

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования**
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Невинномысский технологический институт (филиал)

Методические указания по выполнению практических работ
по дисциплине «Элементы систем автоматики»

Направление подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника
Профиль подготовки – Электропривод и автоматика промышленных
установок и технологических комплексов
Квалификация выпускника – бакалавр

Невинномысск 2021

Методические указания предназначены для проведения практических занятий по дисциплине «Элементы систем автоматики» для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и соответствуют требованиям ФГОС ВО направления подготовки бакалавров.

Составитель: доцент кафедры ИСЭА Д.В.Самойленко

Содержание

Правила выполнения практических работ	5
Практическая работа №1	6
Практическая работа №2	12
Практическая работа №3	18
Практическая работа №4	24
Практическая работа №5	30
Практическая работа №6	36
Практическая работа №7	42
Практическая работа №8	48
Практическая работа №9	52
Практическая работа №10	55

Правила выполнения практических работ

1. Студент должен придти на практическое занятие подготовленным к выполнению практической работы.
2. После проведения практической работы студент должен представить отчет о проделанной работе с таблицей результатов расчета.
3. Отчет о проделанной работе следует выполнять в журнале практических работ на листах формата А4 с одной стороны листа. Содержание отчета указано в описании практической работы.
4. Расчет следует производить с точностью до двух значащих цифр.
5. Вспомогательные расчеты можно выполнять на отдельных листах, а при необходимости на листах отчета.
6. Оценку по практической работе студент получает, если:
 - расчеты выполнены правильно и в полном объеме;
 - результаты сведены в таблицы;
 - может пояснить выполнение любого этапа работы;
 - отчет выполнен в соответствии с требованиями к выполнению работы;
 - отвечает на контрольные вопросы на удовлетворительную оценку и выше.

Практическая работа №1

Определение основных параметров потенциометрического и термоэлектрического датчиков

1 Цель работы

- 1.1 Научиться рассчитывать параметры потенциометрического датчика.
- 1.2 Научиться рассчитывать параметры термоэлектрического датчика.

Задача №1. Рассчитать параметры потенциометрического датчика

2 Пояснения к работе

2.1 Краткие теоретические сведения

Потенциометрический датчик представляет собой реостат, включенный по схеме потенциометра. Потенциометрический датчик преобразует механические перемещения в изменения сопротивления реостата. Расчет потенциометра сводится к расчету сопротивлений: определяются размеры каркаса для катушки, диаметр провода обмотки, количество витков, шаг катушки.

- 1) рабочая длина каркаса:

$$L = \alpha D \pi / 360 \text{ (мм)}, \quad (1)$$

где L - рабочая длина каркаса;

α - угол поворота;

D - средний диаметр каркаса.

- 2) минимальное число витков:

$$n = 100 / \delta_p \text{ (\%)} \text{ (витков)}, \quad (2)$$

где n - минимальное число витков %;

δ_p - разрешающая способность.

- 3) шаг катушки:

$$\tau = L / n \text{ (мм)}, \quad (3)$$

где τ - шаг катушки.

- 4) диаметр провода с изоляцией:

$$d_{\text{и}} = \tau - 0,015 \text{ (мм)}, \quad (4)$$

где $d_{\text{и}}$ - диаметр провода с изоляцией.

- 5) коэффициент нагрузки:

$$\beta = R_n / R = \frac{1 - \delta_{\max}}{4\delta_{\max}}, \quad (5)$$

где β - коэффициент нагрузки;

δ_{\max} – максимальная погрешность.

6) сопротивление потенциометра:

$$R = \frac{R_n}{\beta} \text{ (Ом)}, \quad (6)$$

где R- сопротивление потенциометра,.

7) высота каркаса:

$$H = \left(\pi R d^2 / 8 \rho n \right) - b \text{ (мм)}, \quad (7)$$

где H- высота каркаса

ρ - удельное сопротивление,

b - толщина каркаса.

2.2 Пример расчета:

Исходные данные:

$R_n = 4400 \text{ Ом}$, $\delta_{\max} = 2,5 \%$, $U = 26 \text{ В}$, $D = 45 \text{ мм}$, $\alpha = 330$, $b = 2 \text{ мм}$,
 $\delta_p = 0,25 \%$, $\rho = 0,49 * 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Решение:

- 1) $L = 330 * 45 * 3,14 / 360 = 129,5 \text{ (мм)}$;
- 2) $n = 100 / 0,25 = 400 \text{ (витков)}$;
- 3) $\tau = 129,5 / 400 = 0,324 \text{ (мм)}$;
- 4) $d_{\text{н}} = 0,324 - 0,015 = 0,309 \text{ (мм)}$ (с учетом изоляции);
- 5) Выбираем $d \approx 0,3 \text{ (мм)} = 0,3 * 10^{-3} \text{ (м)}$;
- 6) $\beta = (1 - 0,025) / (4 * 0,025) = 9,75$;
- 7) $R = 4400 / 9,75 = 451,3 \text{ (Ом)}$;
- 8) $H = \{ [3,14 * 451,3 * (0,3 * 10^{-3})^2] / (8 * 0,49 * 10^{-6} * 400) \} - 0,002 = 0,0793 \text{ (м)} = 79,3 \text{ (мм)}$.

3 Задание:

3.1 Рассчитать параметры потенциометрического датчика. Исходные данные для расчета взять из таблицы 1, согласно варианту.

Таблица 1

№ варианта	R_n (Ом)	δ_{max} (%)	U (В)	D (мм)	α	B (мм)	δ_p (%)	$\rho \cdot 10^{-6}$ (Ом·м)
1	4400	2,0	26	50	330	1,8	0,2	0,49
2	4400	3,0	26	55	330	2,5	0,2	0,42
3	4400	2,7	26	47	330	1,5	0,23	0,49
4	4400	2,3	26	52	330	2,3	0,25	0,42
5	4400	2,1	26	49	330	2,0	0,21	0,42

3.2 Произвести расчет

L= _____

n= _____

 τ = _____ d_n = _____ β = _____

R= _____

H= _____

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2.

Таблица
2

L (мм)	n (вит)	τ (мм)	d_n (мм)	β	R (Ом)	H (мм)

Задача №2: Определить параметры термоэлектрического датчика.

2 Пояснения к работе

2.1 Краткие теоретические сведения:

Термоэлектрический датчик – датчик генераторного типа. Термоэлектрический датчик представляет собой цепь, состоящую из двух разнородных металлов. Проводники называются термоэлектродами, стыки – спаями, а возникающая при нагреве спая ЭДС – термо ЭДС. Спай, температура которого поддерживается постоянной, называется холодным, а спай, соприкасающийся с измеряемой средой, – горячим. По величине термо – ЭДС можно судить о разности температур горячего и холодного спаев, и если известна температура холодного спая, то можно определить температуру горячего спая.

1) величина термо – ЭДС:

$$E_{\text{ТТ}} = U_{\text{М}} (R_{\text{М}} + R_{\text{ВН}}) / R_{\text{М}} \text{ (мВ)}, \quad (8)$$

где $E_{\text{ТТ}}$ – термо – ЭДС,

2) перепад температуры:

$$t_{\text{ПЕР}} = E_{\text{ТТ}} 100 / E_{\text{ТАБ}} \text{ (град.)}, \quad (9)$$

где $t_{\text{пер}}$ – перепад температуры.

3) температура горячего конца термопары:

$$t_1 = t_{\text{ПЕР}} + t_0 \text{ (град.)}, \quad (10)$$

где t_0 – температура холодного конца термопары.

4) при точном расчете термо – ЭДС вводится поправка на температуру холодного конца термопары:

$$E_{\text{П}} = E_{\text{ТАБ}} \cdot t_0 / 100 \text{ (мВ)} \quad (11)$$

5) расчетная термо – ЭДС:

$$E_{\text{Р}} = E_{\text{ТТ}} + E_{\text{П}} \text{ (мВ)} \quad (12)$$

2.2 Пример расчета:

Исходные данные:

$$R_M = 130 \text{ Ом}; R_{\text{вн}} = 10 \text{ Ом}; t = 15 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$U_M = 24 \text{ мВ}; E_{\text{табл.}} = 6,95 \text{ мВ};$$

Решение:

$$1) E_{\text{ТП}} = 24(130 + 10)/130 = 26 \text{ мВ};$$

$$2) t_{\text{ПЕР}} = 26 \cdot 100/6,95 = 374 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$3) t_1 = 374 + 15 = 389 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$4) E_{\text{П}} = 6,95 \cdot 15/100 = 1,04 \text{ мВ};$$

$$5) E_P = 26 + 1,04 = 27,04 \text{ мВ}.$$

3 Задание:

3.1 Определить параметры термоэлектрического датчика. Исходные данные для расчета взять из таблицы 1, согласно варианту.

Таблица 1

№ варианта	R_M (Ом)	$R_{\text{вн}}$ (Ом)	t (град)	U_M (мВ)	$E_{\text{табл.}}$ (мВ)
1	120	10	5	24	6,95
2	130	10	10	24	6,95
3	140	9	15	24	6,95
4	150	8	20	24	6,95
5	160	10	25	24	6,95

3.2 Произвести расчет

$E_{\text{ТП}} =$ _____

$t_{\text{пер}} =$ _____

$t_1 =$ _____

$E_{\text{п}} =$ _____

$E_{\text{р}} =$ _____

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2.

Таблица 2

$E_{\text{пт}}(\text{В})$	$t_{\text{ПЕР}}(\text{град})$	$t_1(\text{град})$	$E_{\text{п}}(\text{В})$	$E_{\text{р}}(\text{В})$

5. Контрольные вопросы по практической работе №1

1. Изменением какого параметра можно уменьшить погрешность от ступенчатости выходного напряжения в потенциометрическом датчике?
2. Что показывает разрешающая способность потенциометра ?
3. От чего зависит ЭДС термоэлектрического датчика?
4. Какие бывают схемы включения термоэлектрического датчика?
5. Укажите области применения потенциометрического и термоэлектрического датчиков.

Список литературы

1. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. -М,: «Форум - Инфра - М», 2002 г., -383с.

Практическая работа №2

Определение основных параметров индуктивного датчика

1 Цель работы

- 1.1 Научиться рассчитывать индуктивность индуктивного датчика.
- 1.2 Научиться рассчитывать параметры обмотки индуктивного датчика.

Задача №1. Рассчитать индуктивность индуктивного датчика

2 Пояснения к работе

2.1 Краткие теоретические сведения.

Индуктивные датчики преобразуют механическое перемещение в изменение параметров магнитной и электрической цепей. Принцип действия индуктивных датчиков основан на изменении индуктивности L или взаимной индуктивности M обмотки с сердечником вследствие изменения магнитного сопротивления R_M магнитной цепи, в которую входит сердечник.

1) последовательность преобразований:

$$F \rightarrow \delta_b \rightarrow R_M \rightarrow L \rightarrow X_L \rightarrow Z \rightarrow I,$$

где F - усилие;

δ_b - длина воздушного зазора;

R_M - магнитное сопротивление;

L - индуктивность;

X_L - индуктивное сопротивление;

Z - полное сопротивление;

I - ток.

2) индуктивность датчика вычисляется по формуле:

$$L = \left(\frac{2}{\delta_b} \right) \pi * n^2 * S_m * 10^{-7} \text{ (Гн)} \quad (1)$$

где L - индуктивность датчика,

δ_b - длина воздушного зазора;

n - число витков;

S_m - площадь поперечного сечения магнитопровода.

2.2 Пример расчета

Исходные данные:

$\delta_{в1} = 0,4 \text{ мм} = 0,0004 \text{ м} = 4 * 10^{-4} \text{ м}$; $\delta_{в2} = 0,6 \text{ мм} = 0,0006 \text{ м} = 6 * 10^{-4} \text{ м}$;
 $\delta_{в3} = 0,8 \text{ мм} = 0,0008 \text{ м} = 8 * 10^{-4} \text{ м}$; $S_M = 40 \text{ мм}^2 = 0,00004 \text{ м}^2 =$
 $= 4 * 10^{-5} \text{ м}^2$; $n = 16000 \text{ витков}$.

Решение:

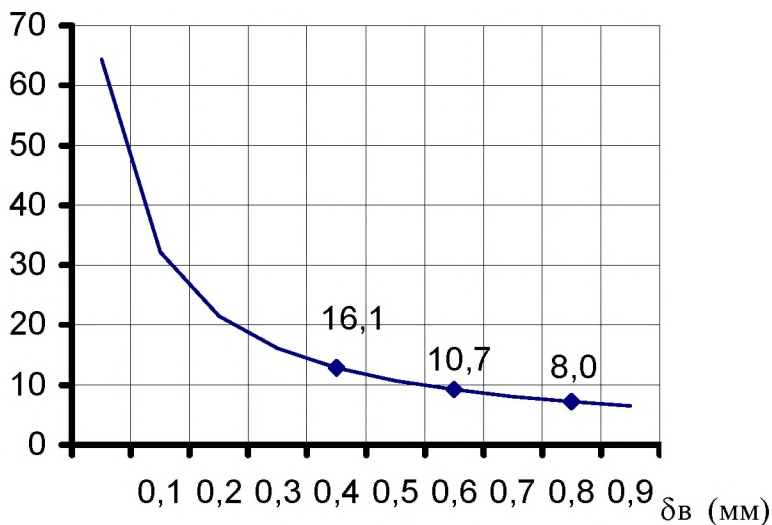
$$L_1 = (2/0,0004)^2 * 3,14 * 16000^2 * 0,00004 * 10^{-7} = 16,1 \text{ (Гн)}$$

$$L_2 = (2/0,0006)^2 * 3,14 * 16000^2 * 0,00004 * 10^{-7} = 10,7 \text{ (Гн)}$$

$$L_3 = (2/0,0008)^2 * 3,14 * 16000^2 * 0,00004 * 10^{-7} = 8 \text{ (Гн)}$$

Построить график $L = f(\delta_{в})$

$L(\text{Гн})$



3 Задание:

3.1 Определить индуктивность датчика в зависимости от длины воздушного зазора. Исходные данные для расчета взять из таблицы 1, согласно варианту.

Таблица

1

№ варианта	$\delta_{в1}$, (мм)	$\delta_{в2}$, (мм)	$\delta_{в3}$, (мм)	$S_{мб}$ (мм ²)	n
1	0,3	0,5	0,7	40	16000
2	0,4	0,6	0,8	50	16000
3	0,3	0,5	0,7	60	15500
4	0,4	0,6	0,8	30	16500
5	0,5	0,7	0,9	30	16500

3.2 Произвести расчет

$L_1 =$ _____

$L_2 =$ _____

$L_3 =$ _____

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2.

Таблица

2

L_1 (Гн)	L_2 (Гн)	L_3 (Гн)

Построить график $L = f(\delta_{в})$

Задача №2 Определить параметры обмотки индуктивного датчика.

2 Пояснения к работе

2.1 Краткие теоретические сведения:

1. Угловая частота переменного тока определяется по формуле:

$$\omega = 2\pi f \text{ (1/сек)}, \quad (2)$$

где f - частота.

2. Индуктивность датчика:

$$L = U_{\sim} / (I_{\sim} \cdot \omega) \text{ (Гн)}, \quad (3)$$

где U_{\sim} - переменное напряжение,

I_{\sim} - переменный ток,

ω - угловая частота.

3. Число витков:

$$n = \sqrt{\frac{L \cdot \delta_B \cdot 10^{-7}}{2\pi S_M}} \text{ (витков)}, \quad (4)$$

где S_M - площадь поперечного сечения магнитопровода,

δ_B - длина воздушного зазора.

4. Диаметр провода:

$$d = \sqrt{4 \cdot I_{\sim} / (\pi \cdot \Delta_{\text{доп}})} \text{ (мм)} \quad (5)$$

где $\Delta_{\text{доп}}$ - допустимая плотность тока

2.2 Пример расчета

Исходные данные:

$S_M = 200 \text{ мм}^2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $\delta_B = 2 \text{ мм} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $I = 10 \text{ мА} = 0,01 \text{ А}$, $\Delta_{\text{доп}} = 3 \text{ А/мм}$, $U = 220 \text{ В}$, $f = 400 \text{ Гц}$

Решение:

$$1. w = 2 \cdot 3,14 \cdot 400 = 2512 \text{ (1/сек)}$$

$$2. L = 220 / 0,01 \cdot 2512 = 8,75 \text{ (Гн)}$$

$$3. n = \sqrt{\frac{8,75 \cdot 0,2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}} = 11800 \text{ (ВИТКОВ)}$$

$$4. d = \sqrt{4 \cdot 0,01 / (3,14 \cdot 3)} = 0,065 \text{ (ММ)}$$

3 Задание:

3.1 Определить параметры обмотки датчика. Исходные данные для расчета взять из таблицы 1, согласно варианту.

Таблица 1

№ варианта	S_M (мм ²)	δ_B (мм)	I (мА)	$\Delta_{\text{доп}}$ (А/мм)	U (В)	f (Гц)
1	500	3	10	4	220	400
2	300	3	10	3.5	220	400
3	400	3	20	3.5	220	400
4	550	9	15	3.5	220	400
5	550	7	25	4	220	400

3.2. Произвести расчет

W =

L =

n =

d =

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2

Таблица 2

W (1/сек)	L (Гн)	n (витков)	d (мм)

4. Контрольные вопросы к практической работе №2

1. Какие типы индуктивных датчиков существуют?
2. Укажите реверсивен или нереверсивен одинарный индуктивный датчик?
3. Объясните цепь преобразований в индуктивном датчике.
4. Как можно получить дифференциальный индуктивный датчик?
5. Укажите достоинства и недостатки индуктивных датчиков.

Список литературы

1. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. -М.: «Форум - Инфра - М», 2002 г., -383с.

Практическая работа №3

Определение основных параметров пьезоэлектрического и емкостного датчиков.

1 Цель работы

- 1.1 Научиться рассчитывать параметры пьезоэлектрического датчика.
- 1.2 Научиться рассчитывать параметры емкостного датчика.

Задача №1 Рассчитать параметры пьезоэлектрического датчика.

2 Пояснения к работе.

2.1 Краткие теоретические сведения:

Пьезоэлектрические датчики относятся к датчикам генераторного типа, в которых входной величиной является сила, а выходной – количество электричества. Работа пьезоэлектрического датчика основана на пьезоэффекте, сущность которого заключается в том, что на гранях некоторых кристаллов при их сжатии или растяжении появляются электрические заряды.

- 1) величина заряда:

$$q_x = K_o F_x \text{ (К/Н)}, \quad (1)$$

где K_o – пьезоэлектрическая постоянная (модуль),;

F_x – усилие, направленное вдоль электрической оси.

- 2) емкость одной пластины:

$$C_o = 0,89 \frac{\epsilon_r * S_x}{d} = 0,89 \frac{\epsilon_r * \pi * D^2}{4d} = 0,89 \frac{\epsilon_r * \pi * a * b}{4d}, \text{ (пФ)} \quad (2)$$

где C_o - емкость одной пластины,;

ϵ_r - относительная диэлектрическая проницаемость;

D - диаметр пластины (диска);

a и b - стороны пластины (прямоугольника);

d - толщина пластины.

3) напряжение между обкладками:

$$U = \frac{10^{12} * n * q_x}{C_{вх} + nC_o} = \frac{q_x * 10^{12}}{C_{вх}/n + C_o} \text{ (пФ)}, \quad (3)$$

где $C_{вх}$ - емкость измеряемой цепи;
 n - количество пластин.

4) чувствительность датчика:

$$S_d = \frac{U}{F_x} \text{ (В/Н)}, \quad (4)$$

где S_d - чувствительность датчика,.

2.2 Пример расчета

Исходные данные:

Материал – Кварц, $\epsilon_r = 4,5 * 10^{-11}$, $K_o = 2,5 * 10^{-12}$ К/Н; $n = 1$;
 $D = 1 \text{ см} = 1 * 10^{-2} \text{ м}$; $d = 1 \text{ мм} = 1 * 10^{-3} \text{ м}$; $F_x = 15 \text{ Н}$; $C_{вх} = 17 \text{ пФ}$.

Решение:

1) $q_x = 2,5 * 10^{-12} * 15 = 37,5 * 10^{-12} \text{ (К)}$;

2) $C_o = 0,89 \frac{4,5 * 10^{-11} * 3,14 * 10^{-4}}{4 * 10^{-3}} = 3,1 \text{ (пФ)}$;

3) $U = \frac{37,5 * 10^{-12} * 10^{12}}{17/1 + 3,1} = 1,9 \text{ (В)}$;

4) $S_d = \frac{1,9}{15} = 0,12 \text{ (В/Н)}$.

3 Задание:

3.1 Определить параметры пьезоэлектрического датчика, выполненного в виде прямоугольника (диска) со сторонами a и b (диаметр D), толщиной d , с параллельно соединенными пластинами в количестве “ n ” штук.

Исходные данные для расчета взять из таблицы 1, согласно варианту.

Таблица
1

№ варианта	Материал	$\epsilon_r \cdot 10^{-11}$	$K_o \cdot 10^{-12}$ К/Н	$a*b, (cm^2)$ $D, (cm)$	d (мм)	F_x (Н)	$C_{вх}$ (пФ)	n (шт)
1	Кварц	4,5	2,7	$D=1$	1	20	16,8	1
2	сегн. Соль	205	150	2×1	1	30	13,1	1
3	Кварц	4,5	2,7	1×1	2	15	20	2
4	тит. Бария	1500	100	2×2	3	40	20	2
5	тит. Бария	1500	100	$D=1$	1	20	52	1

3.2 Произвести расчет

$q_x =$ _____

$C_o =$ _____

$U =$ _____

$S_d =$ _____

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2.

Таблица 2

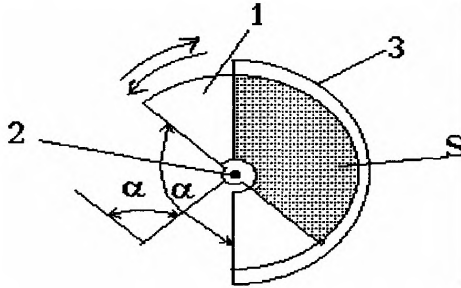
$q_x, (К/Н)$	$C_o, (пФ)$	$U, (В)$	$S_d, (В/Н)$

Задача №2. Рассчитать основные параметры емкостного датчика угловых перемещений

2 Пояснения к работе

2.1 Краткие теоретические сведения.

Емкостной датчик угловых перемещений имеет вид:



- 1-подвижная пластина;
- 2-вал;
- 3-неподвижная пластина.

1) максимальная емкость датчика при $\alpha = 180$ равна:

$$C_{\max} = \frac{0,89 S_{\max}(n-1) \cdot 180}{d \cdot 180} = \frac{0,89 S_{\max}(n-1)}{d} (\Phi), \quad (5)$$

где S_{\max} - площадь взаимодействия между подвижной и одной из неподвижных пластин,

- C_{\max} - максимальная емкость,
- d -расстояние между пластинами,
- $\epsilon_r=1$ (диэлектрик-воздух).

отсюда общее количество подвижных и неподвижных пластин

$$n = \frac{C_{\max} \cdot d}{0,89 \cdot S_{\max} + 1} \quad (\text{штук}), \quad (6)$$

полученное количество округляем до целого числа.

2) чувствительность датчика определяем по формуле:

$$S_{\partial} = \frac{0,89 S_{\max}(n-1)}{d \cdot 180} \quad (7)$$

2.2 Пример расчета

Исходные данные:

$$S_{\max}=15\text{см}^2; C_{\max}=400; d=0,8; \epsilon_r=1,;$$

Решение:

$$n = \frac{400 \cdot 0,8}{0,89 \cdot 15 + 1} = 22(\text{штук});$$

$$S_d = \frac{0,89 \cdot 15(22 - 1)}{0,8 \cdot 180} = 2$$

3 Задание:

3.1 Определить основные параметры емкостного датчика. Исходные данные для расчета взять из таблицы 1.

Таблица 1.

№ варианта	S_{\max} , (см ²)	C_{\max} (пФ)	d (мм)
1	12	400	0,5
2	10	200	0,6
3	15	600	0,4
4	18	830	0,8
5	15	440	0,6

3.2 Произвести расчет

n= _____

Sд= _____

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2.

Таблица 2

n (шт)	S_d

4. Контрольные вопросы к практической работе №3

1. Какие материалы используются для пьезоэлектрических датчиков?
2. В чем суть пьезоэффекта?
3. Где находят применение датчики, основанные на прямом и обратном пьезоэффектах?
4. Как определить чувствительность емкостного датчика, зная его емкость?
5. Какие виды емкостных датчиков существуют?

Список литературы

1. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. -М.: «Форум - Инфра - М», 2002 г., -383с.

Практическая работа № 4

Определение основных параметров электромагнитного реле постоянного тока

1 Цель работы

- 1.1 Научиться рассчитывать параметры электромагнитного реле.
- 1.2 Научиться рассчитывать параметры обмотки электромагнитного реле.

Задача №1. Рассчитать параметры электромагнитного реле.

2 Пояснения к работе.

2.1 Краткие теоретические сведения:

Реле – это устройство, которое автоматически осуществляет скачкообразное переключение выходного сигнала под воздействием управляющего сигнала, изменяющегося непрерывно в определенных пределах. Электромагнитные реле по роду используемого тока делятся на реле постоянного и переменного тока. Реле постоянного тока делятся на нейтральные и поляризованные. Рассмотрим основные параметры, характеризующие работу, нейтрального электромагнитного реле постоянного тока.

- 1) площадь воздушного зазора:

$$S_{\delta} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \left(\text{мм}^2 \right), \quad (1)$$

где S_{δ} - площадь воздушного зазора, (мм^2);

D - диаметр катушки.

- 2) величина магнитного потока:

$$\Phi_{\delta} = \sqrt{\frac{F \cdot S_{\delta}}{4 \cdot 10^5}} \text{ (Вб)}, \quad (2)$$

где F – намагничивающая сила.

3) магнитная индукция:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{S_{\delta}} \text{ (Тл)}, \quad (3)$$

4) магнитное напряжение, приходящееся на воздушный зазор:

$$I \cdot \varpi_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \cdot \delta \text{ (А)}, \quad (4)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость.

2.2 Пример расчета

Исходные данные:

$$F_K = 80 \text{ Н}; D = 14 \text{ мм} = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \delta = 0,15 \text{ мм} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Решение:

$$1) S_{\delta} = 3,14 \cdot \frac{0,014^2}{4} = 1,54 \cdot 10^{-4} \text{ (м}^2\text{)};$$

$$2) \Phi_{\delta} = \sqrt{\frac{80 \cdot 1,54 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^5}} = 1,75 \cdot 10^{-4} \text{ (Вб)};$$

$$3) B_{\delta} = \frac{1,78 \cdot 10^{-4}}{1,54 \cdot 10^{-4}} = 1,14 \text{ (Тл)};$$

$$4) I \cdot \varpi_{\delta} = \frac{1,14}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 136 \text{ (А)}.$$

3. Задание:

3.1 Рассчитать параметры электромагнитного реле. Исходные данные для расчета взять в таблице 1, согласно варианту.

Таблица 1

№ варианта	F (H)	D (мм)	δ (мм)
1	50	20	0,2
2	90	12	0,9
3	40	17	0,1
4	100	29	1,2
5	130	30	1,5

3.2 Произвести расчет:

$S_{\delta} =$ _____

$\Phi_{\delta} =$ _____

$B_{\delta} =$ _____

$I \cdot \omega_{\delta} =$ _____

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2.

Таблица 2

S_{δ} (м ²)	Φ_{δ} (Вб)	B_{δ} (Тл)	$I \cdot \omega_{\delta}$ (А)

Задача №2 Определить параметры обмотки электромагнитного реле.

2 Пояснения к работе

2.1 Краткие теоретические сведения:

1) длина окна катушки:

$$L_K = b - a' - b' \text{ (мм)}, \quad (5)$$

где L_K – длина окна обмотки;

b - наружный размер обмотки;

a' и b' – толщина щек катушки.

2) внутренний диаметр катушки:

$$D_{ВН} = d_C + 2 \cdot h \text{ (мм)}, \quad (6)$$

где $D_{ВН}$ - внутренний диаметр обмотки;

d_C - диаметр сердечника;

h - высота окна.

3) наружный диаметр:

$$D_{НАР} = D_{ВН} + 2 \cdot d_C \text{ (мм)}, \quad (7)$$

где $D_{НАР}$ - наружный диаметр,

$$Q_0 = d_C \cdot L_K \text{ (мм}^2\text{)}, \quad (8)$$

где Q_0 - площадь окна,

5) средняя длина витка:

$$L_{СР} = \frac{\pi \cdot (D_{НАР} + D_{ВН})}{2} \text{ (мм)}, \quad (9)$$

где $L_{СР}$ - средняя длина витка.

6) диаметр обмотки провода равен:

$$d = \sqrt{\frac{4\rho \cdot L_{СР} \cdot F}{U \cdot \pi}} \text{ (мм)}, \quad (10)$$

где d - диаметр обмотки провода,;

ρ - удельное сопротивление материала провода;

F - намагничивающая сила;

U - напряжение в обмотке.

2.2 Пример расчета:

Исходные данные:

$b = 90$ мм; $d_C = 8$ мм; $U = 12$ В; $a' = 2$ мм; $b' = 4$ мм; $\rho = 0,0175$ Ом * м; $F = 307,6$ Н; $h = 0,25$ мм.

Решение:

1) $L_K = 90 - 2 - 4 = 84(\text{мм})$;

2) $D_{BH} = 8 + 2 \cdot 0,25 = 8,5(\text{мм})$;

3) $D_{HAP} = 8,5 + 2 \cdot 8 = 24,5(\text{мм})$;

4) $Q_0 = 8 \cdot 84 = 672(\text{мм}^2)$;

5) $L_{CP} = \frac{3,14 \cdot (24 + 8,5)}{2} = 61,8(\text{мм}) = 61,8 \cdot 10^{-3}(\text{м})$;

6) $d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0175 \cdot 61,8 \cdot 10^{-3} \cdot 307,6}{12 \cdot 3,14}} = 0,188(\text{мм})$.

3. Задание:

3.1 Рассчитать параметры обмотки реле. Исходные данные для расчета взять из таблицы 1, согласно варианту.

Таблица 1

№ варианта	b (мм)	d _c (мм)	U (В)	a' (мм)	b' (мм)	P (Ом*м)	F (Н)	h (мм)
1	100	10	14	4	6	0,0275	97,035	0,35
2	70	15	16	6	8	0,0375	955,895	0,45
3	60	20	18	8	1	0,0475	500,123	0,55
4	110	25	20	10	12	0,0575	569,176	0,65
5	130	30	22	12	14	0,0675	718,264	0,75

3.2 Произвести расчет

L_K= _____

D_{BH}= _____

D_H= _____

$Q_0 =$ _____

$L_{cp} =$ _____

$d =$ _____

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2.

Таблица 2

L_K (мм)	D_{BH} (мм)	D_H (мм)	Q_0 мм ²	L_{cp} (м)	d (мм)

4. Контрольные вопросы к практической работе №4

1. В чем различие нейтральных и поляризованных электромагнитных реле?
2. Как должны располагаться тяговая и механическая характеристики электромагнитного реле друг относительно друга?
3. Какие этапы работы электромагнитного реле существуют?
4. Какие бывают типы нейтральных электромагнитных реле?
5. Какие существуют виды настройки контактов поляризованного реле?

Список литературы

1. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. -М.: «Форум - Инфра - М», 2002 г., -383с.

Практическая работа №5

Определение основных параметров исполнительного электромагнитного устройства автоматики и магнитного усилителя

1 Цель работы

- 1.1 Научиться рассчитывать параметры клапанного электромагнита.
- 1.2 Научиться рассчитывать параметры магнитного усилителя с внешней обратной связью.

Задача №1. Определить основные параметры клапанного электромагнита

2 Пояснения к работе.

2.1 Краткие теоретические сведения:

Электромагниты бывают:

- по виду тока в обмотке - постоянного и переменного токов;
- по скорости срабатывания – быстродействующие, нормальные и замедленного действия;
- по назначению - приводные и удерживающие;
- по конструктивному исполнению - клапанные (поворотные), прямоходные и с поперечным движением якоря.

Клапанные электромагниты имеют небольшое перемещение якоря (несколько мм) и развивают большое тяговое усилие.

1. Конструктивный фактор

$$A = \sqrt{F_y} / \delta \quad (\text{Н/Ом}), \quad (1)$$

где F_y – тяговое усилие,

δ – ход якоря

2. Индукция в зазоре B_δ (Тл)

(выбирается по зависимости $B_\delta = f(A)$)

3. Площадь сечения полюсного наконечника

$$S = F_y / 4 * B_\delta^2 * 10^5 (\text{мм}^2), \quad (2)$$

(получено из формулы $F_y = 4 * B_\delta^2 * S * 10^5$)

4. Сечения сердечника магнитопровода

$$S_c = S_{\text{я}} = \sigma * B_{\delta} * S / B_{\text{ст}} (\text{мм}^2), \quad (3)$$

где $B_{\text{ст}}$ – индукция в стали

где σ – коэффициент рассеяния магнитной системы

5. Сечение ярма магнитопровода

$$S_{\text{я}} = S_{\text{яр}} (\text{мм}^2), \quad (4)$$

6. Сечение якоря магнитопровода

$$S_{\text{як}} = S_c / \sigma (\text{мм}^2), \quad (5)$$

7. Полная МДС катушки

$$I * W = B_{\delta} * \delta / \mu_0 (1 - \alpha) \text{ (A)} \quad (6)$$

где α – коэффициент, характеризующий отношение МДС, не участвующей в создании тягового усилия к общей МДС катушки

2.2 Пример расчета

Исходные данные:

$F_{\text{с}} = 256 \text{ Н}$, $\delta = 16 \text{ мм} = 1,6 \text{ см} = 1,6 * 10^{-2} \text{ м}$, $B_{\text{ст}} = 1,2 \text{ Тл}$, $\sigma = 2$,
 $\alpha = 0,15$, $\mu_0 = 4 * 3,14 * 10^{-7} \text{ Гн/м}$, $B_{\delta} = 1,1 \text{ Тл}$

Решение:

1. $A = \sqrt{256} / 1,6 = 10 \text{ (Н/см)}$
2. $S = 250 / 4 * 1,1 * 1,1 * 10^5 = 5,2 * 10^{-4} (\text{м}^2) = 5,2 (\text{см}^2)$
3. $S_c = 2 * 1,1 * 5,2 / 1,2 = 9,7 (\text{см}^2)$
4. $S_{\text{я}} = 9,7 (\text{см}^2)$
5. $S_{\text{як}} = 9,7 / 2 = 4,85 (\text{см}^2)$
6. $I * W = 1,1 * 1,6 * 10^{-2} / 4 * 3,14 * 10^{-7} (1 - 0,15) = 16 * 10^3 \text{ (A)}$

3. Задание:

3.1 Определить основные параметры клапанного электромагнита. Исходные данные для расчета взять из таблицы 1, согласно варианту:

Таблица 1

№	F_3 (Н)	δ (мм)	$B_{ст}$ (Тл)	σ	α	μ_0
1	155	0,5	1,2	1,5	0,2	$4\pi 10^{-7}$
2	195	0,7	1,25	1,5	0,3	$4\pi 10^{-7}$
3	325	1,2	1,3	1,75	0,4	$4\pi 10^{-7}$
4	225	1,5	1,35	1,75	0,5	$4\pi 10^{-7}$
5	155	2,5	1,4	2,0	0,6	$4\pi 10^{-7}$

3.2. Произвести расчет:

$A =$ _____

$S =$ _____

$S_c =$ _____

$S_{я} =$ _____

$S_{як} =$ _____

$I \cdot W =$ _____

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2

Таблица 2

A (Н/см)	B_δ (Тл)	S (мм ²)	S_c (мм ²)	$S_{я}$ (мм ²)	$S_{як}$ (мм ²)	$I \cdot W$ (А)

Задача №2: Определить основные параметры магнитного усилителя с внешней ОС.

2 Пояснения к работе.

2.1 Краткие теоретические сведения:

Магнитный усилитель (МУ) – это статическое электромагнитное устройство, состоящее из сердечника и наложенных на него обмоток. Принцип действия МУ основан на использовании зависимости индуктивности катушки с ферромагнитным сердечником от величины подмагничивающего тока, создаваемого управляющим входным сигналом.

Для повышения коэффициента усиления и быстродействия в МУ вводится обратная связь (ОС). ОС может быть внешней и внутренней.

1) мощность нагрузки:

$$P_H = I_H^2 \cdot R_H \text{ (Вт)}. \quad (7)$$

2) мощность управления:

$$P_Y = I_Y^2 \cdot R_Y \text{ (Вт)}, \quad (8)$$

где I_H I_Y - токи на входе и на выходе;

R_H R_Y - сопротивления нагрузки и цепи управления;

3) коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = \frac{P_H}{P_Y}. \quad (9)$$

4) величина напряжения питания схемы:

$$U_C = (1,2 \div 2,0) \cdot I_H \cdot R_H \text{ (В)}. \quad (10)$$

5) удельное количество витков рабочей обмотки:

$$\frac{\varpi_P}{L_{CP}} = \frac{H_{\sim \text{MAX}}}{I_H}, \quad (11)$$

где $H_{\sim \text{MAX}}$ - максимальная напряженность поля;

I_H - максимальный ток нагрузки.

6) основной размер сердечника:

$$a = \sqrt[3]{\frac{U_C \cdot 10^4}{2 \cdot 4 \cdot 44 \cdot f \left(\frac{\varpi_P}{L_{CP}} \right) \cdot K_B \cdot K_{CP} \cdot B}} \quad (12)$$

где f - частота переменного тока;

K_B, K_{CP} - постоянные для данного сердечника;

B - индукция.

2.2 Пример расчета

Исходные данные:

$I_H = 6 \cdot 10^{-3} \text{ A}$; $R_H = 650 \text{ Ом}$; $R_Y = 660 \text{ Ом}$; $I_Y = 3 \cdot 10^{-4} \text{ A}$; $f = 50 \text{ Гц}$; $K_B = 1$; $H_{\sim \text{max}} = 0,75$; $K_{\text{CP}} = 20$; $B = 0,45 \text{ Тл}$.

Решение:

$$1) P_H = (6 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 650 = 2,34 \cdot 10^{-2} \text{ (Вт)};$$

$$2) P_Y = (3 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 660 = 5,94 \cdot 10^{-5} \text{ (Вт)};$$

$$3) K_P = \frac{2,34 \cdot 10^{-2}}{5,94 \cdot 10^{-5}} = 394;$$

$$4) U_C = 1,5 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 650 = 5,85 \text{ (В)};$$

$$5) \frac{\varpi_P}{L_{\text{CP}}} = \frac{0,75}{6 \cdot 10^{-3}} = 125;$$

$$6) a = \sqrt[3]{\frac{5,85 \cdot 10^4}{2 \cdot 4,44 \cdot 125 \cdot 1 \cdot 20 \cdot 0,45 \cdot 50}} = 1,8.$$

3.Задание: Определить основные размеры сердечника МУ с внешней ОС.

3.1 Исходные данные для расчета взять из таблицы 1, согласно варианту.

Таблица 1

№ варианта	I_H 10^{-3} (А)	R_H (Ом)	R_Y (Ом)	I_Y 10^{-4} (А)	f (Гц)	$H_{\sim \text{max}}$ (В)	K_B	K_{CP}	$B_{\text{ст}}$ (Тл)
1	6	650	650	3	50	0,75	1	20	0,45
2	6	680	670	4	50	0,75	1	20	0,45
3	7	660	680	3	50	0,75	1	25	0,45
4	8	750	660	5	50	0,75	1	20	0,45
5	8	630	650	3	50	0,75	1	20	0,45

3.2 Произвести расчет

$P_n =$ _____

$P_y =$ _____

$K_p =$ _____

$U_c =$ _____

$\frac{W_p}{L_{cp}} =$ _____

$a =$ _____

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2.

Таблица 2

P_n (Вт)	P_y (Вт)	K_p	U_c (В)	W_p/L_{cp}	a

4. Контрольные вопросы к практической работе №5

1. На какие типы делятся электромагниты по конструктивному исполнению?
2. Почему клапанные электромагниты развивают большое тяговое усилие?
3. На чем основан принцип действия магнитного усилителя?
4. Для чего в схемы магнитных усилителей вводится обратная связь?
5. Какие бывают магнитные усилители с внешней обратной связью?

Список литературы

1. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. -М.: «Форум - Инфра - М», 2002 г., -383с.

Практическая работа №6.

Определение основных параметров магнитного усилителя с внешней и внутренней обратными связями.

1 Цель работы

1.1 Научиться рассчитывать параметры обмотки смещения магнитного усилителя с внешней обратной связью.

1.2 Научиться рассчитывать параметры магнитного усилителя с внутренней обратной связью.

Задача №1. Определить параметры обмотки смещения магнитного усилителя с внешней обратной связью.

2 Пояснения к работе.

2.1 Краткие теоретические сведения:

В МУ для осуществления внешней обратной связи предусматривается специальная обмотка обратной связи, которая располагается на сердечниках так же как и обмотка управления. В МУ с внутренней ОС постоянное магнитное поле создается за счет постоянной оставляющей тока нагрузки, протекающей по рабочим обмоткам усилителя, т.е., нет необходимости в специальных обмотках ОС. Другое название МУ с внутренней ОС - МУ с самоподмагничиванием или с самонасыщением.

1) длина обмотки:

$$l = k * a(m), \quad (1)$$

где k - коэффициент кратности;

2) сила смещения:

$$F_{см} = H_y * l (H), \quad (2)$$

3) число витков обмотки смещения:

$$\omega_{\text{см}} = \frac{F_{\text{см}}}{I_{\text{см}}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{см}}$ – ток смещения.

4) сопротивление провода обмотки смещения:

$$R_{\text{см}} = \frac{\omega_{\text{см}} * l_{\text{см}}}{q_{\text{см}}} * \rho (\text{Ом}) \quad (4)$$

5) добавочное регулировочное сопротивление в цепи смещения:

$$R_{\text{рег}} = \frac{U_{\text{с}}}{1,11 * I_{\text{см}}} - R_{\text{см}} (\text{Ом}). \quad (5)$$

2.2 Пример расчета

Исходные данные:

$k = 20$; $a = 0,7$; $H_y = 0,06 \text{ А/м}$; $I_{\text{см}} = 0,005 \text{ А}$; $\rho = 1/57$; $q_{\text{см}} = 0,0113 \text{ К}$;
 $l_{\text{см}} = 0,055 \text{ мм}$; $U_{\text{с}} = 130 \text{ В}$.

Решение:

- 1) $l = 20 * 0,7 = 14 \text{ (м)}$;
- 2) $F_{\text{см}} = 0,06 * 14 = 0,84 \text{ (Н)}$;
- 3) $\omega_{\text{см}} = 0,84 / 0,005 = 170 \text{ (ВИТКОВ)}$;
- 4) $R_{\text{см}} = 170 * 0,055 / 57 * 0,0113 = 14,5 \text{ (Ом)}$;
- 5) $R_{\text{рег}} = (130 / 1,11 * 0,005) - 14,5 = 23400 \text{ (Ом)}$.

3.Задание:

3.1 Рассчитать параметры обмотки смещения. Исходные данные для расчета взять из таблицы 1, согласно варианту

Таблица 1

№ варианта	$H_y(A/M)$	k	a(м)	$I_{cm}(A)$	$\varphi_{cm}(K)$	$l_{cm}(mm)$	$U_c(B)$	ρ
1	0,05	25	0,9	0,006	0,012	0,055	220	1/57
2	0,04	25	0,8	0,005	0,013	0,055	130	1/57
3	0,03	30	0,6	0,004	0,0113	0,045	130	1/57
4	0,07	35	0,7	0,005	0,013	0,055	220	1/57
5	0,06	40	0,7	0,003	0,0113	0,035	130	1/57

3.2 Произвести расчет

$I =$ _____

$F_{cm} =$ _____

$\omega_{cm} =$ _____

$R_{cm} =$ _____

$R_{per} =$ _____

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2.

Таблица 2.

l (м)	F_{cm} (H)	ω_{cm}	R_{cm} (Ом)	R_{per} (Ом)

Задача №2 Определить параметры МУ с внутренней ОС.

2. Пояснения к работе

2.1 Краткие теоретические сведения:

1) Коэффициент запаса

$$K_3 = \Delta B_{у\max} / \Delta B_{ун}, \quad (6)$$

где ΔB – приращение индукции

2) Напряжение, питающее схему

$$U_c = 1,11 \cdot (1,2 \div 2,0) \cdot I_{н\max} \cdot R_n(B) \quad (7)$$

3) Максимальная напряженность

$$H_{\max} = K_{кр} \cdot 2H_c (A/cm), \quad (8)$$

где $K_{кр}$ – коэффициент кратности

4) Индукция

$$B_{ст} = \Delta B_{у\max} / 2 \text{ (Тл)} \quad (9)$$

5) Объем сердечника

$$V = U_c \cdot I_{н\max} \cdot 10^4 / 4,44 \cdot f \cdot H_{\max} \cdot B_{ст} \text{ (см}^3\text{)} \quad (10)$$

6) Масса сердечника

$$G = \gamma \cdot V \text{ (г)}, \quad (11)$$

где γ – удельная масса магнитного материала

7) Сечение провода

$$q = I_{н\max} / j \text{ (мм}^2\text{)}, \quad (12)$$

где j – допустимая плотность тока

8) Число витков рабочей обмотки

$$W_p = U_c \cdot 10^4 / 4,44 \cdot f \cdot S \cdot B_{ст}, \quad (13)$$

где S – сечение сердечника

9) Площадь окна

$$Q_p = q \cdot W_p / K_{зап.} \text{ (см}^2\text{)}, \quad (14)$$

где $K_{зап.}$ – коэффициент заполнения

2.2 Пример расчета

Исходные данные:

$R_n = 130 \text{ Ом}$, $I_{н\max} = 0,68 \text{ А}$, $f = 400 \text{ Гц}$, $K_{кр} = 50$, $\Delta B_{у\max} = 2,8 \text{ Тл}$,
 $\Delta B_{ун} = 2,3 \text{ Тл}$, $H_c = 0,48 \text{ А/см}$, $\gamma = 7,8 \text{ г/см}^3$, $j = 4,0 \text{ А/мм}$, $S = 0,49 \text{ см}^2$,
 $K_{зап.} = 0,325$.

Решение

- 1 $K_3 = 2,8/2,3 = 1,2$
- 2 $U_c = 1,11 * 1,2 * 0,68 * 130 = 115 \text{ (В)}$
- 3 $H_{\text{max}} = 50 * 2 * 0,48 = 48 \text{ (А/см)}$
- 4 $B_{\text{ст}} = 2,8/2 = 1,4 \text{ (Тл)}$
- 5 $V = 115 * 0,68 * 10^4 / 4,44 * 400 * 48 * 1,4 = 6,54 \text{ (см}^3\text{)}$
- 6 $G = 7,8 * 6,54 = 51 \text{ (г)}$
- 7 $q = 0,68/4 = 0,27 \text{ (мм}^2\text{)}$
- 8 $W_p = 115 * 10^4 / 4,44 * 400 * 0,49 * 1,4 = 943$
- 9 $Q_p = 0,27 * 943 / 0,325 = 783 \text{ (мм}^2\text{)}$

3. Задание:

3.1 Рассчитать основные параметры МУ с внутренней ОС, если приращения индукций составляют: $\Delta B_{\text{уmax}} = 2,8 \text{ Тл}$ и $\Delta B_{\text{ун}} = 2,3 \text{ Тл}$, а напряженность поля $H_c = 0,48 \text{ А/см}$. Исходные данные для расчета взять из таблицы 1 согласно варианту.

Таблица 1

№ варианта	R_n (Ом)	$I_{\text{нmax}}$ (А)	$K_{\text{кр}}$	γ (г/см ²)	J (А/мм)	S (см ²)	$K_{\text{зап}}$	f (Гц)
1	120	0,62	50	7,8	4,0	0,49	0,325	400
2	130	0,64	52	7,8	4,0	0,49	0,325	400
3	140	0,68	54	7,8	4,0	0,49	0,325	400
4	125	0,66	52	7,8	4,0	0,49	0,325	400
5	135	0,60	54	7,8	4,0	0,49	0,325	400

3.2. Произвести расчет:

$$K_3 =$$

$$U_c =$$

$$H_{\text{max}} =$$

$$B_{\text{ст}} =$$

$$V =$$

G = _____

q = _____

W_p = _____

Q_p = _____

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2

Таблица 2

K ₃	U _c (В)	H _{max} (А/см)	B _{ст} (Тл)	G (г)	q (мм)	W _p	Q _p (мм ²)

5. Контрольные вопросы к практической работе №6

1. Для чего в схему магнитного усилителя (МУ) вводится обмотка смещения?
2. Чем отличаются МУ с внешней и внутренней обратными связями
3. С помощью чего в МУ с внутренней ОС создается эффект обратной связи?
4. Как осуществляется регулировка коэффициента обратной связи в МУ с внутренней ОС?
5. Чему равен коэффициент обратной связи в МУ с внутренней ОС?

Список литературы

1. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. -М.: «Форум - Инфра - М», 2002 г., -383с.

Практическая работа №7. Определение основных параметров многокаскадного и реверсивного магнитных усилителей

1 Цель работы

- 1.1 Научиться рассчитывать параметры многокаскадного магнитного усилителя.
- 1.2 Научиться рассчитывать параметры реверсивного магнитного усилителя.

Задача №1: Сравнить постоянные времени однокаскадного и многокаскадного магнитных усилителей (ОМУ и ММУ).

2 Пояснения к работе.

2.1 Краткие теоретические сведения:

Коэффициент усиления ММУ равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов. Постоянная времени ММУ равна сумме постоянных времени отдельных каскадов. Инерционность ММУ определяется, в основном, инерционностью первого каскада, поэтому его выбирают с небольшим коэффициентом усиления, а необходимый коэффициент усиления набирается за счет остальных каскадов. Обычно ММУ включает пять, шесть каскадов

- 1) Коэффициент усиления по мощности ММУ

$$K_{p\text{ММУ}} = K_{p1\text{ММУ}} * K_{p2\text{ММУ}}, \quad (1)$$

где $K_{p1\text{ММУ}}$ - коэффициент усиления по мощности первого каскада,
 $K_{p2\text{ММУ}}$ – коэффициент усиления по мощности второго каскада

- 2) Постоянные времени ОМУ и первого и второго каскадов ММУ

$$T_{\text{ому}} = K_{p\text{ому}} * (1 - K_{\text{ос}}) / 4 * f * n \text{ (с)}, \quad (2)$$

$$T_{1\text{ММУ}} = K_{p1\text{ММУ}} * (1 - K_{\text{ос}}) / 4 * f * n \text{ (с)},$$

$$T_{2\text{ММУ}} = K_{p2\text{ММУ}} * (1 - K_{\text{ос}}) / 4 * f * n \text{ (с)},$$

где $K_{p\text{ому}}$, $K_{p1\text{ММУ}}$, $K_{p2\text{ММУ}}$ – коэффициенты усиления по мощности однокаскадного, первого и второго каскадов магнитных усилителей;

$T_{1\text{ММУ}}$ и $T_{2\text{ММУ}}$ - постоянные времени отдельных каскадов
многокаскадного магнитного усилителя;

f – частота;

$\eta = R_n/R$ – КПД рабочей цепи

$K_{\text{ос}}$ – коэффициент ОС

3) Постоянная времени ММУ (двухкаскадного МУ)

$$T_{\text{ММУ}} = T_{1\text{ММУ}} + T_{2\text{ММУ}} \text{ (с)}, \quad (3)$$

2.2 Пример расчета

Исходные данные:

$K_{\text{ос}} = 0,97$; $f = 50$ Гц; $n = 1$; $K_{\text{рому}} = 3600$; $K_{\text{р1ММУ}} = 60$; $K_{\text{р2ММУ}} = 60$

Решение

1. $K_{\text{рММУ}} = 60 * 60 = 3600$

2. $T_{\text{ому}} = 3600 * (1 - 0,97) / 4 * 50 * 1 = 0,54$ (с)

3. $T_{\text{ММУ}} = 60 * (1 - 0,97) / 4 * 50 * 1 + 60 * (1 - 0,97) / 4 * 50 * 1 = 0,009 + 0,009 = 0,018$ (с)

4. $T_{\text{ому}} / T_{\text{ММУ}} = 0,54 / 0,018 = 30$

5. $K_{\text{рому}} / K_{\text{рММУ}} = 3600 / 3600 = 1$

Вывод: Коэффициенты усиления однокаскадного и двухкаскадного МУ равны, а инерционность двухкаскадного МУ в 30 раз меньше, чем у однокаскадного.

3. Задание:

3.1 Определить основные параметры МУ и сравнить коэффициенты усиления и инерционности ОМУ и ММУ. Исходные данные для расчета взять из таблицы 1, согласно варианту.

Таблица 1

№ варианта	K_{oc}	$K_{p\ omy}$	$K_{p1\ мму}$	$K_{p2\ мму}$	$f_{\Gammaц}$	η
1	0,96	3600	60	60	50	1
2	0,96	3600	40	90	50	1
3	0,97	3600	30	120	50	1
4	0,97	6400	80	80	50	1
5	0,98	6400	40	160	50	1

3.2 Произвести расчет:

$$K_{pмму} =$$

$$T_{omy} =$$

$$T_{мму} =$$

$$T_{omy}/T_{мму} =$$

Вывод:

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2

Таблица 2

$K_{pмму}$	$T_{omy} (C)$	$T_{мму} (C)$	$T_{omy}/T_{мму}$

Задача №2: Определить основные параметры реверсивного МУ с балластными сопротивлениями и выходом на постоянном токе.

2. Пояснения к работе

2.1 Краткие теоретические сведения:

Реверсивные МУ – это усилители, в которых при изменении полярности управляющего сигнала изменяется полярность тока нагрузки. Если на выходе реверсивного МУ включается одно сопротивление нагрузки, в котором ток нагрузки может менять полярность при изменении полярности тока управления, применяются схемы с балластными сопротивлениями.

При максимальном токе управления один из МУ, входящих в реверсивный МУ, в котором напряженности смещения и управления вычитаются, работает в режиме близком к холостому ходу, поэтому током на выходе другого МУ можно пренебречь. При этом схему реверсивного МУ можно привести к схеме замещения, в которой сопротивления обмоток $W_{\text{пос}}$ и сопротивления вентиляей можно считать включенными в сопротивление R_6 , а расчет параметров реверсивного МУ - вести по эквивалентной схеме.

1) Балластное сопротивление

$$R_6 = \sqrt{2} R_n \text{ (Ом)} \quad (1)$$

2) Ток нагрузки

$$I_n = I_1 * R_6 / (R_n + R_6) \text{ (А)} \quad (2)$$

3) Эквивалентное сопротивление

$$R_3 = 2R_6(R_n + R_6^2) / (R_6 + R_n) = 2\sqrt{2} * R_{n2} + 2R_{n2} / \sqrt{2} (R_n + R_n) = 2R_n \quad (3)$$

4) Ток I_1

$$I_1 = I_n(R_n + \sqrt{2} * R_n) / \sqrt{2} R_n = I_n(1 + \sqrt{2}) / \sqrt{2} \sim 1,700 I_n \text{ (А)} \quad (4)$$

5) Мощность, выделяемая в нагрузке

$$P_n = I_n^2 * R_n \text{ (Вт)} \quad (5)$$

6) Выходная мощность

$$P_{\text{вых}} = P_n / 0,175 \text{ (Вт)} \text{ (получено из } P_n = 0,175 * I_1^2 * R_3 = 0,175 * P_1) \quad (6)$$

7) Мощность, выделяемая на балластном сопротивлении

$$P_6 = P_n - P_1 \text{ (Вт)} \quad (7)$$

8) Мощность, выделяемая в обмотке управления

$$P_y = I_y^2 * R_y \text{ (Вт)} \quad (8)$$

2. Пример расчета

Исходные данные:

$$R_H = 5625 \text{ Ом}; I_H = 5 \text{ мА}; I_y = 0,25 \text{ мА}; R_y = 1000 \text{ Ом}$$

Решение

1. $R_6 = \sqrt{2} * 5625 = 8000 \text{ (Ом)}$
2. $R_3 = 2 * 5625 = 11250 \text{ (Ом)}$
3. $I_1 = 1,7 * 5 = 8,5 \text{ (мА)}$
4. $P_H = (5 * 10^{-3})^2 * 5625 = 0,014 \text{ (Вт)}$
5. $P_{\text{вых.}} = 0,014 / 0,175 = 2,45 \text{ (Вт)}$
6. $P_6 = 2,45 - 0,014 = 2,436 \text{ (Вт)}$
7. $P_y = (0,25 * 10^{-3})^2 * 1000 = 0,625 * 10^{-3} \text{ (Вт)}$

3. Задание:

3.1. Рассчитать основные параметры реверсивного МУ.

Исходные данные для расчета взять из таблицы 1, согласно варианту.

Таблица 1

№	R_H Ом	I_H мА	I_y мА	R_y Ом
1	5000	5,0	0,35	1250
2	5500	4,5	0,25	1300
3	5400	5,5	0,4	1150
4	5650	5,2	0,3	1400
5	5300	6,0	0,2	1500

3.2 Произвести расчет:

$$R_6 =$$

$$R_3 =$$

$$I_1 =$$

$I_1 =$
$P_H =$
$P_{\text{ВЫХ}} =$
$P_6 =$
$P_y =$

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2

Таблица 2

R_6 (Ом)	R_3 (Ом)	I_1 (А)	P_H (Вт)	$P_{\text{ВЫХ}}$ (Вт)	P_6 (Вт)	P_y (Вт)

4. Контрольные вопросы к практической работе №7

1. Как определить коэффициент усиления многокаскадного МУ, если известны коэффициенты усиления отдельных каскадов?
2. Как определить постоянную времени многокаскадного МУ, если известны постоянные времени отдельных каскадов?
3. Какие виды реверсивных МУ существуют?
4. Как получить реверсивный магнитный усилитель?
5. В чем основные различия реверсивных и нереверсивных МУ?

Список литературы

1. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. -М.: «Форум - Инфра - М», 2002 г., -383с.

Практическая работа №8

Определение основных параметров феррорезонансного стабилизатора напряжения

1 Цель работы

1.1 Научиться рассчитывать параметры феррорезонансного стабилизатора напряжения.

2 Пояснения к работе.

2.1 Краткие теоретические сведения:

Феррорезонансный стабилизатор напряжения служит для стабилизации переменного напряжения. Исследование стабилизатора основано на следующих допущениях: искажение кривой напряжения и фазовый сдвиг напряжений на ненасыщенном и насыщенном стержнях не учитываются; расчет производится по приближенным формулам для заданного среднего значения входного напряжения.

1) Активное сечение стали ненасыщенного стержня:

$$S_{ст1} = 1,1 * \sqrt{P_H} \quad (\text{см}^2) \quad (1)$$

2) Активное сечение стали насыщенного стержня:

$$S_{ст2} = 0,6 * S_{ст1} \quad (\text{см}^2) \quad (2)$$

3) Число вольт на один виток первичной обмотки:

$$e_o = 0,022 * S_{ст1} \quad (\text{В}) \quad (3)$$

4) Напряжение на конденсаторе

$$U_c \sim 0,65 * U_p \quad (\text{В}) \quad (4)$$

где U_p – допустимое рабочее напряжение

5) Емкость конденсатора

$$C = 13000 * P_H / U_c^2 \quad (\text{Ф}) \quad (5)$$

6) Число витков обмоток стабилизатора:

а) первичная обмотка $W_1 = U_{вх} / e_o$ (6)

б) вторичная обмотка $W_2 = 1,43 U_H / e_o$ (7)

в) компенсационная обмотка $W_k = 0,25 * W_2$ (8)

г) обмотка $W_3 = U_c / e_o - W_2$ (9)

7) Ток в обмотках:

$$\text{а) } I_1 = 2 * P_H / U_{BX} \text{ (A)} \quad (10)$$

$$\text{б) } I_3 = 1,5 * P_H / U_H \text{ (A)} \quad (11)$$

$$\text{в) } I_K = I_H = P_H / U_H \text{ (A)} \quad (12)$$

$$\text{г) } I_2 = \sqrt{I_K^2 + I_3^2} \text{ (A)} \quad (13)$$

8) Диаметр провода обмоток:

$$d_1 = 4 * I_1 / 3,14 * J \text{ (мм)} \quad (14)$$

$$d_3 = 4 * I_3 / 3,1 \quad (15)$$

$$d_K = 4 * I_K / 3,14 * J \text{ (мм)} \quad (16)$$

$$d_2 = 4 * I_2 / 3,14 * J \text{ (мм)} \quad (17)$$

где J – допустимая плотность тока

2.2 Пример расчета:

Исходные данные.

$P_H = 70 \text{ Вт}$; $U_H = 170 \text{ В}$; $U_{BX} = 170 \text{ В}$; $U_p = 500 \text{ В}$; $J = 1,6 \text{ А/мм}$

Решение:

$$1. S_{CT1} = 1,1 * \sqrt{P_H} = 1,1 * \sqrt{70} = 9,2 \text{ (см}^2\text{)}$$

$$2. S_{CT2} = 0,6 * S_{CT1} = 0,6 * 9,2 = 5,5 \text{ (см}^2\text{)}$$

$$3. e_o = 0,022 * S_{CT1} = 0,022 * 9,2 = 0,2 \text{ (В)}$$

$$4. U_c = 0,65 U_p = 0,65 * 500 = 325 \text{ (В)}$$

$$5. C = 13000 * P_H / U_{c2} = 13000 * 70 / 325 * 325 = 9 \text{ (Ф)}$$

$$6. W_1 = U_{BX} / e_o = 170 / 0,2 = 850$$

$$W_2 = 1,43 * U_H / e_o = 1,43 * 170 / 0,2 = 1215$$

$$W_K = 0,25 * W_2 = 0,25 * 1215 = 304$$

$$W_3 = U_c / e_o - W_2 = 325 / 0,2 - 1215 = 410$$

$$7. I_1 = 2 * P_H / U_{BX} = 2 * 70 / 170 = 0,8 \text{ (А)}$$

$$I_3 = 1,5 * P_H / U_H = 1,5 * 70 / 170 = 0,6 \text{ (А)}$$

$$I_K = I_H = P_H / U_H = 70 / 170 = 0,4 \text{ (А)}$$

$$I_2 = \sqrt{I_K^2 + I_3^2} = \sqrt{0,4^2 + 0,6^2} = 0,76 \text{ (А)}$$

$$8. d_1 = 4 * I_1 / 3,14 * J = 4 * 0,8 / 3,14 * 1,6 = 0,63 \text{ (мм)}$$

$$d_2 = 4 * I_2 / 3,14 * J = 4 * 0,76 / 3,14 * 1,6 = 0,6 \text{ (мм)}$$

$$d_3 = 4 * I_3 / 3,14 * J = 4 * 0,6 / 3,14 * 1,6 = 0,47 \text{ (мм)}$$

$$d_K = 4 * I_K / 3,14 * J = 4 * 0,4 / 3,14 * 1,6 = 0,31 \text{ (мм)}$$

3. Задание:

3.1 Определить основные параметры феррорезонансного стабилизатора напряжения. Исходные данные для расчета взять из таблицы 1 согласно варианту.

Таблица 1

№ варианта	P_n (Вт)	U_n (В)	$U_{вх}$ (В)	U_p (В)	J (А/мм)
1	60	170	180	500	1,6
2	70	180	160	600	1,6
3	80	190	180	500	1,6
4	90	200	170	600	1,6
5	100	220	200	500	1,6

3.2. Произвести расчет

$$S_{ст1} =$$

$$S_{ст2} =$$

$$e_o =$$

$$U_c =$$

$$C =$$

$$W_1 =$$

$$W_2 =$$

$$W_k =$$

$$W_3 =$$

$I_1 =$
$I_3 =$
$I_K =$
$I_2 =$
$d_1 =$
$d_2 =$
$d_3 =$
$d_K =$

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2

Таблица 2

S_1 (см^2)	S_2 (см^2)	e_o (В)	U_c (В)	C (Ф)	W_1	W_2	W_3	W_K

I_1 (А)	I_2 (А)	I_3 (А)	I_K (А)	d_1 (мм)	d_2 (мм)	d_3 (мм)	d_K (мм)

4. Контрольные вопросы к практической работе №8

1. В каких контурах можно получить резонансы тока и напряжения?
2. В каких контурах можно получить стабилизацию тока и напряжения?
3. Что является основным недостатком феррорезонансного стабилизатора?
4. Какие возможны допущения при исследовании феррорезонансного стабилизатора?
5. Какие бывают феррорезонансные стабилизаторы?

Список литературы

1. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. -М.,: «Форум - Инфра - М», 2002 г., -383с.

Практическая работа №9

Определение основных параметров следящего привода

1 Цель работы

Научиться рассчитывать параметры исполнительного устройства и коэффициента усиления системы для следящего привода

2 Пояснения к работе.

2.1 Краткие теоретические сведения:

Системы автоматки делятся на системы стабилизации, системы программного управления и следящие системы. Следящие системы – это такие системы, которые с той или иной степенью точности воспроизводят изменения входных величин, происходящие по произвольному закону.

По назначению следящие системы делятся на следящие электроприводы, системы дистанционного управления, измерительные системы.

1) передаточное число редуктора:

$$i_M = \frac{n_{\max}}{n_H}, \quad (1)$$

где n_{\max} - максимальная скорость загрузки;
 n_H - число оборотов двигателя.

2) момент сопротивления, приведенный к валу:

$$M_{с.пр} = \frac{M_c * i_M}{\eta} \text{ (Н/м)}, \quad (2)$$

где M_c - момент сопротивления нагрузки;
 η - КПД механическая передача.

3) мощность двигателя:

$$P_M = \frac{M_{с.пр} * n_H}{97,5} \text{ (Вт)}, \quad (3)$$

4) коэффициент усиления двигателя по скорости относительно напряжения управления;

$$K_d = \frac{n_H}{U_{y.\max}}, \quad (4)$$

5) коэффициент усиления усилителя по напряжению:

$$K_y = \frac{U_{y,\max}}{\Delta_d * i * K}, \quad (5)$$

где Δ_d - допустимое значение динамической ошибки;

i - передаточное число между сельсинами точного и грубого отчетов.

6) общий коэффициент усиления системы:

$$K_0 = K * K_y * K_d * K_M, \quad (6)$$

где $K_M = i_M * i$ - коэффициент механической передачи к сельсину точного отчета.

2.2 Пример расчета

Исходные данные:

$M_c = 50 \text{ Н*м}$; $n_{\max} = 3,3 \text{ об/мин}$; $\Delta_d \leq 0,1^\circ$; $i = 30$; $K = 0,5 \text{ В/град}$; $U_{y,\max} = 240 \text{ В}$,
 $n_n = 6000 \text{ об/мин}$; $\eta = 0,6$

Решение:

1) $i_M = 333/6000 = 1/1800$;

2) $M_{c,\text{пр}} = 50 / (0,6 * 1800) = 4,63 * 10^{-2} \text{ (Н*м)}$;

3) $P_M = (4,63 * 10^{-2} * 6000) / 97,5 = 2,86 * 10^{-2} \text{ (кВт)}$;

4) $K_d = 6000/240 = 150 \text{ (град/(в*сек))}$;

5) $K_y = 240 / (0,1 * 30 * 0,5) = 160$;

6) $K_M = 30/1800 = 1/60$;

7) $K_0 = 0,5 * 160 * 150 * (1/60) = 200 \text{ (1/сек)}$.

3. Задание:

3.1 Рассчитать общий коэффициент усиления системы. Исходные данные для расчета взять из таблицы 1, согласно варианту.

Таблица 1

№ варианта	M_c (Н*М)	n_{\max} (об/мин)	Δ_d	i	K (В/град)	n_n (об/мин)	η	$U_{y,\max}$ (В)
1	45	3,3	0,1	25	0,5	5500	0,58	240
2	55	3,3	0,1	30	0,5	5700	0,5	240
3	60	3,3	0,1	35	0,5	5800	0,6	240
4	50	3,3	0,1	25	0,5	5900	0,62	240
5	48	3,3	0,1	29	0,5	6000	0,65	240

3.2 Произвести расчет

$i_M =$ _____

$M_{с.пр} =$ _____

$P_M =$ _____

$K_d =$ _____

$K_y =$ _____

$K_M =$ _____

$K_O =$ _____

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2.

Таблица 2

№ варианта	i_M	$M_{с.пр}(H^*M)$	$P_M(Вт)$	K_d	K_y	K_M	K_O

4. Контрольные вопросы к практической работе №9

1. Чем отличаются следящие системы от систем стабилизации и систем программного управления?
2. Как делятся следящие системы по назначению?
3. Какая характеристика следящей системы является основной?
4. Чем определяется точность следящей системы?
5. Что вызывает увеличение добротности следящей системы?

Список литературы

1. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. -М.: «Форум - Инфра - М», 2002 г., -383с.

Практическая работа №10.

Определение основных параметров цифро – аналогового преобразователя (ЦАП)

1 Цель работы

Изучить работу ЦАП с весовыми резисторами и рассчитать коэффициент усиления и выходное напряжение ЦАП при подаче различных двоичных комбинаций на входы ЦАП .

2 Пояснения к работе.

2.1 Краткие теоретические сведения:

ЦАП используются для преобразования цифрового кода в аналоговый сигнал. ЦАП с весовыми резисторами относится к устройствам прямого преобразования и состоит из двух узлов: резистивной схемы (матрицы) на резисторах $R_1 - R_4$ и суммирующего операционного усилителя (ОУ) с резистором обратной связи R_0 . Опорное напряжение $U_{оп}$ подключается к резисторам матрицы переключателями А, В, С, D, имитирующими преобразуемый код.

1. Коэффициент усиления по напряжению (K_U), когда только один переключатель установлен в положение, соответствующее логической 1:

$$K_i = R_0/R_i \quad (1)$$

2. K_{ij} , когда два переключателя установлены в положения, соответствующие логическим 1:

$$K_{ij} = R_0 : R_i * R_j / (R_i + R_j) \quad (2)$$

3. K_{ijk} , когда три переключателя установлены в положения, соответствующие логическим 1:

$$K_{ijk} = R_0 : R_i * R_j * R_n / (R_i * R_j + R_i * R_n + R_j * R_n) \quad (3)$$

4. K_{ijkl} , когда четыре переключателя установлены в положения, соответствующие логическим 1:

$$K_{ijkl} = R_0 : R_i * R_j * R_n * R_m / (R_i * R_j * R_n + R_i * R_j * R_m + R_j * R_n * R_m + R_i * R_n * R_m) \quad (4)$$

5. Выходное напряжение ЦАП:

$$U_{вых.} = K_u * U_{оп} (B), \quad (5)$$

где K_u для различных положений переключателей, имитирующих кодовые комбинации «0» и «1».

2.2 Пример расчета:

Исходные данные даны для кодовых комбинаций 0001 и 1111:

1. Переключатель А установлен в положение, соответствующее логической 1
2. Переключатели А, В, С, D, установлены в положения, соответствующие логическим 1
 $U_{\text{вх.}} = 6 \text{ В}; R_0 = 13,3 \text{ кОм}; R_1 = 200 \text{ кОм}; R_2 = 100 \text{ кОм};$
 $R_3 = 50 \text{ кОм}; R_4 = 25 \text{ кОм}.$

Решение:

2. $K_1 = 13,3/200 = 0,065$
2. $U_{\text{вых.1}} = 0,065*6 = 0,4 \text{ (В)}$
3. $K_{1234} = 13,3 : (200*100*50*25/(200*100*50 + 200*100*25 + 100*50*25 + 200*50*25)) = 1$
4. $U_{\text{вых.1234}} = 1*6 = 6 \text{ (В)}$

3. Задание:

3.1 Определить коэффициенты усиления по напряжению ОУ и напряжения на выходе ЦАП при $U_{\text{вх.}} = 6 \text{ В}$ для различных положений переключателей А, В, С, D, имитирующих кодовые комбинации «0» и «1». Исходные данные взять из таблицы 1, согласно варианту.

Таблица 1

№ варианта	Кодовые Комбинации			R ₀ (кОм)	R ₁ (кОм)	R ₂ (кОм)	R ₃ (кОм)	R ₄ (кОм)
1	1001	0011	0111	10	150	75	37,5	18,75
2	0010	0110	1011	10	150	75	37,5	18,75
3	0100	0101	1101	10	150	75	37,5	18,75
4	1000	1010	1110	10	150	75	37,5	18,75
5	0001	1100	1111	10	150	75	37,5	18,75

3.2 Произвести расчет:

K =

K =

К =
U =
U =
U =

3.3 Результаты расчета свести в таблицу 2

Таблица 2

К	К	К	U (В)	U (В)	U (В)

1. Контрольные вопросы к практической работе № 10

1. Для каких целей предназначен цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП)?
2. В каком виде представляются входные величины в ЦАП?
3. Что составляет основу схемы ЦАП?
4. Для чего в схеме ЦАП используются переключатели?
5. Какие элементы могут использоваться в качестве переключателей?

Список литературы

1. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. -М,: «Форум - Инфра - М», 2002 г., -383с.