность работы потенциометра.

Влияние нагрузки R_n , подключенной к выходу потенциометра, характеризуется погрешностью, величина которой выражается в абсолютных (в единицах напряжения) или относительных (в процентах) единицах.

Относительная статистическая погрешность измерений для каждой ступени нагрузки (тарировки) вычисляется по формуле:

$$\Delta C1 = \frac{U_{2np} - U_{2об}}{U_{2нн} - U_{2об}} \cdot 100\%, \quad (7.3)$$

где U_{2np} – показания измерительного прибора при прямом ходе;
 $U_{2об}$ – показания измерительного прибора при обратном ходе.

Статическая чувствительность определяется крутизной выходного напряжения и характеризует приращение выходного напряжения на единицу линейного или углового перемещения его движка (В/мм или В/рад).

Номинальная мощность рассеивания определяется максимальной допустимой мощностью, длительно рассеиваемой на сопротивлении потенциометра без нарушения его нормальной работы.

Номинальная величина активного сопротивления характеризуется значением активного сопротивления потенциометра при его изготовлении. Потенциометры в зависимости от номинального значения делятся на классы.

Уровень собственных шумов потенциометра оценивается величиной ложного сигнала, появляющегося на его выходе вследствие мгновенного нарушения контакта, возникающего при больших скоростях перемещения или вибрации ползунка.

Износоустойчивость потенциометра определяется числом перемещений (поворотов) ползунка от упора до упора, которое потенциометр может выдержать без нарушения его нормальной работы.

Вибропрочность оценивается временем, в течение которого потенциометр выдержит колебания в заданном диапазоне частот и с заданным ускорением без нарушения его нормальной работы.

Стабильность сопротивления характеризуется изменением величины сопротивления потенциометра с течением времени под влиянием температуры, влажности, рассеивания мощности и т. д. при подаче напряжения.

Влияние нагрузки. Выходное напряжение, снимаемое с потенциометра, отличается от заданного на величину, зависящую от отношения полных сопротивлений потенциометра и нагрузки, а также от положения ползунка потенциометра.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Исследование одноактного потенциометрического преобразователя.

1. Измерить сопротивление (полное) потенциометрического преобразователя $C1$, сопротивление нагрузок $R_{н1}$ и $R_{н2}$, результаты занести в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Сопротивление (полное) потенциометрического преобразователя $C1$, сопротивление нагрузок $R_{н1}$ и $R_{н2}$

	Измерено
	$R, \text{ Ом}$
$C1$	
$R_{н1}$	
$R_{н2}$	

2. Вращая ручку потенциометра $C1$, снять зависимость $r_{C1}=f(\varphi)$, результаты занести в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 – Зависимость $r_{C1}=f(\varphi)$,

N	Измерено	
	$\varphi, 0$	$r_{C1}, \text{ Ом}$
1	0	
2	30	
3	60	
4	90	
...	...	

3. Собрать схему, как показано на рисунке 7.3.

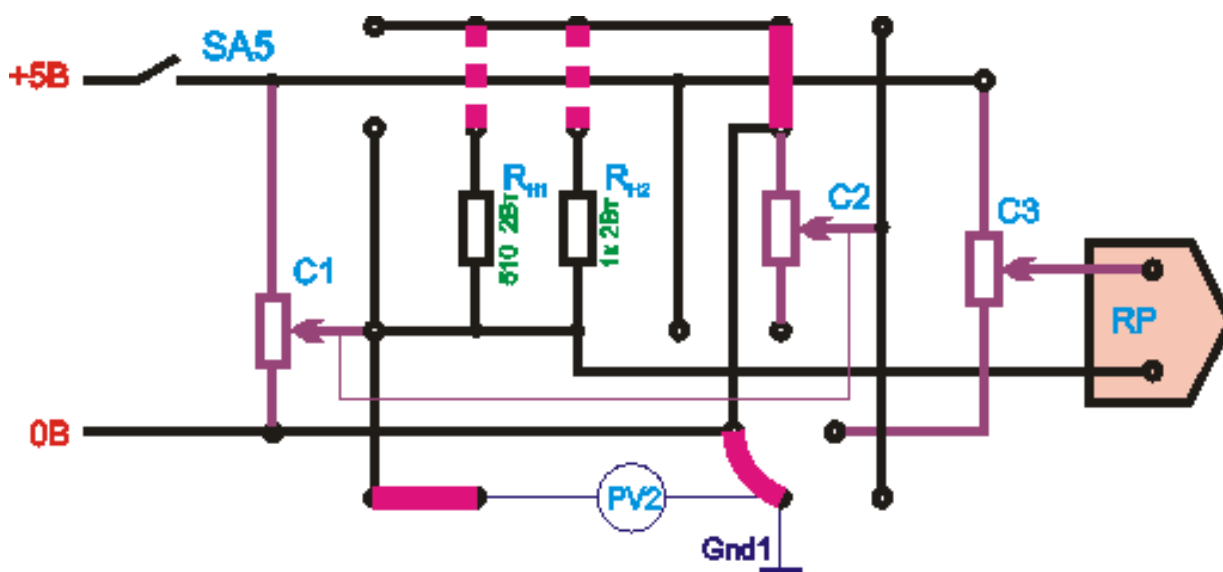


Рисунок 7.3 – Схема одноактного потенциметрического преобразователя

4. Убедиться, что схема собрана правильно и на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки, тумблеры SA2, SA3, SA5, SA6, SA7, SA8, SA22, SA23, SA25, SA70 находятся в нижнем положении («Выключено»). Регуляторы R21, R22 установить в крайнее левое положение. Если необходимо использовать измерительные приборы на панели стенда, тумблеры SA10, SA11 установить в положение «Измерение».

5. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).

6. Включить переключатель SA5.

7. Плавно перемещая ручку потенциометра C1, снять статическую характеристику $U_{\text{вых}}=f(\varphi)$ в режиме холостого хода, данные занести в таблицу 7.3.

8. Плавно перемещая ручку потенциометра C1, снять статическую характеристику $U_{\text{вых}}=f(\varphi)$ при подключении нагрузки R_{n1} , R_{n2} , данные занести в таблицу 7.3.

Таблица 7.3 – Статическая характеристика $U_{\text{вых}}=f(\varphi)$ при подключении нагрузки R_{H1} , R_{H2}

Измерено			
$\varphi, 0$	$U_{\text{вых}}, \text{В}$ (х.х)	$U_{\text{вых}}, \text{В}$ (R_{H1})	$U_{\text{вых}}, \text{В}$ (R_{H2})
0			
30			
60			
90			
...			

9. Выключить переключатель SA5.
 10. Выключить питание (три автоматических выключателя «Сеть»).
 11. Разобрать схему.
2. Исследование мостовой потенциметрической схемы.
 1. Собрать схему, как показано на рисунке 7.4.

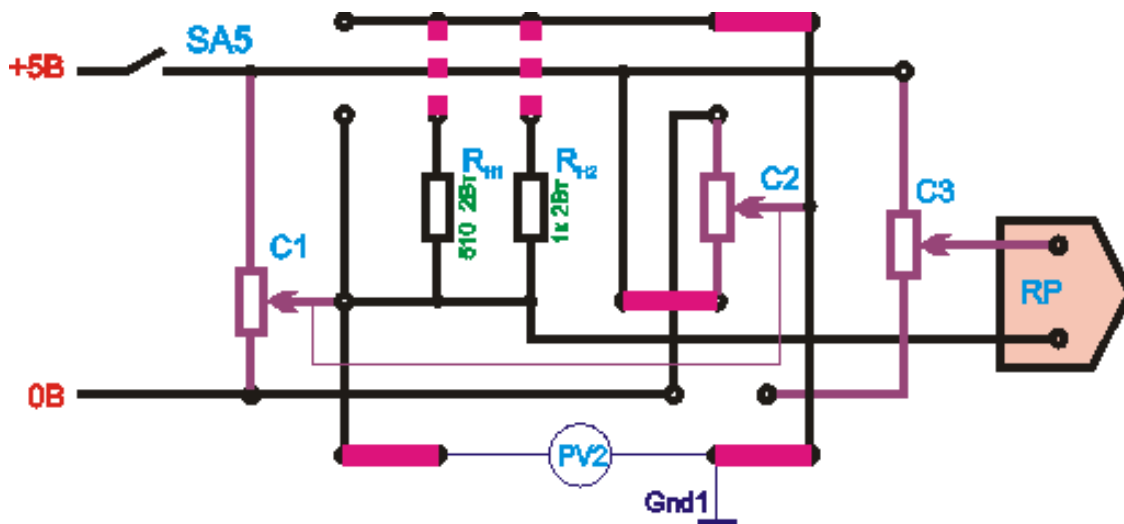


Рисунок 7.4 – Схема мостового потенциметрического преобразователя

2. Убедиться, что схема собрана правильно и на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки, тумблеры SA2, SA3, SA5, SA6, SA7, SA8, SA22, SA23, SA25, SA70 находятся в нижнем положении («Выключено»). Регуляторы R21, R22 установить в крайнее левое положение. Если необходимо использовать измерительные приборы на панели стенда, тумблеры SA10, SA11 установить в положение «Измерение».
3. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
4. Включить переключатель SA5.

5. Установить ручку потенциометров С1, С2 в среднее положение, при этом добившись установки нуля напряжения. Данное положение ручки считать исходным (0).

6. Плавно поворачивая ручку потенциометра С1, С2, снять статические характеристики $U_{\text{вых}}=f(\varphi)$ в режиме холостого хода, данные занести в таблицу 7.4.

7. Плавно поворачивая ручку потенциометра С1, С2, снять статические характеристики $U_{\text{вых}}=f(\varphi)$ при подключении нагрузки $R_{н1}$, $R_{н2}$, данные занести в таблицу 7.4.

Таблица 7.4 – Статические характеристики $U_{\text{вых}}=f(\varphi)$ при подключении нагрузки $R_{н1}$, $R_{н2}$

Измерено						
	$\varphi, 0$ $U_{\text{вых}}, В$ (х.х)		$U_{\text{вых}}, В$ ($R_{н1}$)		$U_{\text{вых}}, В$ ($R_{н2}$)	
	направление		направление		направление	
	прав.	лев.	прав.	лев.	прав.	лев.
0						
30						
60						
90						
...						

8. Выключить переключатель SA5.

9. Выключить питание (три автоматических выключателя «Сеть»).

10. Разобрать схему.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое потенциометрический преобразователь?
2. Виды потенциометрических датчиков.
3. Основные характеристики потенциометрических датчиков.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы: ознакомиться с устройством и принципом действия дроссельного магнитного усилителя (МУ). Ознакомиться с назначением обратной связи и ее действием в магнитном усилителе. Научиться снимать основные характеристики МУ и определять коэффициенты усиления.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В системах автоматики усилители применяют для усиления мощности сигналов датчиков, как правило, недостаточных по мощности для приведения в действие исполнительных элементов. В некоторых случаях одновременно с усилением входного сигнала в усилителе осуществляется и его качественное преобразование: постоянный ток преобразуется в переменный, переменный – в постоянный и т. д. В зависимости от вида энергии вспомогательного источника усилители делятся на электрические, гидравлические, пневматические и комбинированные. Рассмотрим устройство и принцип действия одного из электрических усилителей – дроссельного магнитного усилителя (МУ), который представляет собой катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником и дополнительной управляющей обмоткой W_y , позволяющей изменять индуктивность основной (рабочей) обмотки W_p за счет подмагничивания материала сердечника при протекании по управляющей обмотке постоянного тока I_y (рис. 8.1).

Нагрузка усилителя R_n подключается последовательно с рабочей обмоткой W_p к источнику переменного напряжения U_p . Входным сигналом является ток I_y и напряжение U_y . Выходным сигналом – I_p ; U_p . Основным элементом МУ является ферромагнитный сердечник, характеризующийся нелинейной кривой намагничивания $B=f(H)$ (рис. 8.2).

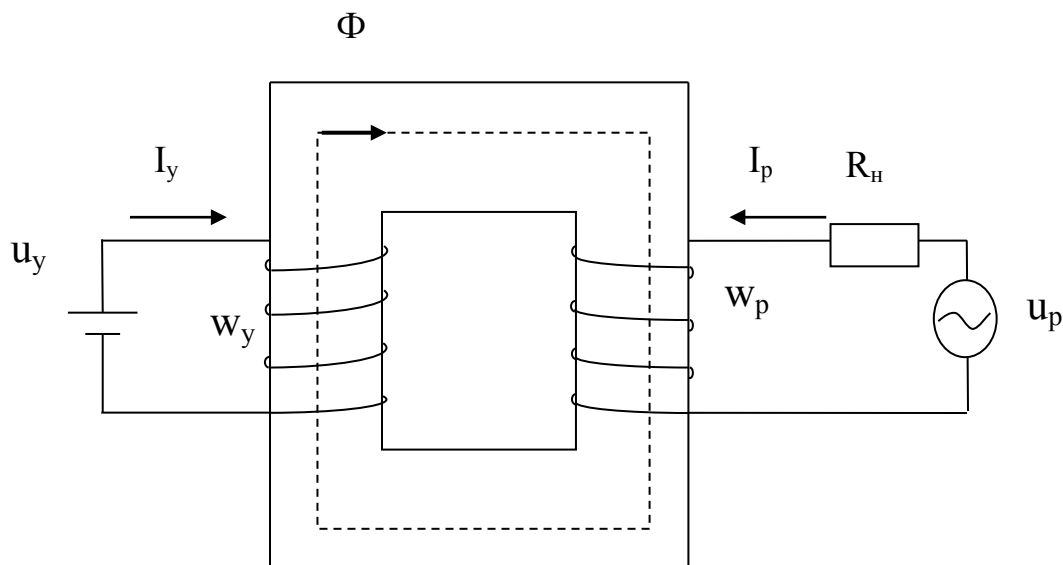


Рисунок 8.1 – Дроссельный магнитный усилитель

При отсутствии входного напряжения U_y (холостой ход) под воздействием переменного напряжения U_p в обмотке W_p будет течь синусоидальный ток I_p . Последний создаст в сердечнике синусоидальный магнитный поток Φ_{\sim} , а следовательно, и магнитную индукцию B_{\sim} (рис. 8.2). Проектируя значение индукции на кривую намагничивания, находим изменения напряженности поля $H_{0\sim}$.

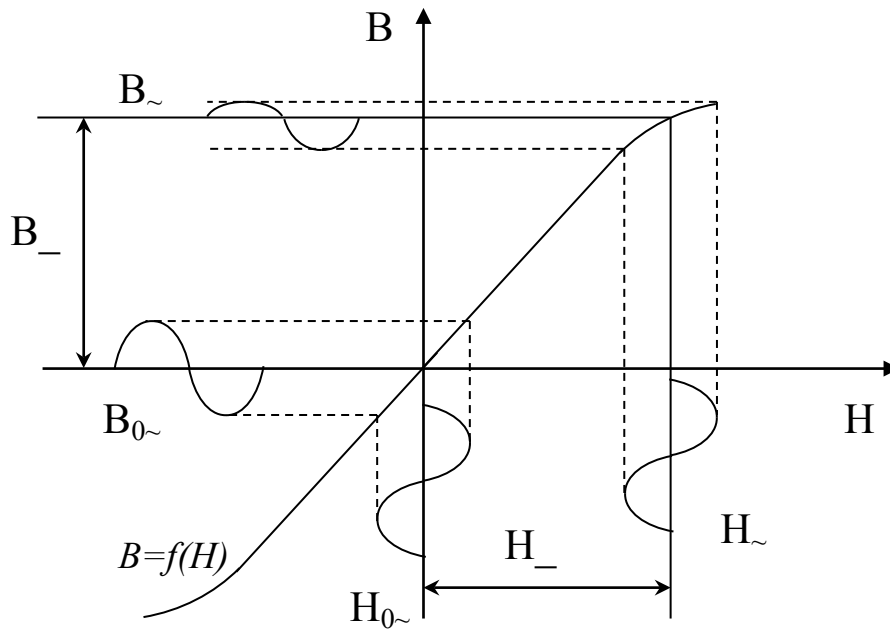


Рисунок 8.2 – Кривая намагничивания

Очевидно, что амплитуда напряженности $H_{0\sim}$ будет в этом случае тем меньше, чем круче кривая намагничивания материала сердечника. При подаче на вход напряжения U_y , последнее вызовет в обмотке W_y постоянный ток I_y . Этот ток обусловит появление постоянного магнитного поля напряженностью H_{\sim} и индукцией B_{\sim} . Постоянное и переменное магнитные поля суммируются, в результате рабочая точка переместится в область нелинейного участка кривой намагничивания на величину B_{\sim} .

Построив для этого случая кривую изменения напряженности H_{\sim} , видим, что ее значение стало больше, чем в режиме холостого хода. Рассмотренное изменение магнитного состояния сердечника можно оценить соответствующим измерением его магнитной проницаемости:

$$\mu_{\sim} = \frac{B_{\sim}}{\mu_0 * H_{\sim}}. \quad (8.1)$$

Очевидно, в первом случае магнитная проницаемость была выше, чем во втором. Подача управляющего сигнала U_y привела к уменьшению индуктивности рабочей обмотки:

Ошибка! Закладка не определена.

$$L_p = \frac{W_p^2 * S}{\mu_0 * \mu_{\sim}} = \frac{4 * \pi * 10^{-5} * W_p^2 * S}{L} * \mu_{\sim} = k * \mu_{\sim}, \quad (8.2)$$

где $\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-5}$ – магнитная проницаемость вакуума; S – площадь сечения сердечника; L – длина средней силовой линии.

Соответственно уменьшению индуктивности L_p уменьшится индуктивное сопротивление рабочей обмотки $X_L = \omega * L_p$, а значение тока, протекающего в рабочей цепи, увеличится:

$$I_p = \frac{U_p}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}. \quad (8.3)$$

Таким образом, подав на вход усилителя сигнал U_y , получим изменение тока в цепи нагрузки I_p как результат последовательных преобразований, происходящих в МУ. Эту цепь преобразований можно условно представить в следующем виде:

$$I_y \uparrow \rightarrow H \uparrow \rightarrow H \sim \uparrow \rightarrow \mu \sim \downarrow \rightarrow L_p \downarrow \rightarrow X_L \downarrow \rightarrow Z_p \downarrow \rightarrow I_p \uparrow$$

Рассмотренный дроссельный МУ является простейшим и имеет следующие недостатки:

1. Переменный магнитный поток Φ_{\sim} , создаваемый рабочим током, индуцирует в управляющей обмотке переменную ЭДС (как во вторичной обмотке трансформатора), в результате чего в управляющей цепи МУ протекает переменный ток, что приводит к искажению формы входного сигнала.

2. Характеристика такого усилителя нелинейно и симметрично не реверсивна. Такой усилитель изменяет амплитуду тока в нагрузке, но фаза тока остается постоянной.

3. Наличие тока холостого хода снижает КПД усилителя.

Для устранения этих недостатков применяют более сложные схемы МУ.

Одним из достоинств магнитного усилителя является высокая стабильность характеристики «вход – выход» $I_p = f(I_y)$. Это позволяет вводить в МУ обратную связь, которая подает часть выходного сигнала на вход (рис. 8.5). Обратная связь (ОС) в МУ создается дополнительным подмагничиванием материала сердечника. Для этого на сердечник наматывается дополнительная обмотка обратной связи $W_{o.c.}$, включенная последовательно с рабочей обмоткой и нагрузкой. Чтобы получить эффект подмагничивания, обмотка $W_{o.c.}$ включена через выпрямительный мост, т.к. выходной ток МУ переменный. Выпрямленный ток $I_{o.c.}$ протекает по обмотке и создает магнитный поток обратной связи, направление которого постоянно и зависит от полярности тока $I_{o.c.}$

Если магнитные потоки обратной связи и управления одного направления, то обратная связь будет положительной; если они направлены встречно (вычитаются), то обратная связь – отрицательна. Характеристика «вход – выход» МУ с обратной связью несимметрична.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

На рисунке 8.3 приведена схема дроссельного магнитного усилителя.

Снять зависимость $Z=f(I_y)$, изменяя величину тока управления I_y в обмотке управления W_y от 0 до 7 мА (изменением положения подвижного контакта реостата R_y), измерить ток I_n , напряжение U на рабочей обмотке W_p .

Данные опыта занести в таблицу 8.1.

Вычислить величину полного сопротивления Z и построить характеристику $Z=f(I_y)$.

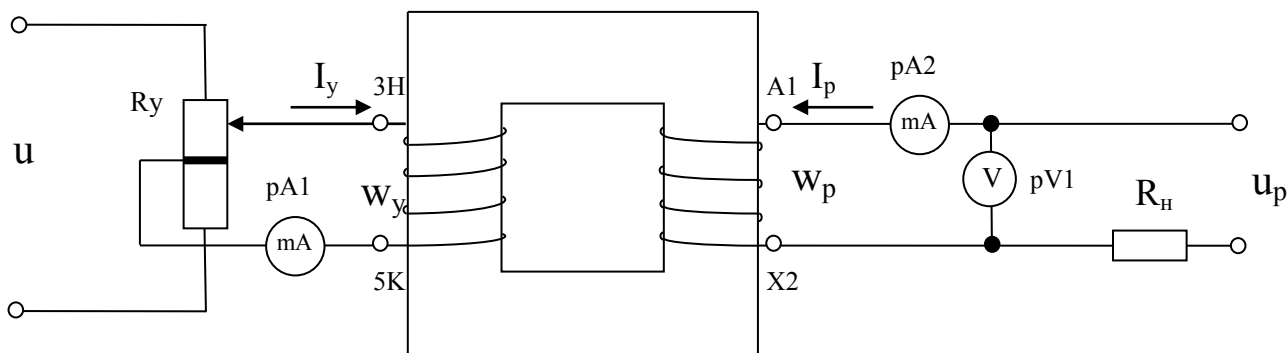


Рисунок 8.3 – Лабораторная схема дроссельного магнитного усилителя

Таблица 8.1 – Зависимость $Z=f(I_y)$

I_y, mA	0	1	2	3	4	5	6	7
I_n, mA								
U, B								
$Z, \text{Ом}$								

Собрать схему (рис. 8.4). Снять характеристику «вход – выход» ($I_n=f(I_y)$) для дроссельного магнитного усилителя.

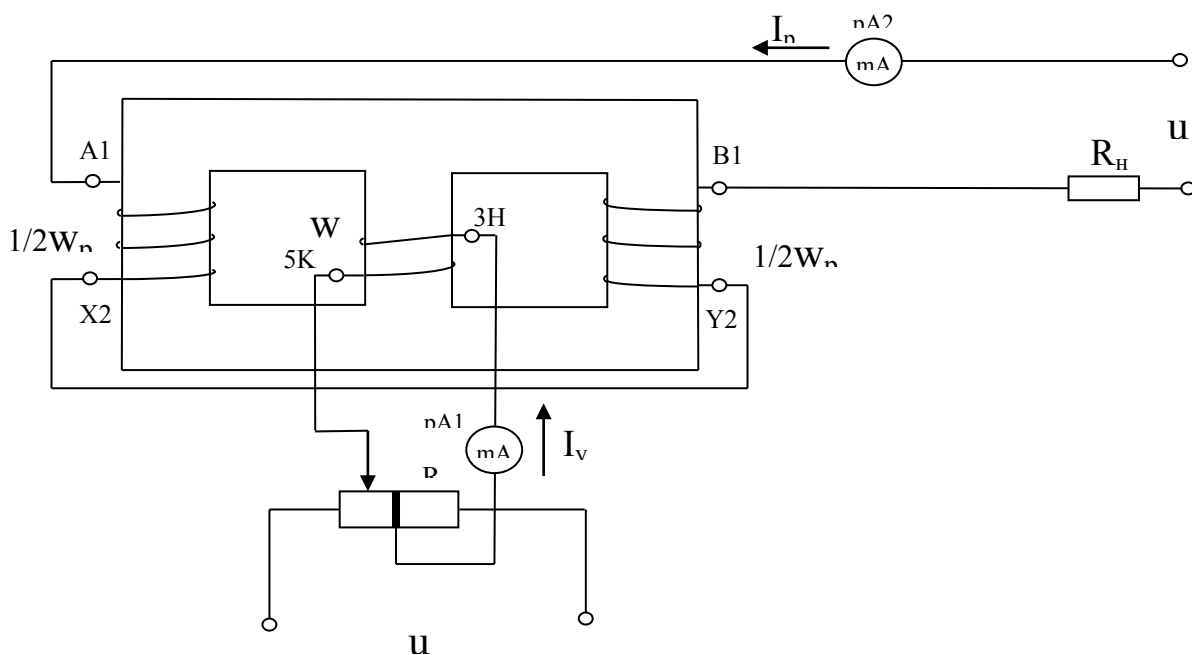


Рисунок 8.4 – Лабораторная схема симметричного магнитного усилителя

Изменяя величину тока управления I_y от -7mA до $+7\text{mA}$, измерить величину рабочего тока I_p в рабочей цепи. Данные опыта занести в таблицу 8.2 и построить характеристику «вход – выход».

Таблица 8.2 – Характеристика «вход – выход» ($I_n=f(I_y)$)

I_y, mA	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
I_n, mA															

Собрать схему (рис. 8.5). Снять характеристику «вход – выход» $I_n=f(I_y)$ для дроссельного МУ с обратной связью. Изменяя ток управления I_y от $+7\text{mA}$ до 0, измерить величину рабочего тока I_p для случая положительной обратной связи; изменяя I_y от -7mA до 0, измерить величину рабочего тока I_p для случая отрицательной обратной связи.

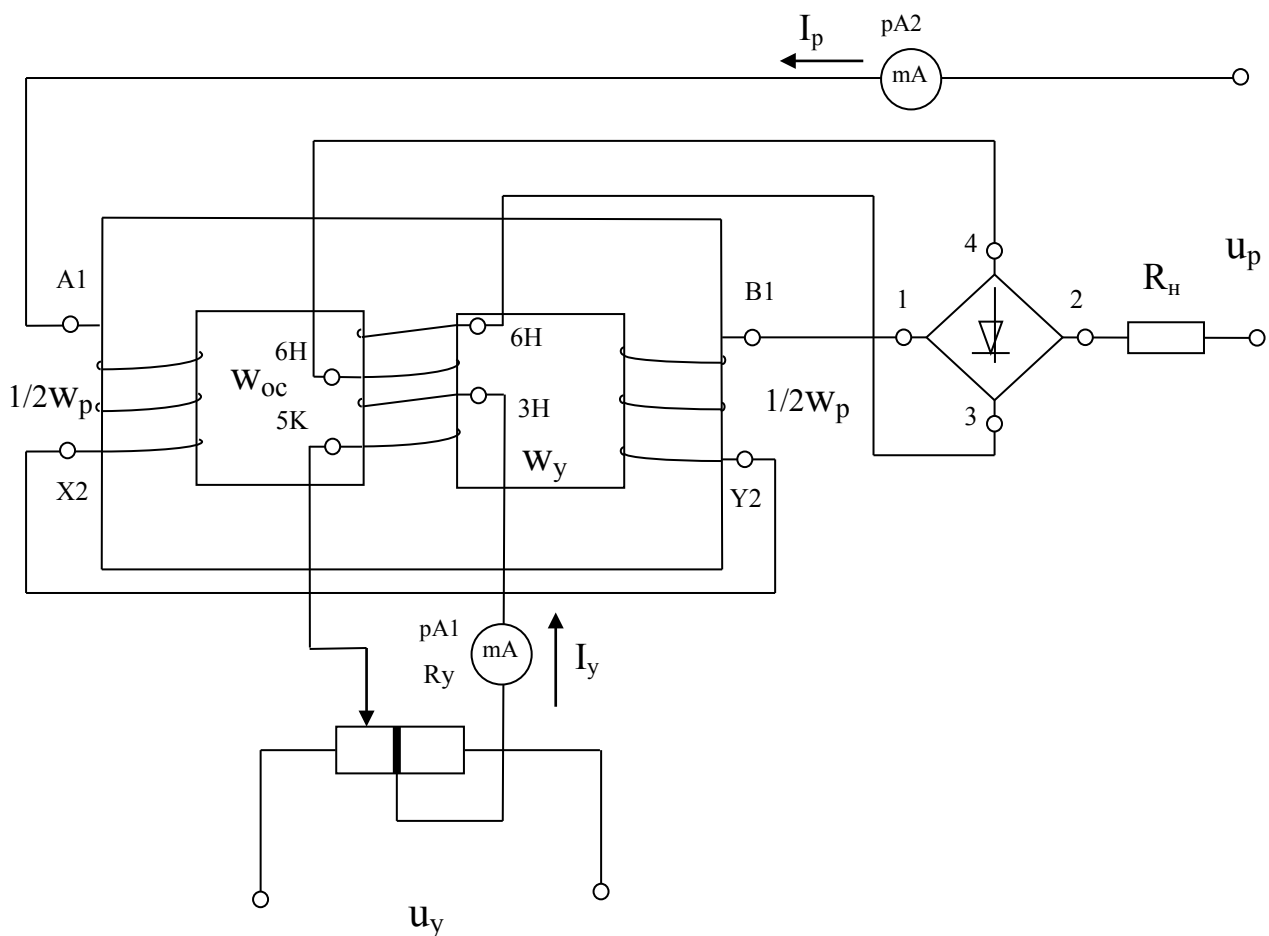


Рисунок 8.5 – Лабораторная схема магнитного усилителя с обратной связью

Данные опыта занести в таблицу 8.3; по результатам опыта построить характеристику «вход – выход».

Таблица 8.3 – Характеристика «вход – выход» ($I_n=f(I_y)$) с обратной связью

I_y, mA	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
I_n, mA															

Пользуясь данными таблиц 8.2 и 8.3 и учитывая, что $R_H=200$ Ом, а $R_y=400$ Ом, рассчитать коэффициент усиления:

– по току **Ошибка! Закладка не определена.Ошибка! Закладка не определена.** $K_i = \frac{\Delta I_p}{\Delta I_n}$ **Ошибка! Закладка не определена.;**

(8.4)

– по напряжению $K_u = \frac{\Delta I_p}{\Delta I_y} * \frac{R_H}{R_y} = K_i * \frac{R_H}{R_y}$;

(8.5)

– по мощности $K_p = \frac{\Delta I_p^2}{\Delta I_y^2} * \frac{R_H}{R_y} = K_i * K_u$.

(8.6)

Для случаев, когда обратная связь отсутствует, ОС положительная, ОС отрицательная. Данные занести в таблицу 8.4.

Таблица 8.4 – Коэффициенты усиления для ЭМУ

K	K_i	K_u	K_p
Без ОС			
ОС полож.			
ОС отр.			

Построить графики характеристик $Z=f(I_y)$, $I_n=f(I_y)$ опытов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение, устройство и принцип действия МУ.
2. Пояснить зависимость $Z=f(I_y)$.
3. Что представляет собой характеристика «вход – выход» и как она экспериментально снимается?
4. Назначение и принцип действия обратной связи в МУ.
5. Коэффициенты усиления K_i ; K_u ; K_p , порядок их расчета. Влияние обратной связи на коэффициент усиления.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9 АНАЛОГОВОЕ ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ В ЦИФРОВОЙ СИГНАЛ

Цель работы: изучить методы измерения аналоговых сигналов при помощи операционных усилителей. Ознакомиться с методами построения преобразователей *угол – код*.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Основной функцией датчика является преобразование входной величины любой физической природы в величину на выходе, более удобную для контроля, регулирования или управления.

Непосредственно использовать входной сигнал датчика для воздействия на последующие элементы автоматической системы не всегда возможно.

Преобразование выходной величины датчика в удобный для последующего использования и измерения вид осуществляется в измерительных схемах. Входной величиной измерительной схемы являются переменное сопротивление или напряжение.

Из большого разнообразия измерительных схем наиболее широко используются мостовые, дифференциальные и компенсационные.

Мостовые схемы применяют преимущественно совместно с датчиками, работа которых основана на изменении сопротивления.

Дифференциальные схемы применяют при необходимости сравнения двух величин или когда необходимо исключить синфазную составляющую в измеренном сигнале.

Компенсационные схемы используются при измерении малых ЭДС.

С развитием интегральной схемотехники все большее распространение получают измерительные схемы на основе ОУ. Этому соответствуют такие его качественные характеристики, как: возможность обеспечения постоянного коэффициента усиления; большой коэффициент подавления синфазного сигнала; малые смещения и дрейфы входных и выходных сигналов, малые выходные сопротивления и большое (10^6 – 10^8) выходное сопротивление.

Большинство физико-технических величин являются по своим свойствам аналоговыми величинами. Они определяются и представляются в форме, пригодной для соответствующей обработки сигнала с помощью аналоговых измерительных устройств.

Дискретизация и кодирование непрерывных сигналов. Под дискретизацией понимается преобразование непрерывных сигналов в дискретные. При этом используется дискретизация по времени и по уровню. Дискретизация по времени выполняется путем взятия отсчетов функции $U(t)$ в определенные дискретные моменты времени t_k . В результате непрерывная функция $U(t)$ заменяется совокупностью мгновенных значений:

$$U_k = U(t_k). \quad (9.1)$$

Обычно моменты отсчетов выбираются на оси времени равномерно, т. е.

$$t_k = K\Delta t. \quad (9.2)$$

Дискретизация по времени лежит в основе всех видов импульсной модуляции. *Дискретизация значений функции (уровня) носит название квантования.* Операция квантования сводится к тому, что вместо данного мгновенного значения сообщений $U(t)$ передаются ближайшие значения по установленной шкале дискретных уровней (рис. 9.1).

Дискретные значения по шкале уровней выбираются равномерно:

$$U_k = K\Delta U. \quad (9.3)$$

При квантовании вносится погрешность, т. к. истинные значения функции U заменяются округленными значениями U_k .

Погрешность $\varepsilon = U - U_k$ является случайной величиной и проявляется на выходе как дополнительный шум, наложенный на передаваемый сигнал. Дискретизация одновременно по уровню и по времени позволяет непрерывное сообщение преобразовать в дискретное, которое затем может быть закодировано и передано методами дискретной техники.

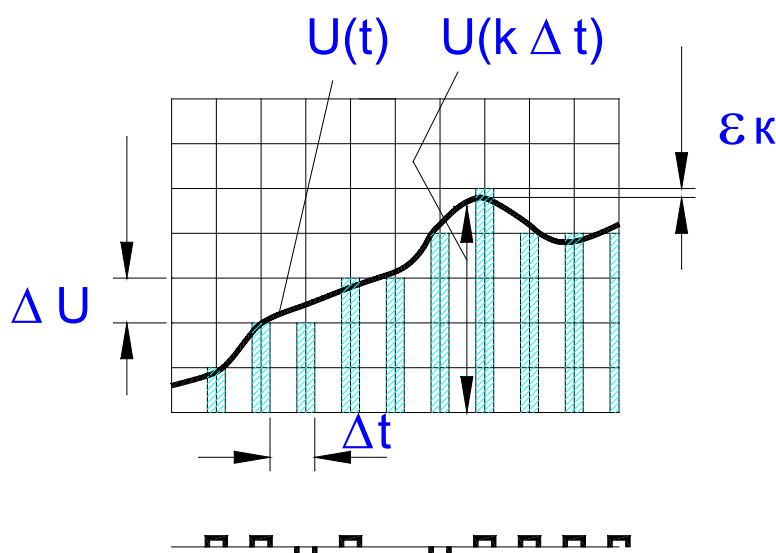


Рисунок 9.1 – Квантование аналогового сигнала

Достоинствами передачи сигналов путем их дискретизации являются возможность применения кодирования для повышения помехоустойчивости,

удобства обработки сигналов и сопряжения устройств связи с цифровыми ЭВМ.

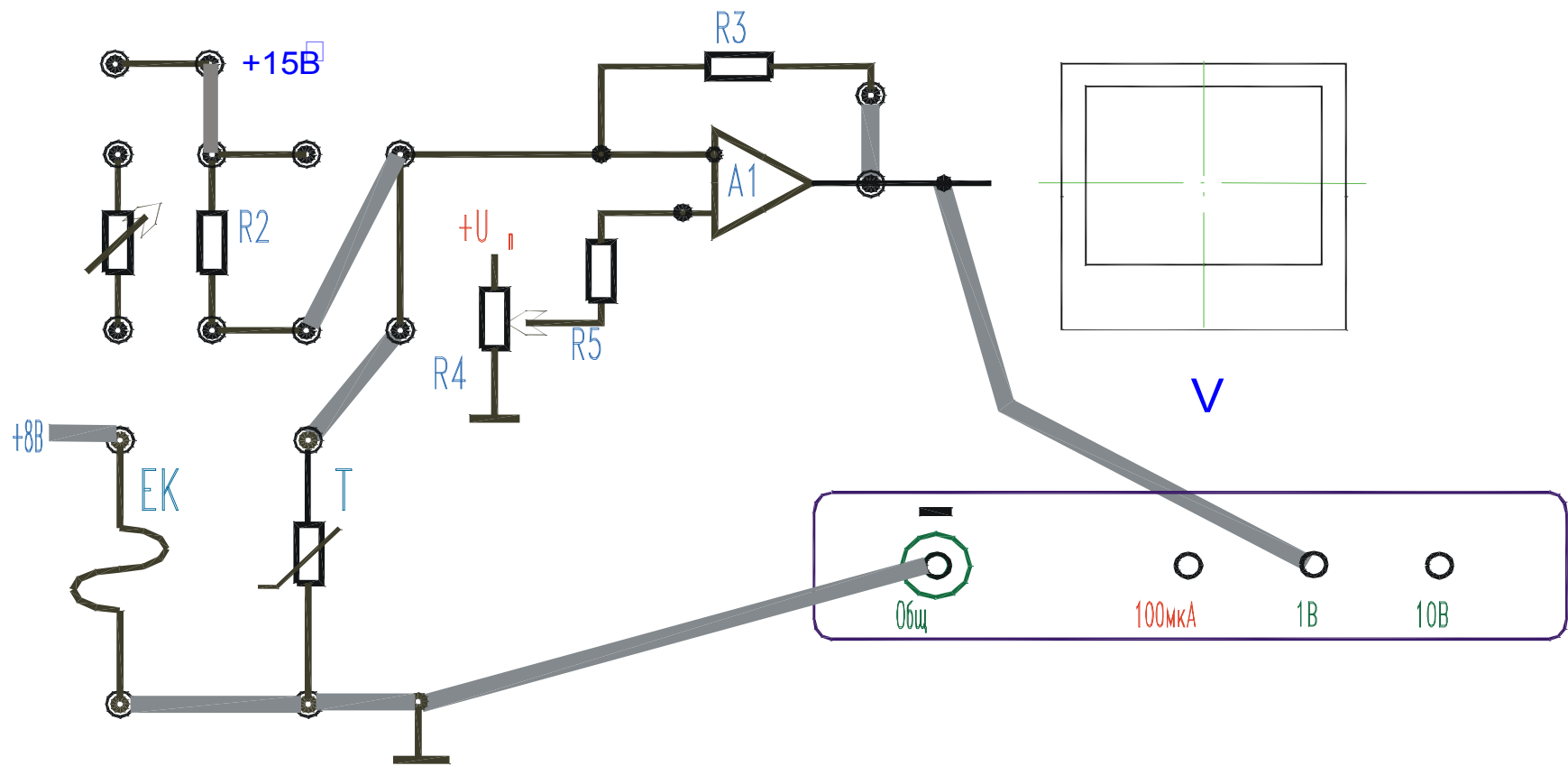


Рисунок 9.2 – Схема измерения угла поворота

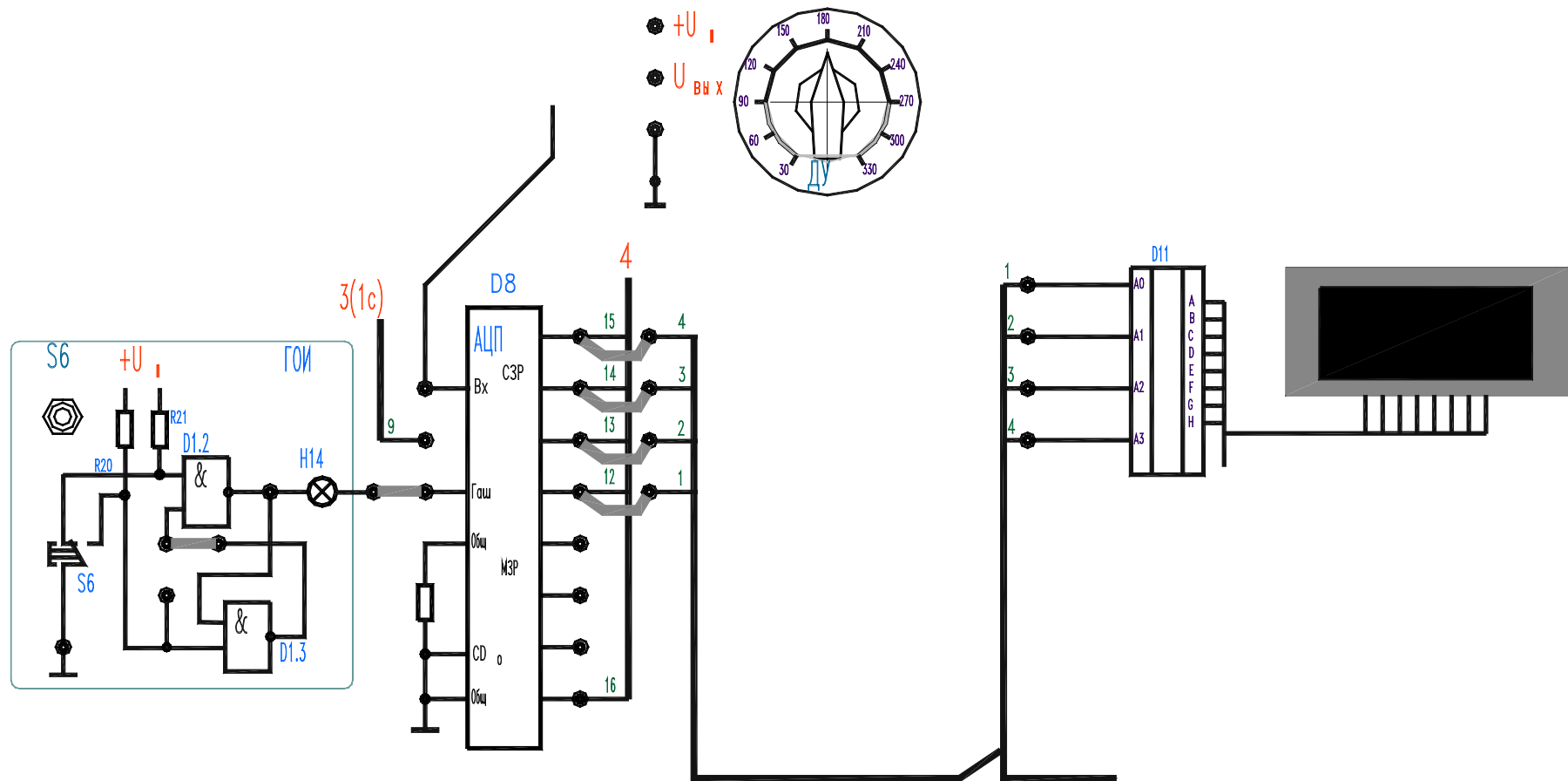


Рисунок 9.3 – Схема аналого-цифрового преобразователя (АЦП)

Большинство физико-технических величин являются по своим свойствам аналоговыми величинами. Они определяются и представляются в форме, пригодной для соответствующей обработки сигнала с помощью аналоговых измерительных устройств.

За последние годы определилась такая область метрологии, как преобразование аналоговых величин в цифровую форму.

Преобразователи угловых положений в цифровой код стали находить широкое применение после появления ЭВМ и их внедрения в системы автоматического регулирования. Существуют две тенденции развития преобразователей угол – код: совершенствование кодирующих устройств угловых перемещений и увеличение точности преобразователей.

Преобразователи угол – код подразделяются на три класса: преобразователи считывания, циклические преобразователи и накапливающие.

Циклические преобразователи преобразуют угол поворота в пропорциональный отрезок времени, который затем измеряется и кодируется. Этот способ часто используется в прецизионных и двухотсчетных преобразователях угла при кодировании параметров (фазы) электрических сигналов, в которые превращается угол поворота.

Однако построить преобразователи, позволяющие закодировать полный угол с разрешающей способностью в несколько секунд, по этому способу не удается.

Преобразователи считывания предполагают использование специальной маски, разбитой на дискретные участки. Угол в пределах участка характеризуется одной комбинацией кодовых значений, считывание которых производится при помощи линии считывания, перемещающейся по маске. Возможны различные варианты построения на основе фотоэлектрических, магнитных, контактных устройств. Наибольшая точность получена при использовании оптических кодовых масок.

Преобразователи с разрешающей способностью и погрешностью, равными нескольким секундам дуги, необходимо выполнять двухотсчетными, т. е. имеющими грубый отсчет, максимальный код которого соответствует полному обороту вала, и точный отсчет, «вес» которого соответствует некоторой доле оборота вала. Такая схема преобразователя предполагает наличие устройства, выполняющего роль преобразователя масштаба угла, т. е. преобразующего угол поворота в некоторую другую величину, как правило, в амплитуду или фазу электрического сигнала, причем это преобразование повторяется многократно за оборот вала.

Структурная схема двухотсчетного преобразователя угол – код дана на рисунке 9.4.

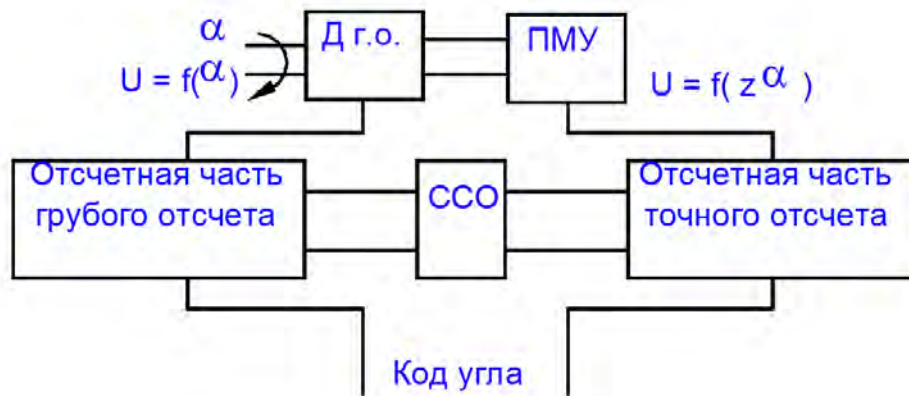


Рисунок 9.4 – Структурная схема двухотсчетного преобразователя угол – код

В состав преобразователя входят:

- ДГО – датчик грубого отсчета;
- ПМУ – преобразователь масштаба угла;
- отсчетная часть грубого отсчета;
- отсчетная часть точного отсчета;
- ССО – схема согласования отсчетов.

В данной схеме преобразователь угол – код можно разделить на две части:

1. Датчик угла, включающий в себя преобразователь масштаба угла (датчик точного отсчета), и датчик грубого отсчета.

2. Отсчетная часть преобразователя. Датчик угла располагается непосредственно на валу и служит для преобразования угла поворота в электрические сигналы, параметры которых зависят от этого угла. При этом сигналы с ПМУ многократно повторяют цикл изменения за оборот вала; число циклов равно коэффициенту преобразования масштаба Z . Это обстоятельство вносит неоднозначность отсчета. С целью обеспечить однозначность используется датчик грубого отсчета, который можно представить как вырожденный ПМУ с $Z = 1$.

Отсчетная часть преобразователя включает в себя разнообразные электронные устройства, служащие для получения эквивалента угла в цифровой форме. Сюда относятся схемы питания ПМУ и датчика грубого отсчета, усиления, измерения величины параметра сигнала, зависящего от угла α , формирования цифрового кода и т. п.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Разработайте и соберите схему для аналогового измерения угла на основе инвертирующего операционного усилителя (рис. 9.2).

2. Определите различные значения потенциала, поступающего от датчика угла ДУ.

3. Сравните носители информации и информационные параметры, а также вид сигналов, поступающих от измерительных устройств. Отобразите результаты проделанной работы в соответствующей таблице.

4. Произведите преобразование выходного сигнала датчика в цифровой сигнал, соединив выход схемы (рис. 9.2) с входом АЦП (рис. 9.3).

5. Подать питание +5В на ЦДУ. Вручную приведите в действие ЦДУ. Начиная с угла 30° , определить соответствующую двоичную величину на выходе датчика.

6. Сделайте сравнительный анализ аналогового и цифрового датчиков углов.

7. Отрадите в таблице преимущества и недостатки аналогового и цифрового датчиков углов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Первичные преобразователи угла поворота вала исполнительного механизма.

2. Виды измерительных схем.

3. Двухотсчетный преобразователь *угол – код*.

4. Пояснить работу схем.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10. ИЗУЧЕНИЕ СХЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СВЯЗЫВАНИЯ НЕСКОЛЬКИХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Цель работы: изучение средств и способов связывания нескольких асинхронных двигателей. Изучение схем последовательного включения двухфазных асинхронных двигателей.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Во многих производственных комплексах (в цехах с разветвленной сетью пневмотранспорта, в сушилах периодического действия, в системах электрического управления гидроприводом и др.) возникает необходимость осуществлять направленный последовательный запуск нескольких асинхронных двигателей. Например, в цехах с большой запыленностью необходимо сначала запустить двигатели вентиляторов отсоса воздуха, затем двигатели транспортеров или конвейеров и уже в последнюю очередь – двигатели производственных механизмов. Такое управление запуском производственных механизмов (приводов) может быть выполнено с помощью релейно-контакторных схем со специальными блокировками и реле времени.

По характеру работы релейные схемы разделяют на одноктактные и многотактные.

В многотактных схемах состояние исполнительных элементов определяется не только входными сигналами, но и последовательностью их поступления, а также состоянием исполнительных элементов.

В многотактных релейных схемах исполнительные реле работают как бегуны в эстафете, т. е. предусматривается определенная последовательность работы исполнительных реле. При исследовании схем решаются две задачи:

1. Синтез схем – нахождение структуры схемы по заданным условиям работы схемы.

2. Анализ схем – определение условий работы схемы или определенных ее элементов по имеющейся структурной схеме.

При анализе схем производят преобразования, при которых число промежуточных элементов стараются выбрать минимальным, т. к. при этом надежность схемы увеличивается. Преобразование схемы является подчас сложной и самостоятельной задачей. Рассмотрим возможность блокировочных связей для обеспечения определенной последовательности работы электродвигателей или их взаимосвязи.

Блокировочные связи очень часто используются в схемах путевого управления электродвигателями. В качестве блокировочных связей часто используют конечные выключатели, технологические контакты и др.

Принцип пути здесь означает, что какой-нибудь узел электрической схемы управления электродвигателями работает в зависимости от положения в пространстве органов машин и механизмов (столы, суппорты, головки станков и т. п.). Эти узлы выполняют часто такие задачи, как подача первоначальных команд на пуск или остановку двигателей только в определенной области перемещений, изменение режимов работы (в т.ч. скорости вращения двигателя) и др.

Управление многодвигательными приводами может быть выполнено с помощью реле времени, когда необходима временная последовательность включения электродвигателей (табл. 10.1).

Таблица 10.1 – Последовательность включения электродвигателей

Тактограмма работы системы по тактам		
1 такт	2 такт	3 такт
M1	M1, M2	M1, M2, M3

Рассмотрим работу такой схемы временного управления (рис. 10.1). Тактограмма работы системы изображена на рисунке 10.1.

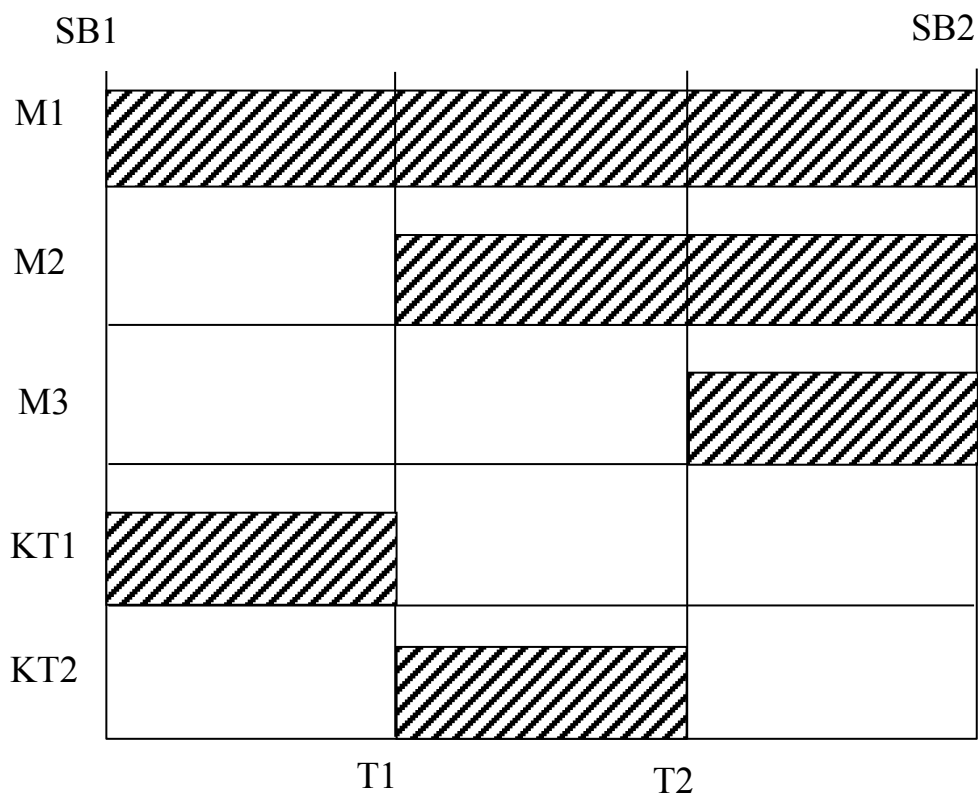


Рисунок 10.1 – Тактограмма работы схемы

По нажатию кнопки SB1 система подключается к питанию, и происходит запуск работы системы по заданной тактограмме. Схема содержит два реле времени KT1 и KT2. Срабатывание контактных групп данного типа реле происходит с некоторой задержкой времени, на которую предварительно настроено соответствующее реле времени. Цепи питания содержат систему защиты от коротких замыканий и перегрузок, состоящую из:

- 1) автоматического выключателя SF1;
- 2) плавких предохранительных вставок FU1, FU2.

Отключение схемы производится по нажатию кнопки SB2.

Учитывается, что кнопки SB1 и SB2 с самовозвратом. При разработке схем использовались как нормально замкнутые контакты, так и нормально разомкнутые.

Схема работает следующим образом (в соответствии с тактограммой на рисунке 10.2).

При нажатии SB1 к питанию подключаются катушки реле KM1 и KT1. Контакт KM1.1 шунтирует кнопку SB1, при этом при отпускании SB1 цепь остается под питанием. Контакт KM1.2 подключает двигатель M1 к питанию. Реле времени начинает отсчет времени t_1 . Через t_1 замыкается контакт KT1.1 и подключает к питанию катушку реле KM2. Контакт KM2.1 подключает к питанию катушку реле времени KT2, которое начинает отсчет времени t_2 . Контакт KM2.2 подключает двигатель M2 к питанию. Через время t_2

замыкается контакт КТ2.1 и подключает к питанию катушку реле КМ3. Контакт КМ3.1 подключает двигатель М3 к питанию. Все три двигателя вращаются. При нажатии на кнопку SB2 цепь отключается от питания, и все контакты возвращаются в исходное положение.

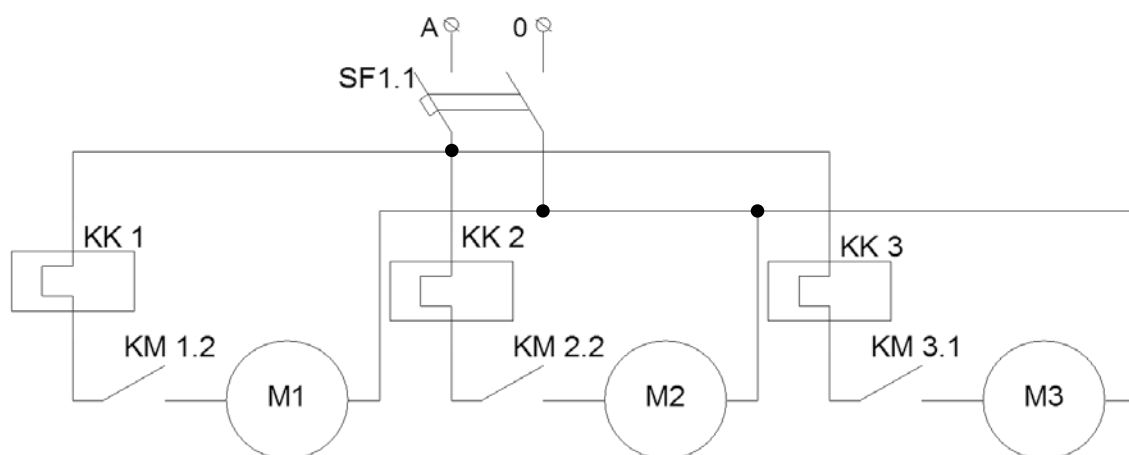
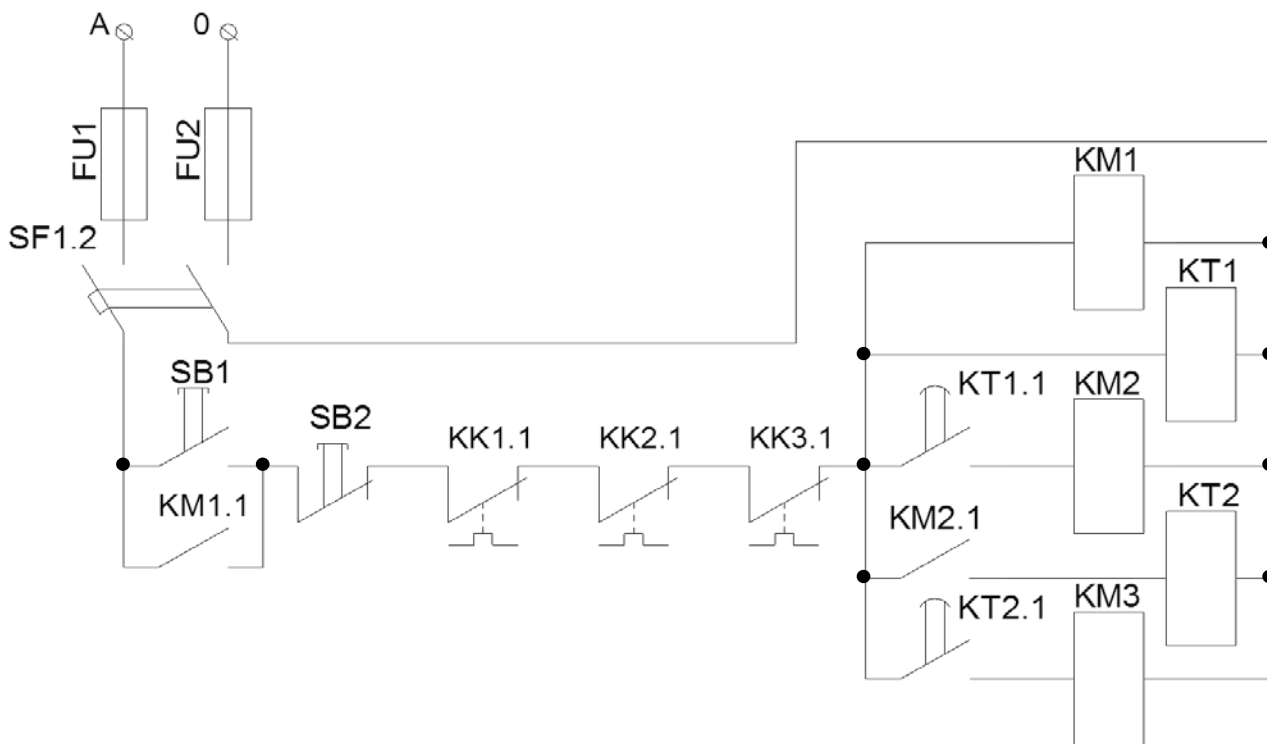


Рисунок 10.2 – Схема управления по функции времени

Пример построения последовательности вкл 1-2-3, выкл 3-2-1 представлен на рисунке 10.3.

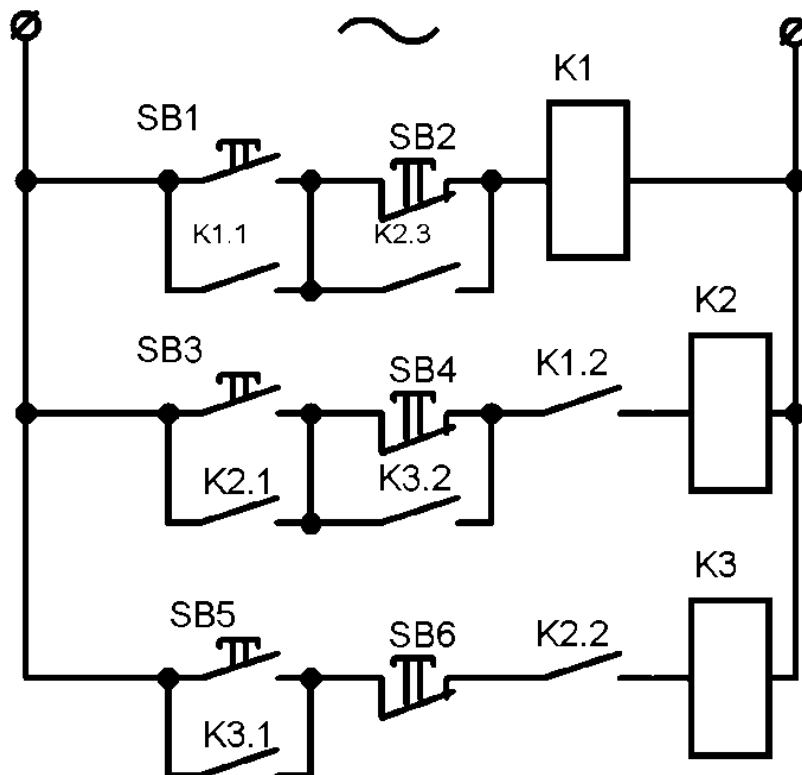


Рисунок 10.3 – Схема на релейно-контактных элементах

Кнопки SB1, SB3, SB5 предназначены для пуска, соответственно 1-го, 2-го и 3-го двигателей.

Кнопки SB2, SB4, SB6 – для останова 1-го, 2-го и 3-го двигателей.

В начальный момент времени все двигатели выключены, т. е. не подается питание на катушки реле K1, K2, K3.

При нажатии пусковых кнопок возможно включение только K1, т. к. включение K2 заблокировано нормально разомкнутой контактной группой K1.2, а K3 – K2.2. Это позволяет организовать последовательность включения – сначала можно включить K1, после этого K2 и затем K3.

Контактные группы K1.1, K2.1, K3.1 шунтируют кнопки пуск при подключении к питанию соответствующей катушки реле.

При отключении кнопки стоп SB2, SB4 шунтированы K3.2, K2.3. Это позволяет реализовать последовательность выключения – сначала можно выключить только K3, после этого K2 и только затем K1.

Основным элементом рассмотренных схем являются электромагнитные реле. Рассмотрим их устройство и принцип действия.

Электромагнитные реле предназначены для коммутации электрических цепей устройств электроавтоматики. Различают реле постоянного тока и переменного тока. На рисунке 10.4 показано устройство реле постоянного тока.

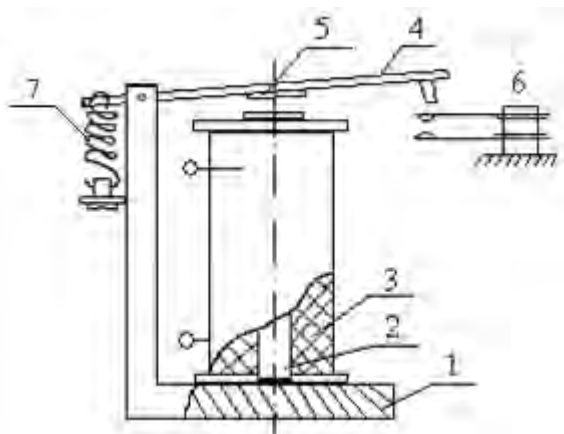


Рисунок 10.4 – Устройство реле постоянного тока:

1 – корпус; 2 – сердечник; 3 – обмотка; 4 – якорь; 5 – штифт отлипания;
6 – контактные пружины; 7 – возвратная пружина

При прохождении по обмотке тока возбуждается магнитный поток, который, проходя по магнитопроводу, замыкается через воздушный зазор. В этом случае якорь притягивается к сердечнику, что приводит к замыканию или размыканию соответствующих контактов.

Наиболее важными параметрами электромагнитных реле являются: токи срабатывания $I_{ср}$ и отпускания $I_{отп}$, коэффициент запаса K_z , коэффициент возврата $K_v = \frac{I_{отп}}{I_{ср}}$, время срабатывания $t_{ср}$ и время отпускания $t_{отп}$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему управления тремя двигателями (рисунок 10.2 без тепловых реле – КК) и дать проверить ее преподавателю, после чего можно включить и убедиться в последовательности запуска двигателей.

2. Заменяв нормально открытые контакты на нормально закрытые (по указанию преподавателя), включить схему и убедиться в нарушении первоначальной последовательности работы электродвигателей. Объяснить, чем обеспечивается данный порядок работы двигателей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Описание работы схемы исходной и измененной.
2. Что такое электромагнитное реле, каков принцип его действия?
3. В чем отличие электромагнитного реле от магнитных пускателей, контакторов?
4. Назвать и дать краткую характеристику принципов управления многодвигательными системами.
5. Виды реле, их назначение.
6. Основные параметры реле и принцип работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11. ТАРИРОВКА ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ С ЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ПО УРОВНЮ

Цель работы: определение погрешности измерений технологических параметров автоматизированной системы управления. Проведение тарировки датчика давления по уровню.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Лабораторно-технический комплекс СГЛ-100Л предназначен для изучения принципов действия датчиков уровня и давления, работы исполнительных механизмов. Упрощенная технологическая схема лабораторно-технического комплекса СГЛ-100Л представлена на рисунке 11.1.

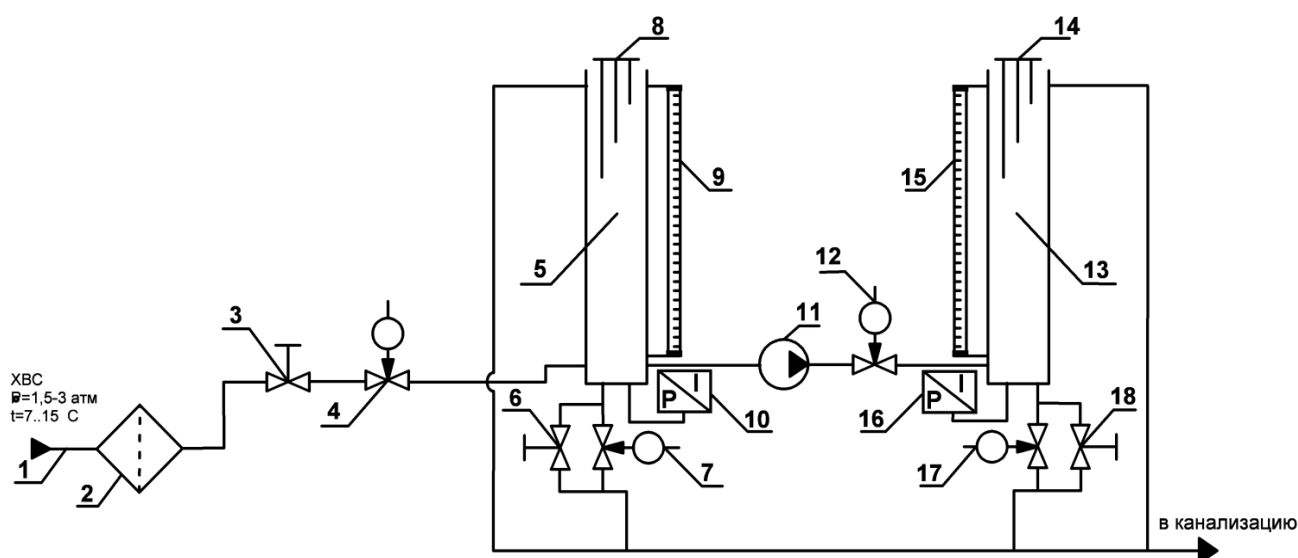


Рисунок 11.1 – Упрощенная технологическая схема стенда:

- 1 – питающая труба ХВС; 2 – фильтр грубой очистки; 3 – шаровой кран входной; 4 – электромагнитный клапан входной; 5 – емкость 1; 6 – шаровой кран слива емкости 1; 7 – электромагнитный клапан слива емкости 1;
- 8 – кондуктометрический датчик емкости 1; 9 – пьезометр емкости 1;
- 10 – гидростатический преобразователь емкости 1; 11 – насос;
- 12 – электромагнитный клапан сообщающий; 13 – емкость 2;
- 14 – кондуктометрический датчик емкости 2; 15 – пьезометр емкости 2;
- 16 – гидростатический преобразователь емкости 2; 17 – электромагнитный клапан слива емкости 2; 18 – шаровой кран слива емкости 2

На рисунке 11.2 приведен гидростатический датчик уровня производства ООО «АПЛИСЕНС».

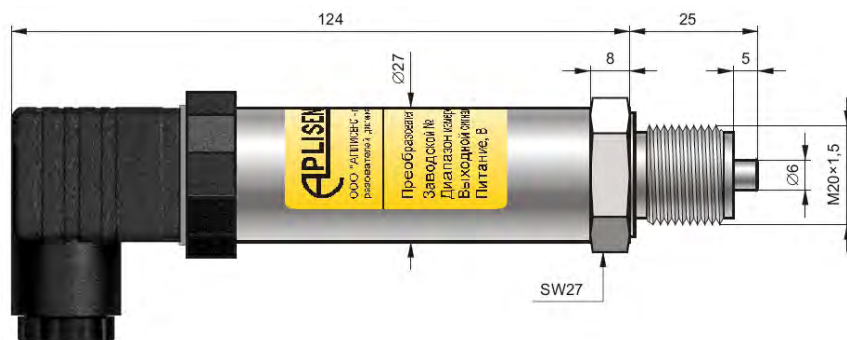


Рисунок 11.2 – Датчик уровня РС-28

В рассматриваемом датчике измерительным элементом является кремниевая монокристаллическая структура, встроенная в приемник давления, который отделен от измеряемой среды разделительной мембраной и заполнен специальной манометрической жидкостью. Залитая силиконовым компаундом электронная схема помещена в металлическом корпусе. В зависимости от выбранного выходного сигнала (4-20 мА, 0-10 В, 0-5 В) измеряемое давление преобразуется в унифицированный электрический сигнал, который в свою очередь преобразуется в величину уровня жидкости в емкости.

Зависимость между высотой столба жидкости и оказываемым им давлением выражается следующей зависимостью:

$$h = \frac{P}{\rho g}, \quad (11.1)$$

где P – давление в данной точке; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; h – высота столба жидкости над чувствительным элементом.

Экран «Лабораторная работа 1» показан на рисунке 11.3.

Основные элементы, расположенные на экране проведения лабораторной работы 1 (рис. 11.3):

- 1) клапан наполнения первой емкости от ХВС (зеленый цвет – открыт, серый цвет – закрыт);
- 2) строка информации для пользователя;
- 3) клапан слива воды из первой емкости (зеленый цвет – открыт, серый цвет – закрыт);
- 4) насос перелива воды из первой емкости во вторую ХВС (зеленый цвет – включен, серый цвет – отключен);
- 5) клапан между емкостями (зеленый цвет – открыт, серый цвет – закрыт);
- 6) клапан слива воды из второй емкости (зеленый цвет – открыт, серый цвет – закрыт);

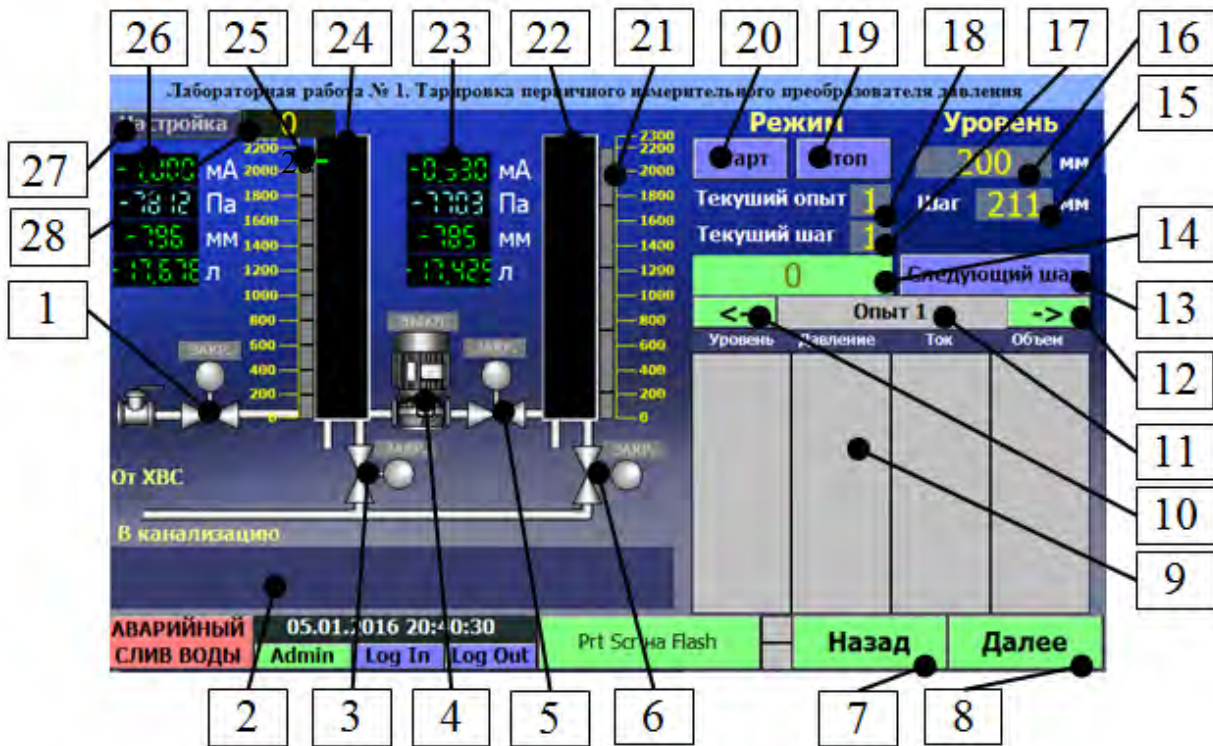


Рисунок 11.3 – Экран проведения лабораторной работы 1

- 7) кнопка перехода на предыдущий экран, в данном случае переход на экран настройки параметров лабораторной работы 1;
- 8) кнопка перехода на следующий экран, в данном случае переход на экран графического построения характеристики;
- 9) таблица с полученными данными;
- 10) кнопка для переключения отображения данных из предыдущего опыта;
- 11) строка, в которой указан номер опыта, данные которого отображаются в таблице полученных данных;
- 12) кнопка для переключения отображения данных со следующего опыта;
- 13) кнопка для перехода на следующий шаг при выполнении опыта;
- 14) поле ввода данных пользователем;
- 15) цифровой индикатор, отображающий текущий шаг приращения уровня от точки к точке;
- 16) цифровой индикатор, отображающий текущую точку опыта;
- 17) индикатор текущего шага;
- 18) индикатор текущего опыта;
- 19) кнопка останова опыта;
- 20) кнопка запуска процесса выполнения опыта;
- 21) индикаторы уровня по кондуктометрическим датчикам второй емкости;

22) индикатор уровня по аналоговому преобразователю давления второй емкости;

23) данные от аналогового преобразователя давления второй емкости (выходной ток, мА; давление, Па; уровень, мм; объем, л);

24) индикатор уровня по аналоговому преобразователю давления первой емкости;

25) индикаторы уровня по кондуктометрическим датчикам первой емкости;

26) данные от аналогового преобразователя давления первой емкости (выходной ток, мА; давление, Па; уровень, мм; объем, л);

27) кнопка для отображения/скрытия поле ввода пароля доступа и перехода на экран настроек;

28) поле ввода пароля доступа к настройкам.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Зайдите на главный экран, сделайте скриншот экрана.
2. Зайдите на экран подготовки стенда, сделайте скриншот экрана.
3. Зайдите на экран проведения лабораторной работы 1, сделайте скриншот экрана.
4. Зайдите на экран настройки параметров лабораторной работы 1, введите значения уровней выданных преподавателем, сделайте скриншот экрана.
5. Откройте окно графика полученных данных, сделайте скриншот экрана.
6. Зайдите на экран настройки параметров лабораторной работы 1, введите значения коэффициентов, выданных преподавателем, сделайте скриншот экрана.
7. Расчитайте погрешность датчика уровня, сравните расчитанную погрешность с погрешностью, установленной заводом-изготовителем. Внесите данные в таблицу 11.1.

Таблица 11.1 – Полученные данные

№ п/п	Уровень (визуально), мм	Давление, Па	Уровень (расчетный), мм	Абсолютная погрешность, мм	Относительная погрешность, %
1					
...					
10					

Абсолютная погрешность измерения Δ – разность между результатом измерения x и истинным значением x_0 измеряемой величины:

$$\Delta = x - x_0. \quad (11.2)$$

Абсолютная погрешность выражается в единицах измеряемой величины.

Относительная погрешность измерения σ – отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины x_0 :

$$\sigma = \frac{\Delta}{x_0} = \frac{x - x_0}{x_0} \cdot 100\%. \quad (11.3)$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие погрешности измерений вы знаете?
2. Какие датчики измерений используются в данной системе управления?
3. Опишите характеристики и назначение модуля дискретных входов.
4. Опишите характеристики и назначение датчика уровня кондуктометрического типа.
5. Перечислите основные функциональные элементы системы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ В РАСЧЕТАХ НА ЭВМ

Цель работы: исследование устойчивости одноконтурных систем автоматического регулирования и управления.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Устойчивость – способность системы возвращаться в исходное состояние равновесия после приложения и снятия воздействия, которое вывело ее из этого состояния.

Система автоматического регулирования может быть спроектирована таким образом, что в независимости от комплекса этих значений система может быть неустойчивой, в этом случае она называется структурно-неустойчивой. Чтобы добиться ее устойчивости, необходимо поменять всю ее структуру.

Структурно устойчивой является система, в которой добиться устойчивости можно, изменяя параметры K и T , не изменяя при этом структуру системы.

Для определения устойчивости необходимо получить характеристическое уравнение системы. Для этого необходимо записать передаточную функцию системы в замкнутом состоянии и приравнять ее знаменатель к нулю. Также характеристическое уравнение можно получить приравняв к нулю сумму числителя и знаменателя передаточной функции системы в разомкнутом состоянии.

Характеристическое уравнение линейной САУ можно представить в виде:

$$D(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0. \quad (12.1)$$

Гурвиц разработал алгебраический критерий устойчивости в форме определителей, составляемый из коэффициентов характеристического уравнения системы.

Он формулируется следующим образом: для того, чтобы система автоматического управления была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все коэффициенты характеристического уравнения и определители Гурвица до $(n-1)$ -го порядка включительно были положительны.

Матрицу Гурвица строят из коэффициентов характеристического уравнения по следующему правилу: по главной диагонали определителя слева направо выписывают все коэффициенты характеристического уравнения от a_{n-1} до a_0 в порядке убывания индексов. Столбцы вверх от главной диагонали дополняют коэффициентами характеристического уравнения с последовательно убывающими индексами, а столбцы вниз – коэффициентами с последовательно возрастающими индексами. На место коэффициентов с индексами больше n и меньше нуля проставляют нули.

Отчеркивая в главном определителе Гурвица диагональные миноры, получим определители Гурвица низшего порядка Δ_i .

$$\begin{array}{c} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta_n \end{array} \left| \begin{array}{ccccccc} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_4 & a_2 & a_0 \end{array} \right|$$

Рисунок 12.1 – Матрица Гурвица и ее определители

По критерию Гурвица можно определить критическое значение параметра, при котором система находится на границе устойчивости. Для

этого необходимо старший из определителей, содержащих данный параметр, приравнять к 0 и решить полученное уравнение.

Пример решения. Используя критерий Гурвица, определить устойчивость и критический коэффициент усиления системы, структурная схема которой представлена на рисунке 12.2. Параметры системы: $K_1 = 10$, $K_2 = 2$, $T_1 = 0,01c$, $T_2 = 0,1c$.

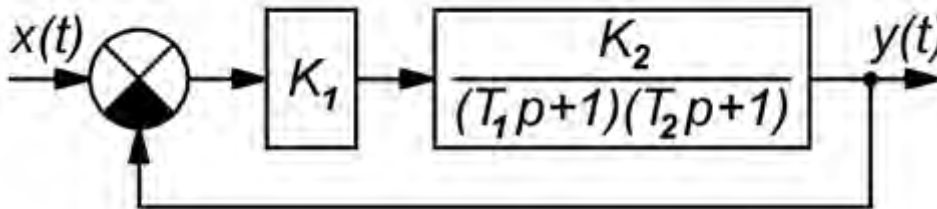


Рисунок 12.2 – Структурная схема исследуемой системы

Передаточная функция системы в разомкнутом состоянии:

$$W_{\text{РАЗ}}(p) = \frac{K_1 K_2}{p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}. \quad (12.2)$$

Находим характеристическое уравнение согласно формуле (10.2):

$$D(p) = p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) + K_1 K_2 = 0; \quad (12.3)$$

$$T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2) p^2 + p + K_1 K_2 = 0;$$

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0. \quad (12.4)$$

Найдем значения коэффициентов характеристического уравнения:

$$a_3 = T_1 T_2 = 0,01 \cdot 0,1 = 0,001;$$

$$a_2 = T_1 + T_2 = 0,01 + 0,1 = 0,11;$$

$$a_1 = 1;$$

$$a_0 = K_1 K_2 = 10 \cdot 2 = 20.$$

Все коэффициенты характеристического уравнения положительны, следовательно, необходимое условие устойчивости выполняется.

Составляем главный определитель Гурвица:

$$\begin{vmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{vmatrix}. \quad (12.5)$$

Найдем значения определителей Гурвица до $(n-1)$ -го порядка включительно, т. е. до третьего порядка:

$$\Delta_1 = a_2 = 0,11 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} = a_2 a_1 - a_3 a_0 = 0,11 \cdot 1 - 0,001 \cdot 20 = 0,09 > 0;$$

Так как определители $\Delta_1, \Delta_2 > 0$, то система *устойчива*.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Определить устойчивость системы, используя критерии устойчивости Гурвица. Структурная схема системы изображены на рисунке 12.3. Параметры системы для различных вариантов представлены в таблице 12.1.

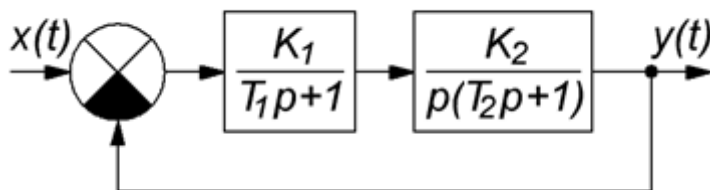


Рисунок 12.3 – Схема № 1

Таблица 12.1 – Варианты заданий

№ варианта	Параметры			
	K_1	K_2	T_1	T_2
1	2	1,25	0,05	2
2	4	1,25	0,01	0,5
3	5	1	0,05	2
4	10	2,5	1	0,25
5	10	4	1	0,25
6	16	2	0,2	1
7	4	1	0,02	0,5
8	8	1	0,5	0,05
9	8	1	0,16	2,5
10	5	1,25	0,2	4
11	5	1	0,08	2
12	10	2	1	0,2
13	8	1	0,04	1
14	4	2	0,1	0,02
15	4	1	0,2	0,01

2. Выполнить компьютерное моделирование рассматриваемой системы (программа SamSim).

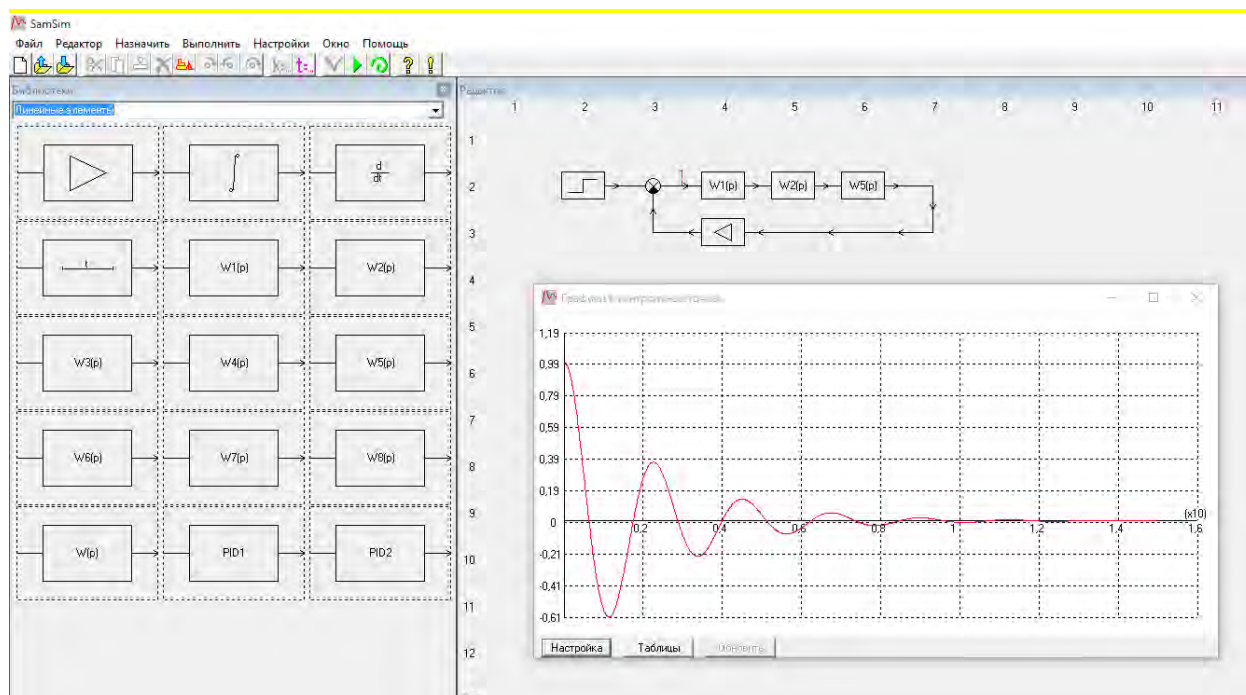


Рисунок 12.3 – Пример моделирования САУ промышленным объектом

3. Сделать выводы о соответствии результатов расчетов моделированию.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что подразумевается под устойчивостью системы.
2. Дать определение критерия устойчивости по Гурвицу.
3. Какая система является структурно устойчивой?
4. Какая система является структурно неустойчивой?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: изучение основных законов регулирования. Определение основных показателей качества процесса регулирования.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Основным блоком конструкции прессов, широко распространенных в легкой промышленности и предназначенных для выполнения операций вулканизации, формования, влажно-тепловой обработки, дублирования и

т. п., является плита с электронагревательными элементами. Эти пресса являются тепловыми объектами, для обеспечения температурных режимов которых используют различного рода регуляторы. Регулятор и объект образуют систему регулирования. Задача системы регулирования для большинства указанных технологических операций сводится к стабилизации температуры или изменению ее по определенному закону.

Система автоматического регулирования (САР) называется *линейной*, если все ее элементы в динамике описываются линейными уравнениями. Линейные регуляторы, в зависимости от законов регулирования, делят на пять типов:

- пропорциональный П-регулятор;
- интегральный И-регулятор;
- пропорционально-интегро-дифференциальный ПИД-регулятор;
- пропорционально-дифференциальный ПД-регулятор;
- пропорционально-интегральный ПИ-регулятор.

Законом регулирования называют функциональную связь между управляющим воздействием регулятора (его выходным сигналом) и отклонением регулируемого параметра от заданного значения (его входным сигналом).

$$U(t) = F[\Delta(t)], \quad \Delta(t) = g(t) - Y(t), \quad (13.1)$$

где $g(t)$ – заданное значение,

$Y(t)$ – текущее значение на выходе объекта управления (ОУ).

Правая часть уравнения может содержать не только отклонение $\Delta(t)$, но и его производные и интегралы. Введение производных и интегралов в закон регулирования позволяет изменять свойства САР: устойчивость, точность, качество переходного процесса.

Простейшим является (пропорциональный) *П-регулятор*, уравнение которого

$$U(t) = K_p \Delta(t), \quad (13.2)$$

а передаточная функция

$$W(p) = K_p. \quad (13.3)$$

П-регулятор является простейшим линейным статическим регулятором. Статические регуляторы не могут полностью ликвидировать отклонение параметра от заданного значения, т. е. они дают остаточную (статическую) ошибку. Регулирующий орган в системе с П-регулятором неподвижен, не только при ошибке, равной нулю $\Delta(t)=0$, но и при постоянной величине ошибки $\Delta(t)=const$.

Статическим является и *ПД-регулятор*, закон регулирования которого записывается следующим образом

$$U(t) = K\Delta t + \frac{T_{np} d\Delta t}{dt}, \quad (13.4)$$

где T_{np} – время предварения.

Передаточная функция ПД-регулятора

$$W(p) = K(1 + T_{np}p), \quad (13.5)$$

где K – параметр настройки.

ПД-регулятор называют регулятором с предварением, т. к. он реагирует на величину отклонения и скорость его изменения, т. е. регулирующий орган начинает перемещаться при изменении скорости отклонения, что увеличивает быстродействие регулятора.

Статической ошибки удастся избежать, если включить в закон регулирования интегральную составляющую или использовать *И-регулятор*.

Закон регулирования И-регулятора

$$U(t) = \frac{1}{T_u} \int_0^t \Delta(t) dt, \quad (13.6)$$

а передаточная функция

$$W(p) = \frac{1}{T_u p}, \quad (13.7)$$

где T_u – время интегрирования – параметр настройки.

Переходный процесс в системе с И-регулятором носит медленно затухающий колебательный характер и снижает устойчивость САУ. Регулирующий орган в такой системе неподвижен только при равенстве заданного и измеренного значения параметра, т. е. при отсутствии ошибки.

ПИ-регулятор – пропорционально-интегральный. Закон регулирования

$$U(t) = K[\Delta(t)] + \frac{1}{T_u} \int_0^t \Delta(t) dt \quad (13.8)$$

и передаточная функция

$$W(p) = \frac{K_p(1 + T_u p)}{T_u p}, \quad (13.9)$$

где K_p – параметр настройки.

ПИ-регулятор совмещает в себе положительные свойства обоих регуляторов, т. е. является астатическим и обладает достаточным быстродействием. При появлении отклонения регулируемой величины от заданного значения такой регулятор вначале ведет себя как П-регулятор, т. е. быстро вырабатывает управляющее воздействие на ликвидацию отклонения, затем вступает в действие интегральная составляющая, сводящая ошибку к нулю.

Лучшими свойствами обладает ПИД-регулятор, закон регулирования которого

$$U(t) = K[\Delta(t)] + \frac{1}{T_u} \int_0^t \Delta(t) dt + T_{np.} \frac{d\Delta(t)}{dt}, \quad (13.10)$$

а передаточная функция

$$W(p) = \frac{(T_{np.} T_u p^2 + T_u p + 1) K}{T_u p}. \quad (13.11)$$

Такой регулятор сочетает в себе положительные свойства всех более простых регуляторов, обладает высоким быстродействием, не дает остаточной ошибки, колебательный переходный процесс быстро затухает.

Система регулирования считается работоспособной, если переходный процесс в ней затухает, т. е. система является устойчивой. Однако устойчивость – недостаточный критерий оценки качества системы регулирования.

Помимо устойчивости системы к возмущениям, необходимо, чтобы переходные процессы, возникающие в автоматической системе благодаря наличию разного рода возмущающих и управляющих воздействий, удовлетворяли определенным требованиям. Требования к качеству переходного процесса в автоматической системе регулирования для различных систем различны.

Для оценки качества переходного процесса при регулировании используют прямые и косвенные методы. Прямые методы предполагают наличие, полученное тем или иным способом, графика переходного процесса. В действующих САР график изменения регулируемой величины во времени может быть получен экспериментально. Если известно дифференциальное уравнение системы, то по его решению также может быть построен график переходного процесса.

Качество переходного процесса оценивают следующими показателями:

1. Перерегулирование.

Перерегулирование характеризует максимальное динамическое отклонение регулируемой величины от установившегося значения $Y_{уст.}$ (рис.

9.1). Обычно перерегулирование выражают в процентах от значения $Y_{уст.}$. Абсолютная величина ΔY_{max} определяется по графику переходного процесса:

$$\Delta Y_{max} = Y_{max} - Y_{уст.} \quad (13.12)$$

Соответственно перерегулирование будет определяться выражением

$$\sigma = \frac{\Delta Y_{max}}{Y_{уст.}} 100\%. \quad (13.13)$$

2. Время регулирования.

Время регулирования характеризует быстроедействие САР и представляет собой время t_p , отсчитываемое от начала переходного процесса, по истечении которого отклонение регулируемой величины от нового установившегося значения делается меньше и будет оставаться меньше определенной заранее заданной величины Δ . Обычно принимается $\Delta = (0,01 - 0,05)$. Таким образом, переходный процесс в системе считается закончившимся, когда регулируемая величина начинает отличаться от своего установившегося значения не более чем на 1...5%. Чем меньше величина t_p , тем выше быстроедействие системы.

3. Степень затухания.

Степень затухания характеризует колебательный переходный процесс при регулировании. Степень затухания определяют по формуле

$$\psi = \frac{\Delta Y_{max} - \Delta Y_2}{\Delta Y_{max}}. \quad (13.14)$$

Для устойчивой САР $0 < \psi \leq 1$, чем ближе ψ к единице, тем быстрее затухает переходный процесс, следовательно, тем больше запас устойчивости. Например, при $\psi = 0,9$ каждая последующая амплитуда колебаний меньше предыдущей в 10 раз.

Колебательный переходный процесс можно оценивать и числом колебаний за время регулирования.

Обычно считают, что число колебаний не должно быть больше двух или трех.

4. Остаточная (статическая) ошибка.

Остаточная (статическая) ошибка – характеризует точность системы и определяет отклонение регулируемого параметра от нового установившегося значения после завершения переходного процесса. Статическая ошибка возникает в системах со статическим регулятором.

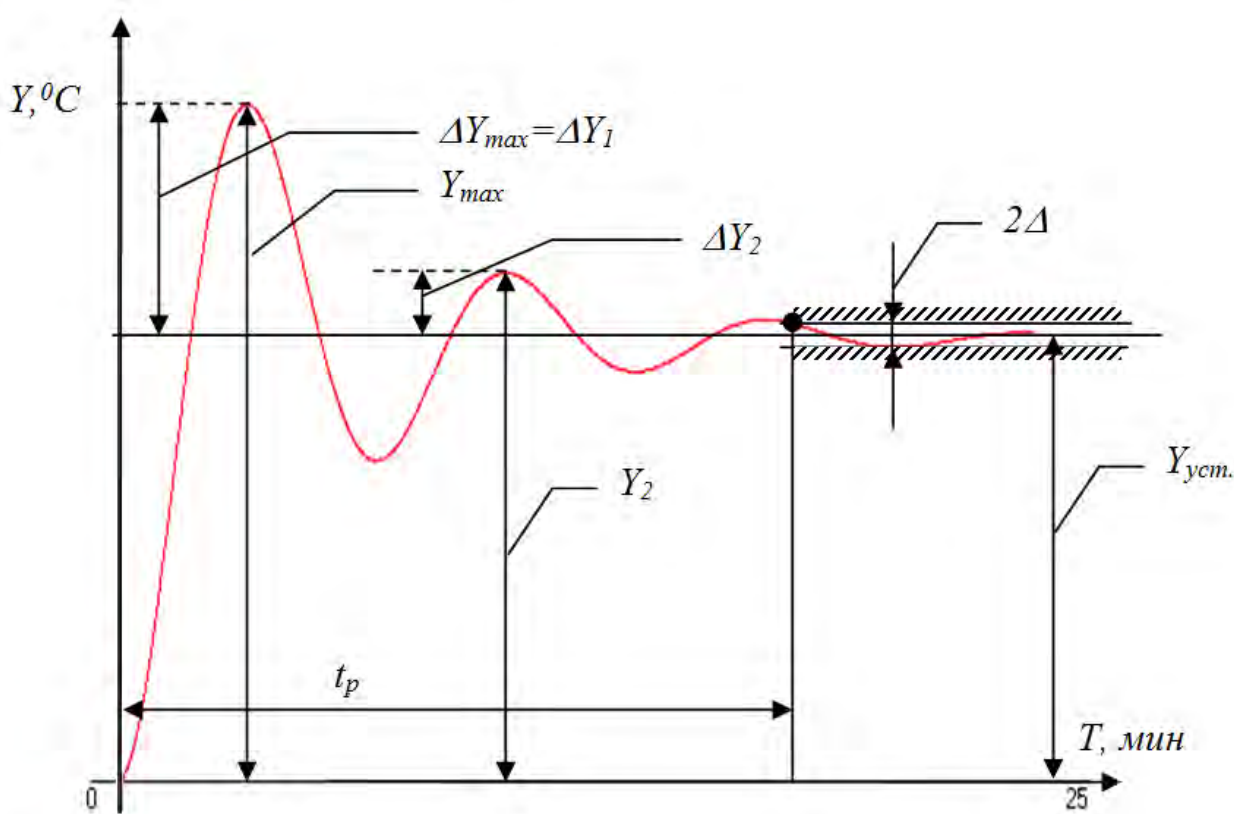


Рисунок 13.1 – График переходного процесса

При выборе типа регулятора и параметров его настройки учитывают свойства объекта и ограничения на качественные показатели.

Всегда целесообразно ориентироваться на простые регуляторы. По величине отношения времени запаздывания τ к постоянной времени объекта T можно рекомендовать: при $\tau/T < 1$ – регулятор линейный, при $\tau/T > 1$ – импульсный регулятор, при $\tau/T < 0,2$ – регулятор импульсного действия (позиционный).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Смоделировать с использованием ЭВМ (программа Sam Sim). Систему автоматического регулирования (управления) с использованием ПИД-регулятора и промышленным объектом (рис. 13.2).

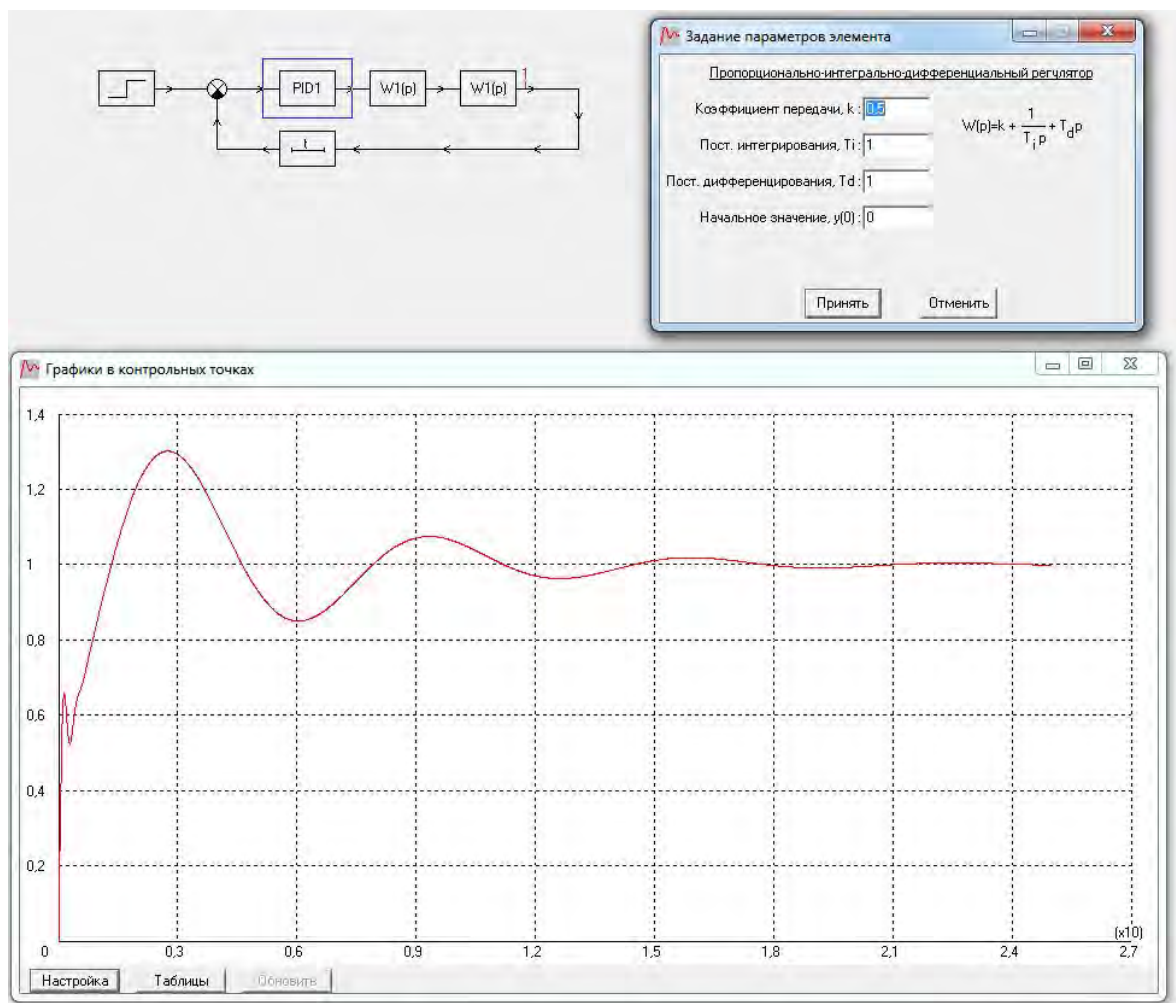


Рисунок 13.2 – Система автоматического ПИД-регулятора

2. Построить график переходного процесса.
3. По полученному графику переходного процесса определить показатели качества: перерегулирование σ , время регулирования t_p , степень затухания Ψ , колебательность n . Данные свести в таблицу 13.1.
4. Сделать анализ качества процесса регулирования.

Таблица 13.1 – Прямые показатели качества ПИД-регулятора

T , мин	τ , мин	τ/T	ΔY_{\max} , °C	σ , %	Ψ	t_p , мин	n

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая АСР называется линейной?
2. Что называется законом регулирования?
3. Назовите типы линейных регуляторов, запишите их передаточные функции, объясните их особенности, достоинства и недостатки.
4. Перечислите показатели качества регулирования и их определение.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 14. ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛООВОГО ОБЪЕКТА

Цель работы: ознакомление с конструкцией промышленных позиционных регуляторов, изучение принципа действия регулятора. Исследование переходного процесса в двухпозиционной системе регулирования. Оценка качества системы.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Позиционные регуляторы приборного типа являются самыми простыми и широко распространенными. К числу важнейших преимуществ позиционных регуляторов относится возможность получения высокого качества регулирования при применении достаточно простых и надежных технических средств. Они широко применяются при автоматизации тепловых объектов с электрообогревом; насосных и компрессорных установок, в которых требуется ограничение изменения уровня перекачиваемой в резервуар жидкости; стабилизации давления в паропроводах, трубопроводах – подачи сжатого газа; при регулировании частоты вращения двигателей постоянного тока и напряжения генераторов.

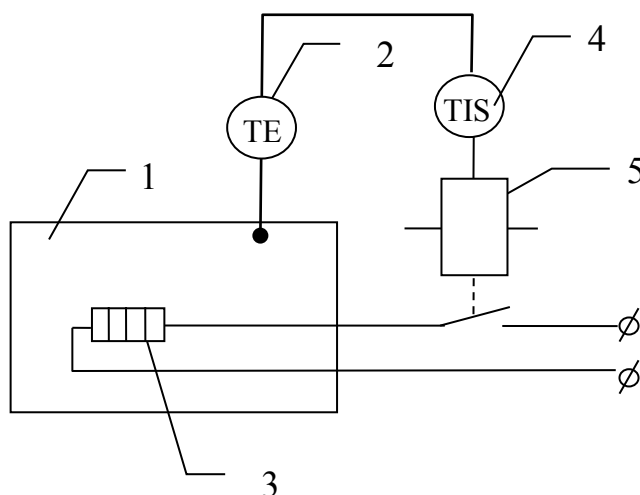


Рисунок 14.1 – Функциональная схема двухпозиционного регулирования:
1 – объект регулирования, 2 – датчик температуры, 4 – регулятор температуры, 5 – исполнительный механизм

В двухпозиционных автоматических системах регулирования (АСР) регулирующий орган (РО) может последовательно занимать два положения (позиции), чему соответствует минимальное или максимальное регулирующее воздействие на объект регулирования. Если в качестве выходного элемента двухпозиционного регулятора используется электромагнитное реле, то это реле, в зависимости от текущего значения

регулируемой величины, будет находиться в процессе регулирования только в 2 состояниях – включенном и выключенном. В результате возникает характерный для рассматриваемого класса АСР периодический процесс изменения регулируемой величины относительно заданного значения – автоколебания.

На рисунке 14.2 приведена структурная схема двухпозиционной АСР и установившиеся автоколебания регулируемой величины.

На этом рисунке:

X_3 – заданное значение регулируемой величины (сигнал, поступающий в регулятор от датчика);

X – истинное значение регулируемой величины (сигнал, поступающий в регулятор с датчика);

$\Delta = X_3 - X$ – сигнал рассогласования, ДР – двухпозиционный регулятор,

Z – команда управления (регулирующее воздействие); $\frac{1}{Tp + 1}$ –

передаточная функция объекта;

$e^{-p\tau}$ – передаточная функция датчика. При таком объекте автоколебаний может не быть, если $\tau \rightarrow 0$.

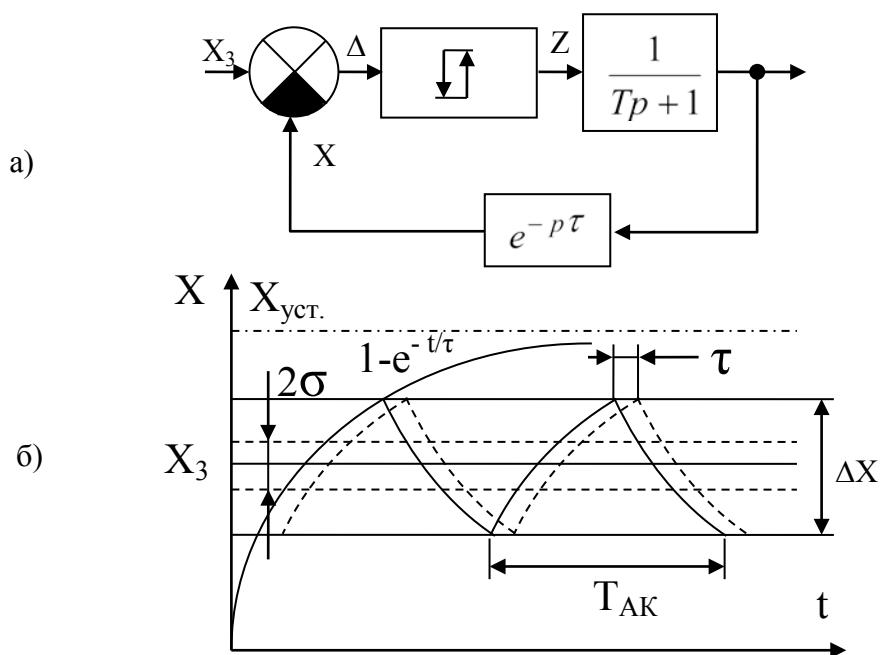


Рисунок 14.2 – Двухпозиционная АСР:
а – структурная схема, б – график переходного процесса

С.М. Смирновым получены формулы, позволяющие рассчитать размах автоколебаний и их период. Относительный (безразмерный) размах автоколебаний

$$2\sigma^* = 2\sigma + \frac{\tau}{T + 0.5\tau}(1 - 2\sigma),$$

где 2σ – относительная (безразмерная) зона неоднозначности регулятора; T – постоянная времени объекта регулирования; τ – время запаздывания.

$$\text{Относительная зона неоднозначности } 2\sigma = \frac{2\Sigma}{A},$$

где 2Σ – зона неоднозначности регулятора; $A = X_{\max} - X_{\min}$ – зона регулирования, оцениваемая по разности установившихся значений регулируемой величины при максимальном и минимальном значениях регулирующего воздействия U_{\max} и U_{\min} .

Размах автоколебаний регулируемой величины

$$\Delta x = 2\sigma^* A.$$

Период автоколебаний регулируемой величины

$$T_A = 2\sigma^* T\xi,$$

где $\xi = \frac{1}{X_3^* (1 - X_3^n)}$ – коэффициент, характеризующий расположение

автоколебаний в зоне регулирования;

$X_3^* = \frac{X_3 - X_{\min}}{A}$ – относительное (безразмерное) задаваемое значение регулируемой величины.

При правильной настройке двухпозиционной АСР установившиеся автоколебания происходят в средней части зоны регулирования. Величина периода автоколебаний в значительной мере сказывается на сроке службы элементов двухпозиционной АСР. При настройке системы на период автоколебаний можно воздействовать только изменением относительной (безразмерной) зоны неоднозначности, точнее A – зоной регулирования.

$$2\sigma = \frac{2\Sigma}{A}.$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Смоделировать с использованием ЭВМ (программа Sam Sim)

систему автоматического регулирования (управления) двухпозиционного регулирования (рис. 14.3).

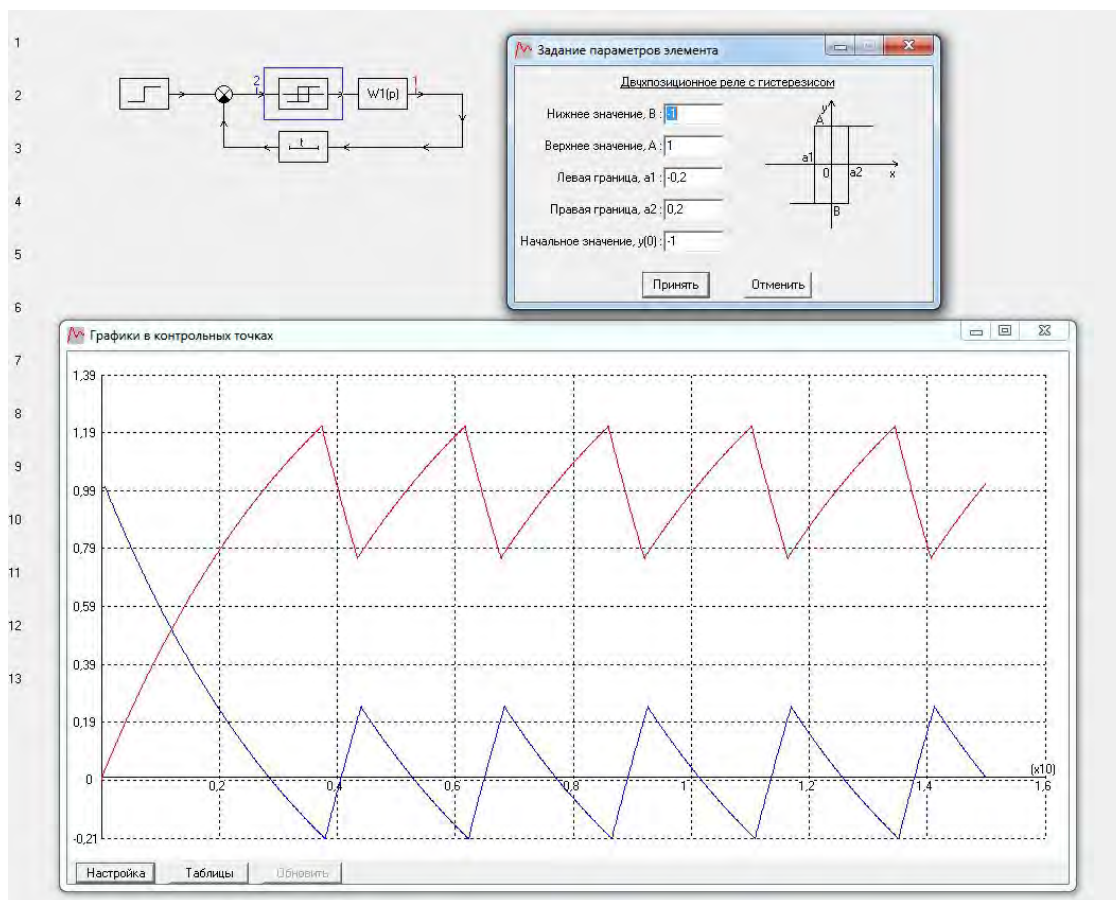


Рисунок 14.3 – Модель системы автоматического двухпозиционного регулирования

2. Записать 1–2 периода установившихся автоколебаний и определить 2Σ , которые определяются по включению и выключению сигнальной лампочки.

Таблица 14.1 – Значения зоны неоднозначности

Температура		$2\Sigma, ^\circ\text{C}$
ВКЛ	ОТКЛ	

3. Получить график переходного процесса 2-позиционного регулирования.

4. По полученному графику определить T , τ , X_{\max} , X_{\min} , среднее значение размаха автоколебаний ΔX , и периода автоколебаний $T_{a.э}$.

5. Аналитически рассчитать значения ΔX_p и $T_{a.p}$, сравнить их с экспериментальными.

6. Данные занести в таблицу 14.2.

Таблица 14.2 – Основные показатели двухпозиционного регулирования

$A_{зр}$	2σ	$2\sigma^*$	ΔX_p	$T_{a.p.}, \text{ мин}$	ΔX_9	$T_{a.9.}, \text{ мин}$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое двухпозиционное регулирование?
2. Что такое функциональная и структурная схемы для позиционного регулирования температуры?
3. Какими параметрами характеризуется переходный процесс для двухпозиционных САР, как они определяются?
4. Дать качественную оценку процесса регулирования температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматика и автоматизация производственных процессов: лабораторный практикум / УО «ВГТУ»; сост. А. А. Кузнецов. – Витебск, 2015. – 75 с.

2. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Линейные системы : учебник и практикум для академического бакалавриата / Д. П. Ким. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2019. – 311 с.

3. Кузнецов, Э. В. Электротехника и электроника: учебник и практикум для академического бакалавриата, для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям : [в 3 т.]. Т. 1 : Электрические и магнитные цепи / Э. В. Кузнецов; под общ. ред. В. П. Лунина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Юрайт, 2019. – 255 с.

4. Киселев, В. И. Электротехника и электроника: учебник и практикум для академического бакалавриата, для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям : [в 3 т.]. Т. 2 : Электромагнитные устройства и электрические машины / В. И. Киселев, Э. В. Кузнецов, А. И. Копылов; под общ. ред. В. П. Лунина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Юрайт, 2019. – 184 с.

5. Шойко, В. П. Автоматическое регулирование в электрических системах: учебное пособие / В. П. Шойко; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский государственный технический университет. – 2-е изд. – Новосибирск: НГТУ, 2018. – 195 с.

6. Электротехника и электроника: учебник и практикум для академического бакалавриата, для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям : [в 3 т.]. Т. 3 : Основы электроники и электрические измерения / Э. В. Кузнецов, Е. А. Куликова, П. С. Культиасов, В. П. Лунин; под общ. ред. В. П. Лунина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Юрайт, 2019. – 234 с.

Учебное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, АВТОМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Лабораторный практикум

Составители:

Клименкова Светлана Александровна
Самусев Артем Михайлович
Куксевич Виталий Федорович

Редактор *Т.А. Осипова*

Корректор *Т.А. Осипова*

Компьютерная верстка *С.А. Клименкова*

Подписано к печати 14.06.2022. Формат 60x90^{1/16}. Усл. печ. листов 4,8.
Уч.-изд. листов 6,1. Тираж 30 экз. Заказ № 169.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.