



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Авиационный колледж ДГТУ

Методические указания
к лабораторным работам
междисциплинарного курса МДК 01.01

**«Технология формирования
систем автоматического управ-
ления типовых технологических
процессов, средств
измерений, несложных
мехатронных устройств и
систем»**

Автор
Смирнов Ю. А.

Ростов-на-Дону, 2019

Аннотация

Методические указания к лабораторным работам МДК 01.01. «Технология формирования систем автоматического управления, типовых технологических процессов, средств измерений, несложных мехатронных устройств и систем» предназначены для студентов очной формы обучения направления 15.02.07 Автоматизация технологических процессов и производств.

Автор



К.т.н, доцент, преподаватель 1-ой категории авиационного колледжа ДГТУ
Смирнов Юрий Александрович.





Содержание

1. Лабораторная работа №1. Исследование позиционных динамических звеньев 1-го и 2-го порядков.....	5
2. Лабораторная работа №2. Исследование дифференцирующих и интегрирующих динамических звеньев.....	13
3. Лабораторная работа № 3. Анализ устойчивости линейной САУ корневым и алгебраическим методом.....	19
4. Лабораторная работа №4. Анализ устойчивости линейной САУ частотными методами.....	24
5. Лабораторная работа №5. Определение качества переходного процесса линейной САУ.....	29
6. Лабораторная работа №6. Исследование характеристик ПИД-регуляторов.....	39
7. Лабораторная работа №7. Исследование устойчивости и качества импульсных САУ в Matlab.....	43
8. Лабораторная работа №8. Исследование релейно-контактной аппаратуры.....	53
9. Лабораторная работа №9. Испытание электрических предохранителей, автоматических выключателей и реле.....	61
10. Лабораторная работа №10. Испытание тепловых реле..	65
11. Лабораторная работа №11. Схемы электроприводов с асинхронным электродвигателем.....	67
12. Лабораторная работа №12. Командный электропневматический прибор КЭП-12У.....	70
13. Лабораторная работа №13. Исследование поточно-транспортной системы.....	73
14. Лабораторная работа №14. Исследование системы двухпозиционного автоматического регулирования температуры с манометрическим термометром.....	75
15. Лабораторная работа №15. Исследование работы автоматизированной насосной станции.....	79
16. Лабораторная работа №16. Пуск/останов котельной на стенде АТП-01.....	85
17. Лабораторная работа №17. Применение ПИД-регулирования в котельной на стенде АТП-01.....	86
18. Лабораторная работа №18. Расчет тепловой энергии и тепловой мощности на стенде АТП-01.....	87
19. Лабораторная работа №19. Процесс нагрева теплоносителя в котле на стенде АТП-01.....	87



20. Лабораторная работа №20. Создание и обработка аварийных ситуаций на стенде АТП-01.....	88
21. Лабораторная работа №21. Измерение затраченной электроэнергии на выработку необходимого количества тепла	88
22. Список литературы.....	89

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Цель работы: экспериментальное исследование временных и частотных характеристик математических моделей типовых позиционных динамических звеньев 1-го и 2-го порядков с помощью ПЭВМ.

Теоретические сведения

Линейные стационарные непрерывные системы описываются *дифференциальными уравнениями* (ДУ), которые могут быть представлены также *передаточными функциями* (ПФ) и являются математическими моделями (ММ) этих систем.

Многие объекты управления (ОУ), различные устройства автоматических систем и составляющие их элементы часто описываются простыми ММ, соответствующими типовым элементарным звеньям.

Типы звеньев определяются по виду описывающих их элементарных ДУ или соответствующих им ПФ, а, соединяя типовые звенья в необходимых комбинациях, можно строить линейные математические модели любой сложности.

Ниже рассматриваются ММ типовых элементарных звеньев, традиционно используемых в современной теории управления.

1. Передаточная функция САУ

Пусть некоторая САУ описывается линейным ДУ n -го порядка:

$$a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x(t) = b_m \frac{d^m g}{dt^m} + \dots + b_0 g(t),$$

где $x(t)$ – регулируемая, или выходная, величина системы; $g(t)$ – входной сигнал, вызывающий реакцию системы.

В ТАУ часто используют операторную форму записи дифференциальных уравнений. При этом вводится понятие дифференциального оператора $p = d/dt$ так, что, $dy/dt = py$, а $p^n = d^n/dt^n$. Это лишь другое обозначение операции дифференцирования. Обратная дифференцированию операция интегрирования записывается как $1/p$. В операторной форме исходное дифференциальное уравнение записывается как алгебраическое:

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0)x = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0)g.$$

В ТАУ используется понятие передаточной функции – отношение операторов правой и левой частей ДУ:

$$W(p) = M(p) / D(p) = (b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0) / (a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0).$$

Полагая, что имеют место нулевые начальные условия, т.е. что система до момента приложения воздействия находилась в состоянии

покою, преобразуем обе части ДУ по Лапласу и из полученного уравнения в изображениях:

$$X(s)(a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0) = G(s)(b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0)$$

найдем отношение изображения реакции системы $X(s)$ к изображению входного сигнала $G(s)$:

$$W(s) = \frac{X(s)}{G(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0}$$

При нулевых начальных условиях обе формы записи совпадают так как:

$$L[px(t)] = sX(s), \dots, L[p^n x(t)] = s^n X(s)$$

$$L[pg(t)] = sG(s), \dots, L[p^m g(t)] = s^m G(s)'$$

и переменная s может быть отождествлена с оператором дифференцирования p .

Передаточной функцией динамического звена называется отношение изображений по Лапласу выходной переменной к входной при нулевых начальных условиях.

Знаменатель передаточной функции $D(p) = a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0$ называют *характеристическим полиномом*. Его корни, то есть значения p , при которых знаменатель $D(p)$ обращается в ноль, а $W(p)$ стремится к бесконечности, называются *полюсами передаточной функции*.

Числитель $M(p) = b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0$ называют *операторным коэффициентом передачи*. Его корни, при которых $M(p) = 0$ и $W(p) = 0$, называются *нулями передаточной функции*.

Звено САУ с известной передаточной функцией называется *динамическим звеном*. Оно изображается прямоугольником, внутри которого записывается выражение передаточной функции.

2. Построение переходного процесса системы

Реакция системы на единичное ступенчатое воздействие (зависимость изменения выходной величины системы от времени при подаче на ее вход единичного ступенчатого воздействия при нулевых начальных условиях) называется *переходной функцией (характеристикой) системы (переходным процессом)* и обозначается $h(t)$.

Зная передаточную функцию $W(p) = M(p)/D(p)$, выражение для переходной функции можно записать следующим образом:

$$h(p) = W(p)L[1(t)],$$

где $L[1(t)] = 1/p$ - преобразование Лапласа единичной ступенчатой функции.

Тогда $h(p) = W(p) \cdot 1/p$.

Далее взяв обратное преобразование Лапласа, находится функция переходного процесса от времени:

$$h(t) = L^{-1}[h(p)].$$

3. Построение частотных характеристик

$$j = \sqrt{-1}, \quad s(\omega) = j\omega, \quad \omega = 0, 0.1 \dots 100.$$

Составляется частотная передаточная функция $W(\omega)$.

АЧХ: $A(\omega) = |W(\omega)|$.


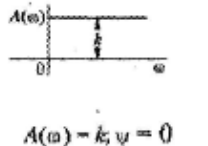
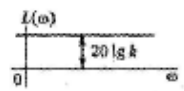
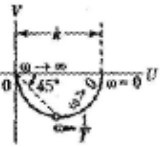
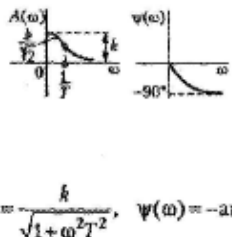
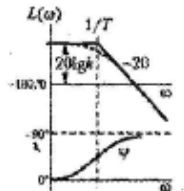
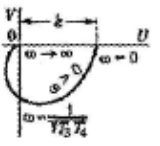
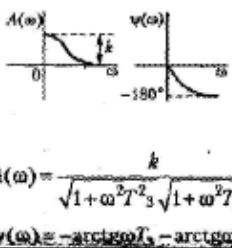
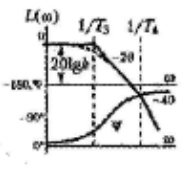
ФЧХ: $f(\omega) = \arg(W(\omega)) \cdot \frac{180}{\pi}$.

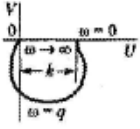
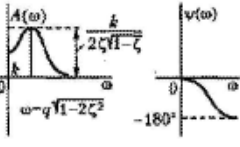
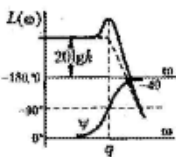
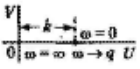
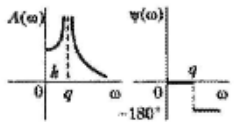
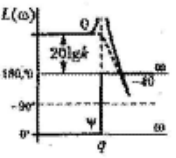
АФЧХ: зависимость $Im(W(\omega))$ от $Re(W(\omega))$.

Логарифмические частотные характеристики:

ЛАЧХ: $L(\omega) = 20 \lg(A(\omega))$, по оси абсцисс (x) логарифмическая шкала.

ЛФЧХ: $f(\omega) = \arg(W(\omega)) \cdot \frac{180}{\pi}$, по оси абсцисс (x) логарифмическая шкала.

Тип звена и частотная передаточная функция	Амплитудно-фазовая	Амплитудная и фазовая	Логарифмические
Безынерционное $W(j\omega) = k$		 <p>$A(\omega) = k; \psi = 0$</p>	
Аperiodическое 1-го порядка $W(j\omega) = \frac{k}{1 + j\omega T}$		 <p>$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}, \quad \psi(\omega) = -\arctg \omega T$</p>	
Аperiodическое 2-го порядка $W(j\omega) = \frac{k}{(1 + j\omega T_3)(1 + j\omega T_4)}$		 <p>$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 T_3^2} \sqrt{1 + \omega^2 T_4^2}},$ $\psi(\omega) = -\arctg \omega T_3 - \arctg \omega T_4$</p>	

Тип звена и частотная передаточная функция	Амплитудно-фазовая	Амплитудная и фазовая	Логарифмические
<p>Колебательное</p> $W(j\omega) = \frac{k}{1 + j\omega 2\zeta T - \omega^2 T^2} = \frac{k}{1 + j\frac{\omega^2 \zeta}{q} - \frac{\omega^2}{q^2}}$		 $A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4\zeta^2 \omega^2 T^2}}$ $\psi(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{2\zeta \omega T}{1 - \omega^2 T^2}$	
<p>Консервативные</p> $W(j\omega) = \frac{k}{1 - \omega^2 T^2} = \frac{k}{1 - \frac{\omega^2}{q^2}}$		 $A(\omega) = \frac{k}{ 1 - \omega^2 T^2 }$ $\psi = 0^\circ \text{ при } 0 < \omega < q;$ $\psi = -180^\circ \text{ при } \omega > q$	

4. Позиционные динамические звенья 1-го порядка

Пропорциональное звено (усилительное, безинерционное)

Дифференциальное уравнение:

$$x(t) = ku(t),$$

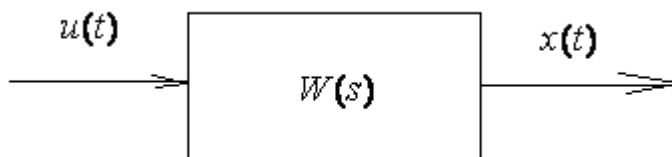
где k – коэффициент усиления.

Передаточная функция:

$$W(s) = k.$$

Переходная характеристика:

$$h(t) = k.$$



Апериодическое звено 1-го порядка (инерционное)

Дифференциальное уравнение:

$$T \frac{dx}{dt} + x = ku(t),$$

где T – постоянная времени.

Передаточная функция:

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1}$$

Переходная характеристика:

$$h(t) = k \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right).$$

5. Позиционные динамические звенья 2-го порядка

Общее дифференциальное уравнение:

$$T^2 \frac{d^2 x}{dt^2} + 2\xi T \frac{dx}{dt} + x(t) = ku(t),$$

где ξ - степень затухания.

Передаточная функция звеньев:

$$W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}$$

Влияние ξ на характер переходного процесса:

$\xi > 1$ – аperiodическое звено 2-го порядка;

$0 < \xi < 1$ – колебательное звено;

$\xi = 1$ – консервативное звено;

$-1 < \xi < 0$ – незатухающее колебательное звено.

Аperiodическое звено 2-го порядка и колебательное звено

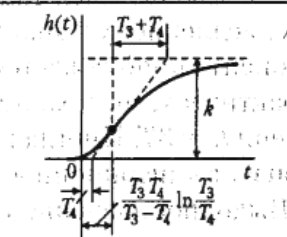
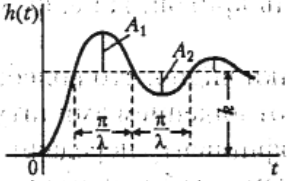
Переходная характеристика:

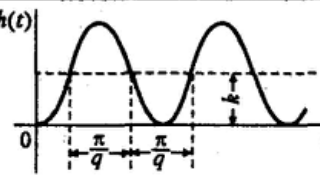
$$h(t, i) := k \cdot \left[1 - e^{\left(-\frac{\xi}{T_i} \cdot t \right)} \cdot \left(\frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T_i} \cdot t \right) + \cos \left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T_i} \cdot t \right) \right) \right]$$

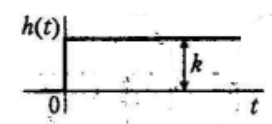
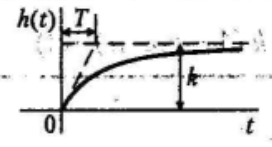
Консервативное звено

Переходная характеристика:

$$h(t) = k \left(1 - \cos \left(\frac{t}{T} \right) \right).$$

<p>Апериодическое 2-го порядка</p> $W(p) = \frac{k}{1+T_1 p + T_2^2 p^2} = \frac{k}{(1+T_3 p)(1+T_4 p)}$ $T_{3,4} = \frac{T_1}{2} \pm \sqrt{\frac{T_1^2}{4} - T_2^2}$	 $h(t) = k \left(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_3}} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_4}} \right) \cdot 1(t)$
<p>Колебательное</p> $W(p) = \frac{k}{1+2\zeta T p + T^2 p^2}$	 $\lambda = \frac{1}{T} \sqrt{1 - \zeta^2}; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{A_1}{A_2}$

<p>Консервативное</p> $W(p) = \frac{k}{1+T^2 p^2} = \frac{k}{1+\frac{p^2}{q^2}}$ $q = \frac{1}{T}$	 $h(t) = k (1 - \cos qt)$
--	---

Тип звена и его передаточная функция	Переходная функция h(t)
<p>Безынерционное</p> $W(p) = k$	 $h(t) = k$
<p>Апериодическое 1-го порядка</p> $W(p) = k / (1+Tp)$	 $h(t) = k \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$



Задание.

1. Исследование позиционных динамических звеньев 1-го порядка

1.1 Ознакомится с переходными и частотными характеристиками **пропорционального (усилительное, безинерционное) звена** при различных значениях коэффициента усиления k .

1.2 Исследовать переходные и частотные характеристики **апериодического звена 1-го порядка (инерционное)** и оценить влияние на их характер постоянной времени T и коэффициента передачи k .

2. Исследование позиционных динамических звеньев 2-го порядка

2.1 Исследовать переходные и частотные характеристики **апериодического звена 2-го порядка** при различных значениях параметров звена ξ и T .

2.2 Исследовать переходные и частотные характеристики **колебательного звена** при различных значениях параметров ξ и T .

2.3 Исследовать влияние k и T на характер колебаний **консервативного звена** и ознакомиться с частотными и логарифмическими частотными характеристиками.

3. Сделать выводы по лабораторной работе.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.

2. Дифференциальные уравнения и передаточные функции исследуемых динамических звеньев.

3. Аналитические выражения для переходных функций, таблицы и графики исследуемых переходных процессов.

4. Выводы о влиянии параметров звеньев на их переходные характеристики.

5. Аналитические выражения для частотных характеристик, таблицы и графики АЧХ, ФЧХ, АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ исследуемых типовых динамических звеньев.

6. Выводы о влиянии параметров звеньев на их частотные характеристики.

7. Выводы по лабораторной работе.

Варианты.

№	k	T	№	k	T
1	5, 10, 20	0.1, 0.5, 0.7	13	17, 22, 32	0.3, 0.7, 0.9
2	6, 11, 21	0.2, 0.6, 0.8	14	18, 23, 33	0.4, 0.8, 1
3	7, 12, 22	0.3, 0.7, 0.9	15	19, 24, 34	0.5, 0.9, 1.1
4	8, 13, 23	0.4, 0.8, 1	16	20, 25, 35	0.6, 1, 1.2
5	9, 14, 24	0.5, 0.9, 1.1	17	21, 26, 36	0.7, 1.1, 1.3
6	10, 15, 25	0.6, 1, 1.2	18	22, 27, 37	0.2, 0.6, 0.8
7	11, 16, 26	0.7, 1.1, 1.3	19	23, 28, 38	0.3, 0.7, 0.9
8	12, 17, 27	0.3, 0.7, 0.9	20	24, 29, 39	0.4, 0.8, 1
9	13, 18, 28	0.4, 0.8, 1	21	25, 30, 40	0.5, 0.9, 1.1
10	14, 19, 29	0.5, 0.9, 1.1	22	26, 31, 41	0.5, 0.9, 1.1
11	15, 20, 30	0.6, 1, 1.2	23	27, 32, 42	0.6, 1, 1.2
12	16, 21, 31	0.7, 1.1, 1.3	24	28, 33, 43	0.7, 1.1, 1.3
			25	29, 34, 44	0.1, 0.5, 0.7

Значения степени затухания ξ (не менее трех значений) для исследования характеристик позиционных динамических звеньев 2-го порядка выбираются студентами самостоятельно в соответствии со следующими условиями:

$\xi > 1$ – аperiodическое звено 2-го порядка;

$0 < \xi < 1$ – колебательное звено;

$\xi = 1$ – консервативное звено.

Контрольные вопросы.

1. Передаточная функция САУ.

2. Характеристический полином.
3. Переходной процесс. Построение переходного процесса системы.
4. Амплитудно-частотная характеристика АЧХ.
5. Фаза-частотная характеристика ФЧХ.
6. Амплитудно-фаза-частотная характеристика АФЧХ.
7. Логарифмические частотные характеристики ЛАЧХ и ЛФЧХ.
8. Переходные процессы позиционных динамических звеньев 1-го порядка.
9. Частотные характеристики позиционных динамических звеньев 1-го порядка.
10. Переходные процессы позиционных динамических звеньев 2-го порядка.
11. Частотные характеристики позиционных динамических звеньев 2-го порядка.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Исследование дифференцирующих и интегрирующих динамических звеньев

Цель работы: экспериментальное исследование переходных и частотных характеристик математических моделей интегрирующих и дифференцирующих звеньев САУ.

Теоретические сведения

1. Интегрирующие звенья

1.1 Идеальное интегрирующее звено

Дифференциальное уравнение:

$$y = k \int x dt \text{ или } \frac{dy}{dt} = kx .$$

Передаточная функция:

$$W(s) = \frac{k}{s} .$$

Переходная характеристика:

$$h(t) = kt .$$

1.2 Интегрирующее звено с замедлением

Дифференциальное уравнение:

$$T \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} = kx .$$

Передаточная функция:

$$W(s) = \frac{k}{s(Ts + 1)}.$$

Переходная характеристика:

$$h(t) = k \left(T e^{-\frac{t}{T}} - T + t \right).$$

1.3 Изодромное звено

Дифференциальное уравнение:

$$\frac{dy}{dt} = kx + T \frac{dx}{dt}, \quad sy = x(k + Ts).$$

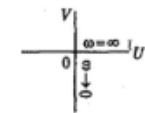
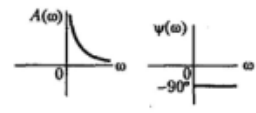
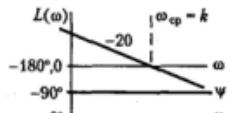
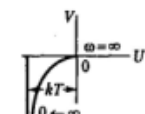
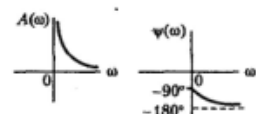
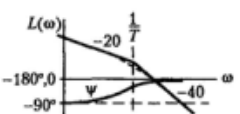
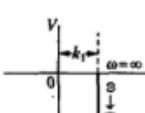
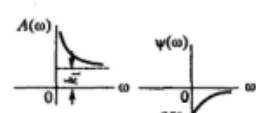
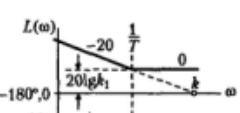
Передаточная функция такого звена:

$$W(s) = \left(\frac{k}{s} \right) (Ts + 1).$$

Переходная характеристика:

$$h(t) = k(t + T).$$

Тип звена и передаточная функция	Переходная функция
Идеальное $W(p) = \frac{k}{p}$	 $h(t) = kt$
С замедлением $W(p) = \frac{k}{p(1+Tp)}$	 $h(t) = k[t - T(1 - e^{-t/T})]$
Изодромное $W(p) = \frac{k}{p} + k_1 = \frac{k(1+Tp)}{p},$ $T = \frac{k_1}{k}$	 $h(t) = k(t + T)$

Тип звена и частотная передаточная функция	Амплитудно-фазовая	Амплитудная и фазовая	Логарифмические
<p>Идеальное</p> $W(j\omega) = \frac{k}{j\omega}$			
<p>Интегрирующее с замедлением</p> $W(j\omega) = \frac{k}{j\omega(1+j\omega T)}$			
<p>Изодромное</p> $W(j\omega) = \frac{k}{j\omega} + k_1 = \frac{k(1+j\omega T)}{j\omega},$ $T = \frac{k_1}{k}$			

2. Дифференцирующие звенья

2.1 Идеальное дифференцирующее звено

Дифференцирующими называются звенья, у которых в установившемся режиме выходная величина пропорциональна производной по времени от входной величины.

Дифференциальное уравнение:

$$y = k \frac{dx}{dt}.$$

Передаточная функция:

$$W(s) = ks.$$

Аналитическое выражение для переходной характеристики:

$$h(t) = k\delta(t),$$

где $\delta(t)$ – дельта-функция.

2.2 Дифференцирующее звено с замедлением

Дифференциальное уравнение:

$$T \frac{dy}{dt} + y = k \frac{dx}{dt},$$

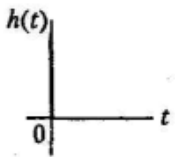
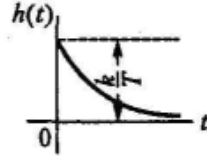
где T – постоянная времени; k – коэффициент передачи.

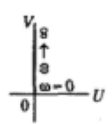
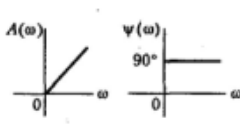
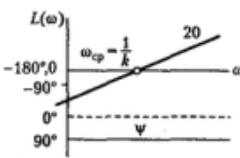
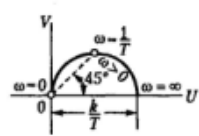
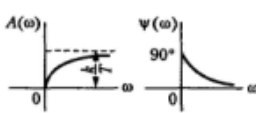
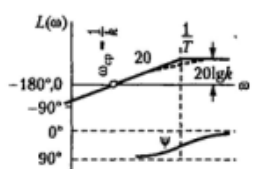
Передаточная функция звена:

$$W(s) = \frac{ks}{Ts + 1}.$$

Переходная характеристика:

$$h(t) = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}}.$$

Тип звена и его передаточная функция	Переходная функция
Идеальное дифференцирующее $W(p) = kp$	 $h(t) = k\delta(t)$
Дифференцирующее с замедлением $W(p) = \frac{kp}{1+Tp}$	 $h(t) = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}}$

Тип звена и его частотная передаточная функция	Амплитудно-фазовая	Амплитудная и фазовая	Логарифмические
Идеальное дифференцирующее $W(j\omega) = kj\omega$			
Дифференцирующее с замедлением $W(j\omega) = \frac{kj\omega}{1+j\omega T}$			

Задание.

Исследование интегрирующих звеньев

1. Исследование идеального интегрирующего звена

1.1 Исследовать переходные характеристики идеального интегрирующего звена и изучить влияние на них коэффициента передачи k .

1.2 Исследовать частотные характеристики идеального интегрирующего звена и изучить влияние на них коэффициента передачи k .

2. Исследование интегрирующего звена с замедлением

2.1 Исследовать переходные характеристики интегрирующего звена с замедлением и изучить влияние на них коэффициента передачи k и постоянной времени T .

2.2 Исследовать частотные характеристики интегрирующего звена с замедлением и изучить влияние на них коэффициента передачи k и постоянной времени T .

3. Исследование изодромного звена

3.1 Исследовать переходные характеристики изодромного звена и изучить влияние на них коэффициента передачи k и постоянной времени T .

3.2 Исследовать частотные характеристики изодромного звена и изучить влияние на них коэффициента передачи k и постоянной времени T .

Исследование дифференцирующих звеньев

4. Исследование дифференцирующего звена с замедлением

4.1 Исследовать переходные характеристики дифференцирующего звена с замедлением и изучить влияние на них коэффициента передачи k и постоянной времени T .

4.2 Исследовать частотные характеристики дифференцирующего звена с замедлением при различных значениях k и T .

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Дифференциальные уравнения и передаточные функции исследуемых динамических звеньев.
3. Аналитические выражения для переходных функций, таблицы и графики исследуемых переходных процессов.
4. Выводы о влиянии параметров звеньев на их переходные характеристики.
5. Аналитические выражения для частотных характеристик, таблицы и графики АЧХ, ФЧХ, АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ исследуемых типовых динамических звеньев.
6. Выводы о влиянии параметров звеньев на их частотные характеристики.
7. Выводы по лабораторной работе.

Варианты.

№	k	T	№	k	T
1	5, 10, 20	0.1, 0.5, 0.7	13	17, 22, 32	0.3, 0.7, 0.9
2	6, 11, 21	0.2, 0.6, 0.8	14	18, 23, 33	0.4, 0.8, 1
3	7, 12, 22	0.3, 0.7, 0.9	15	19, 24, 34	0.5, 0.9, 1.1
4	8, 13, 23	0.4, 0.8, 1	16	20, 25, 35	0.6, 1, 1.2

5	9, 14, 24	0.5, 0.9, 1.1	17	21, 26, 36	0.7, 1.1, 1.3
6	10, 15, 25	0.6, 1, 1.2	18	22, 27, 37	0.2, 0.6, 0.8
7	11, 16, 26	0.7, 1.1, 1.3	19	23, 28, 38	0.3, 0.7, 0.9
8	12, 17, 27	0.3, 0.7, 0.9	20	24, 29, 39	0.4, 0.8, 1
9	13, 18, 28	0.4, 0.8, 1	21	25, 30, 40	0.5, 0.9, 1.1
10	14, 19, 29	0.5, 0.9, 1.1	22	26, 31, 41	0.5, 0.9, 1.1
11	15, 20, 30	0.6, 1, 1.2	23	27, 32, 42	0.6, 1, 1.2
12	16, 21, 31	0.7, 1.1, 1.3	24	28, 33, 43	0.7, 1.1, 1.3
			25	29, 34, 44	0.1, 0.5, 0.7

Контрольные вопросы.

1. Передаточная функция САУ. Характеристический полином.
2. Переходной процесс. Построение переходного процесса системы.
3. Амплитудно-частотная характеристика АЧХ. Фаза-частотная характеристика ФЧХ. Амплитудно-фаза-частотная характеристика АФЧХ.
4. Логарифмические частотные характеристики ЛАЧХ и ЛФЧХ.
5. Переходные процессы дифференцирующих динамических звеньев.
6. Частотные характеристики дифференцирующих динамических звеньев.
7. Переходные процессы интегрирующих динамических звеньев.
8. Частотные характеристики интегрирующих динамических звеньев.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Анализ устойчивости линейной САУ корневым и алгебраическим методами

Цель работы: освоение алгебраических методов анализа устойчивости линейных систем автоматического регулирования.

Теоретические сведения

Необходимое и достаточное условие устойчивости САУ состоит в том, чтобы все полюсы характеристического полинома системы:

$$D(p) = a_0 p^n + \dots + a_{n-1} p + a_n,$$

т.е. корни знаменателя ее передаточной функции λ_j , имели отрицательную вещественную часть (лежали в левой части комплексной плоскости):

$$\operatorname{Re}(\lambda_j) < 0, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Разомкнутые системы управления, собранные из устойчивых элементов, всегда будут устойчивыми. Однако при замыкании систем обратными связями необходим дополнительный анализ их устойчивости, который проводится с помощью различных критериев.

1. Корневой критерий оценки устойчивости линейной системы

Корневым критерием называется критерий оценки устойчивости системы по корням характеристического полинома.

Необходимым условием устойчивости системы любого порядка является положительность всех коэффициентов $a_0 \dots a_n$ ее характеристического полинома. Для систем первого и второго порядков это условие одновременно является и *достаточным*. Однако для более высоких порядков положительность коэффициентов не гарантирует отрицательность корней характеристического полинома.

Система будет асимптотически устойчива, когда вещественные части корней отрицательны.

Система будет асимптотически неустойчива, если найдется хотя бы один корень с положительной вещественной частью.

Пусть характеристическое уравнение замкнутой САУ имеет вид:

$$D(p) = a_0 p^n + \dots + a_{n-1} p + a_n,$$

тогда для нахождения корней воспользуется функцией *MathCAD poly-roots(v)*.

Вектор v будет иметь вид:

$$v = \begin{pmatrix} a_n \\ a_{n-1} \\ \dots \\ a_0 \end{pmatrix}.$$

Например,

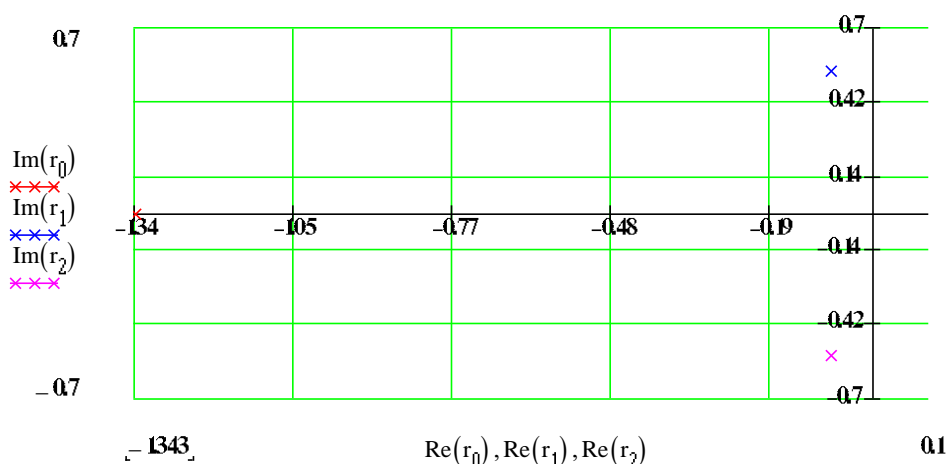
$$D(s) := T_1 \cdot T_2 \cdot s^3 + (T_1 + T_2) \cdot s^2 + (1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_p \cdot T_p) \cdot s + k_1 \cdot k_2 \cdot k_p$$

$$v(T_p, k_p) := \begin{pmatrix} k_1 \cdot k_2 \cdot k_p \\ 1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_p \cdot T_p \\ T_1 + T_2 \\ T_1 \cdot T_2 \end{pmatrix}$$

$$r := \text{polyroot}(v(T_p, k_p))$$

$$r = \begin{pmatrix} -1343 \\ -0.078 + 0.54i \\ -0.078 - 0.54i \end{pmatrix}$$

Вектор r содержит корни данного характеристического уравнения. Расположение корней характеристического уравнения замкнутой системы на комплексной плоскости:



2. Алгебраический критерий оценки устойчивости линейной системы методом Гурвица

Алгебраические критерии устойчивости позволяют судить об устойчивости системы путем алгебраического исследования ее характеристического полинома.

Из коэффициентов характеристического уравнения строится *матрица Гурвица* по алгоритму:

- 1) по главной диагонали слева направо выставляются все коэффициенты характеристического уравнения от a_1 до a_n ;
- 2) от каждого элемента диагонали вверх и вниз достраиваются столбцы определителя так, чтобы индексы убывали сверху вниз;
- 3) на место коэффициентов с индексами меньше нуля или больше n ставятся нули.

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & a_9 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & a_8 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \dots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_n \end{vmatrix}$$

Критерий Гурвица: для того чтобы система автоматического управления была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все диагональные определители матрицы Гурвица имели положительные значения:

$$\Delta_1 = \det[a_1] > 0, \quad \Delta_2 = \det \begin{bmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{bmatrix} > 0,$$

$$\Delta_3 = \det \begin{bmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{bmatrix} > 0, \quad \dots \quad \Delta_n = \det[\Delta] > 0.$$

Если один из определителей равен нулю, то существует хотя бы один нулевой корень, т.е. система находится на границе устойчивости.

Задание.

1. Записать передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы.
2. Составить дифференциальное уравнение замкнутой САУ.
3. Исследовать устойчивость линейной САУ по корням характеристического уравнения при различных значениях параметров регулятора Tp и kp (при фиксированном значении постоянной времени Tp изменять коэффициент усиления kp в соответствии с индивидуальным заданием, затем при фиксированном kp изменять Tp).
4. Провести анализ устойчивости САУ с помощью алгебраического критерия устойчивости Гурвица при различных значениях параметров системы Tp и kp .
5. Сформулировать выводы о влиянии параметров звеньев системы на ее устойчивость.

Отчет о работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Структурную схему, передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы и дифференциальное уравнение замкнутой САУ.

3. Формулировку необходимого и достаточного условия устойчивости САУ. Характеристическое уравнение замкнутой системы.
4. Описание корневого критерия устойчивости САУ и расположение корней на комплексной плоскости для различных значений параметров системы. Выводы об устойчивости системы.
5. Описание алгебраического критерия устойчивости Гурвица, матрицы Гурвица для исследуемой системы и выводы по результатам исследований.

Варианты.

Статическая система 4-го порядка

Вариант 1.

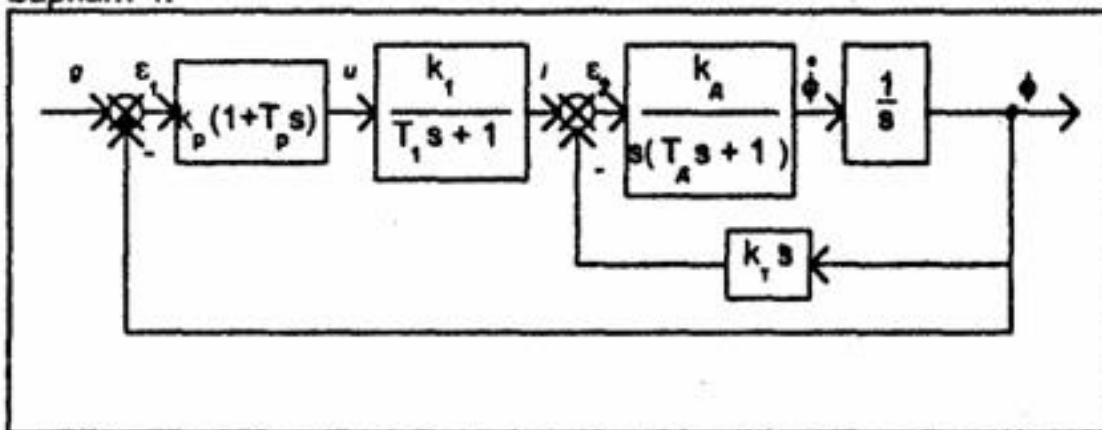


Рис.2. Структурная схема замкнутой САУ для варианта №1.

Постоянные параметры структурной схемы:

$$k_1 = 1 ; k_A = 5; T_1 = 0.005; T_A = 0.05 .$$

№ по списку	1	6	11	16	21
k_f	0.2	0.65	1.0	1.5	2.0

Варьируемые параметры: $T_p = 0.05, 0.1, 0.5, k_p = 2, 5, 20.$

Статическая система 3-го порядка

Вариант 2.

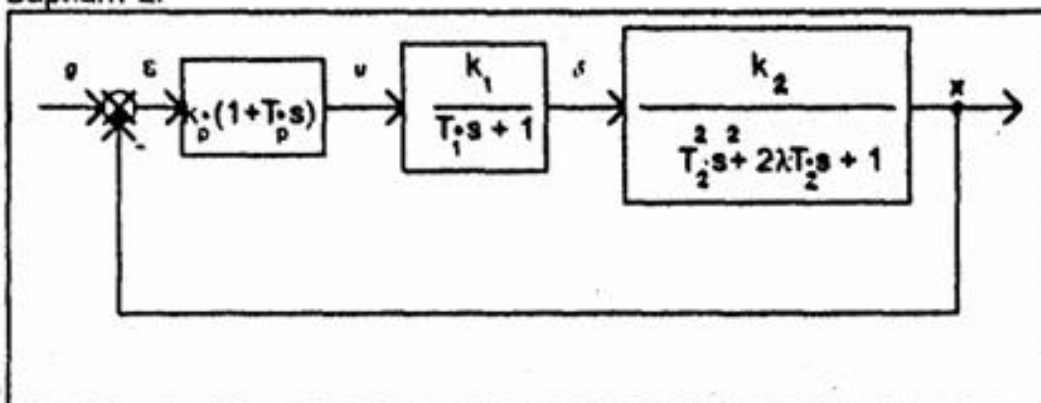


Рис.3. Структурная схема замкнутой САУ для варианта №2.

Постоянные параметры структурной схемы:

$k_1 = 5; k_2 = 2; T_1 = 0.01; T_2 = 0.3.$

№ по списку	2	7	12	17	22
λ	0.0	0.10	0.25	0.40	0.50

Варьируемые параметры: $T_p = 0.05, 0.3, 0.9, k_p = 2, 5, 17.$

Статическая система 4-го порядка

Вариант 4.

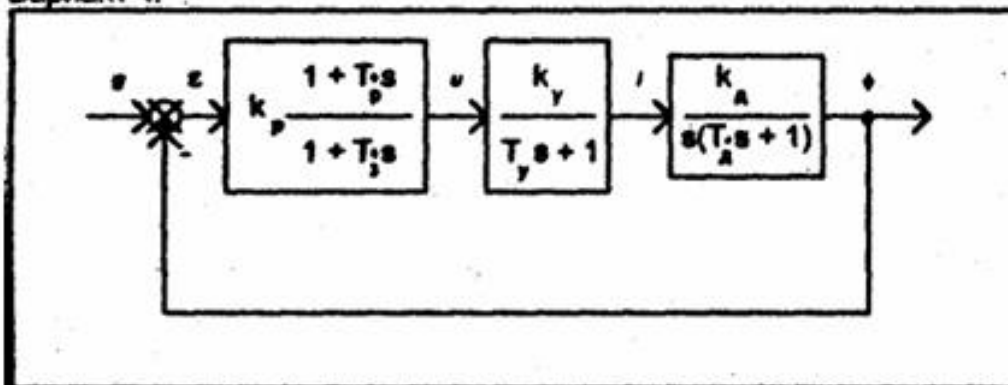


Рис.5. Структурная схема замкнутой САУ для варианта №4.

Постоянные параметры структурной схемы:

$k_y = 1; T_y = 0.0; T_A = 0.5; T_i = 0.03;$

№ по списку	4	9	14	19	24
k_A	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0

Варьируемые параметры: $T_p = 0.05, 0.3, 0.9$, $k_p = 2, 5, 17$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Анализ устойчивости линейной САУ частотными методами

Цель работы: освоение частотных методов анализа устойчивости линейных систем автоматического управления.

Теоретические сведения

Частотные критерии устойчивости позволяют судить об устойчивости систем по виду их частотных характеристик. К этой группе относятся критерии Михайлова и Найквиста.

1. Частотный критерий устойчивости Михайлова

Кривая, образованная концом вектора *характеристического полинома замкнутой системы* $D(j\omega)$ при изменении частоты ω от 0 до $+\infty$ называется *кривой Михайлова* или *годографом Михайлова*.

По критерию Михайлова для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно чтобы годограф Михайлова начинался с положительной части вещественной оси $D(0) = a_n$, вращался против часовой стрелки и последовательно проходил n -квадрантов не обращаясь в ноль, а в n -ом квадранте уходил в бесконечность (рис.1, а).

Если это правило нарушается (например, число проходимых кривой квадрантов не равно n , или нарушается последовательность прохождения квадрантов (рис.1, б)), то такая САУ неустойчива.

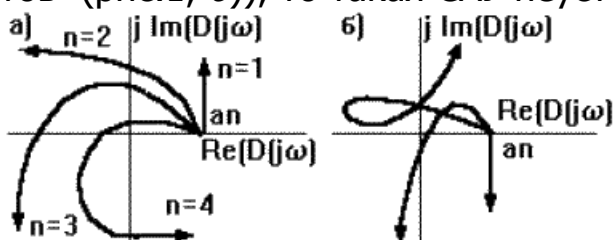


Рис.1 – Годограф Михайлова

Достоинства. Этот критерий удобен своей наглядностью. Так, если кривая проходит вблизи начала координат, то САУ находится вблизи границы устойчивости и наоборот. Этим критерием удобно пользоваться, если известно уравнение замкнутой САУ.

Применяют также *модифицированный критерий Михайлова*, который служит для нормирования амплитуды годографа Михайлова и определяется следующей функцией:

$$D_{\text{mod}}(j\omega) = \frac{D(j\omega)}{\lambda + D(j\omega)},$$

где $\lambda > 0$ (обычно принимают $\lambda = 1$).

2. Частотный критерий устойчивости Найквиста

Наиболее удобным является критерий устойчивости Найквиста. С его помощью можно оценить устойчивость замкнутой системы по виду АФЧХ разомкнутой системы.

Для САУ, содержащих в разомкнутом варианте только устойчивые звенья (разомкнутая система устойчива), принята *упрощенная формулировка признака устойчивости*: замкнутая САУ будет устойчива, если АФЧХ разомкнутой системы не охватывает точку с координатами $(-1; j0)$.

АФЧХ: по оси абсцисс $Re(W_{\text{раз}}(j\omega))$, по оси ординат $Im(W_{\text{раз}}(j\omega))$, $W_{\text{раз}}$ – передаточная функция разомкнутой системы.

На рис.2 показаны АФЧХ устойчивых разомкнутых систем четвертого порядка. Первая система (а) будет устойчива в замкнутом состоянии, а вторая (б) – нет.

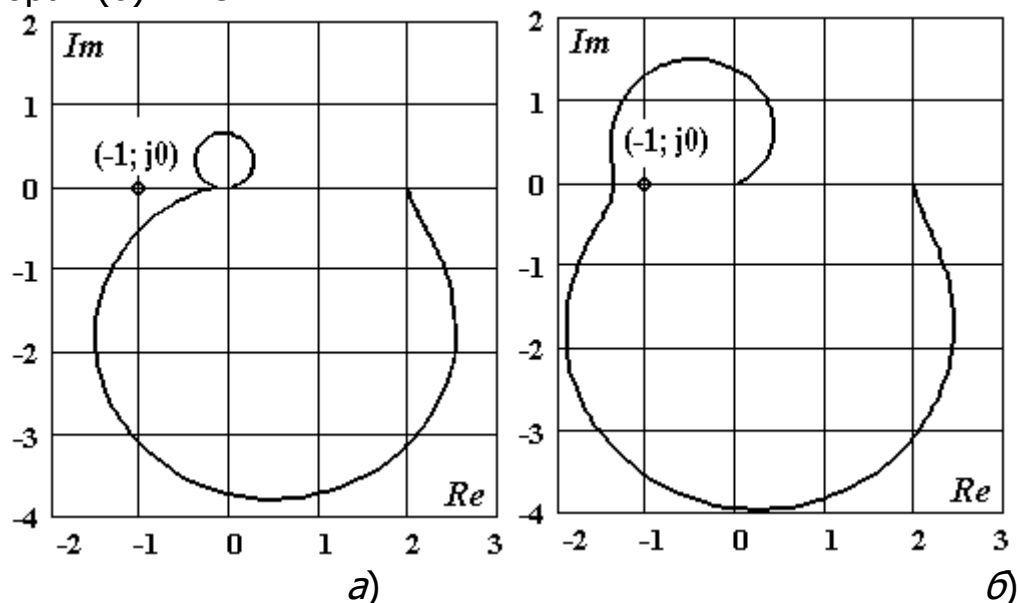


Рис.2 – АФЧХ разомкнутых САУ

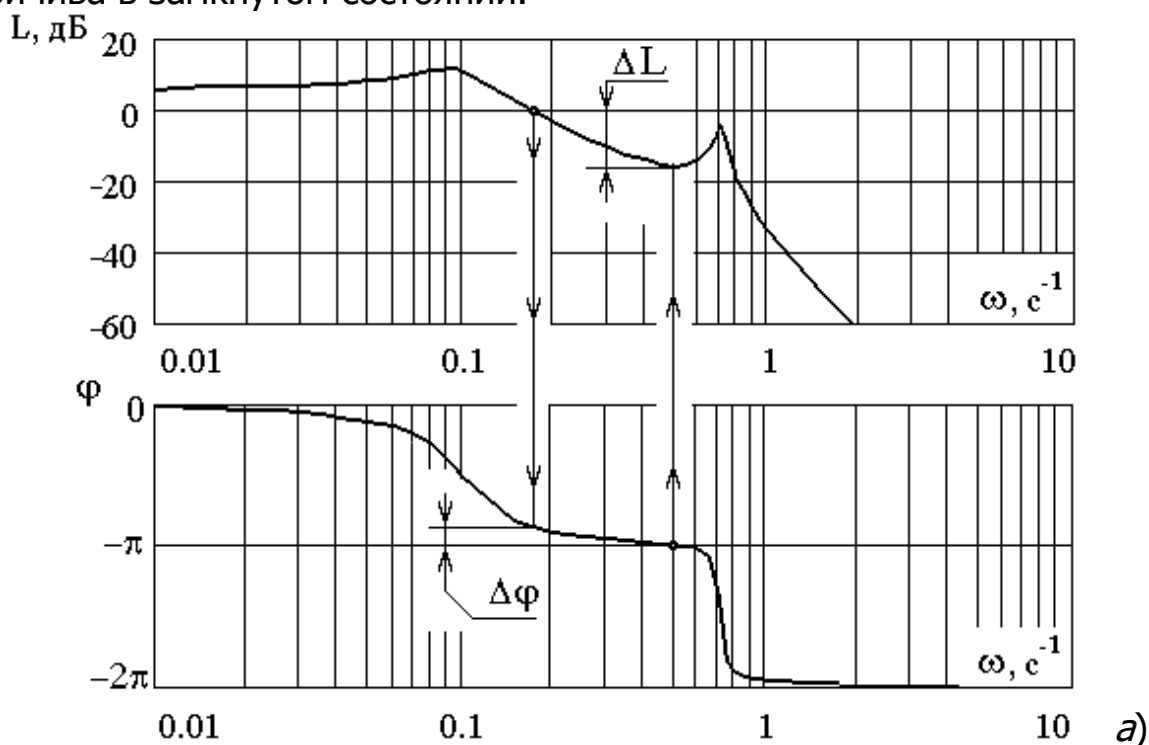
Формулировка критерия Найквиста для общего случая: когда характеристический полином разомкнутой системы n -го порядка содержит s устойчивых, g неустойчивых и q нулевых корней ($s + g + q = n$): если разомкнутая САУ неустойчива и имеет g правых корней (неустойчивых), то для того, чтобы замкнутая САУ была устойчива необходимо и достаточно, чтобы годограф при изменении частоты ω от 0 до $+\infty$

охватывал начало координат в положительном направлении $g/2$ раз, то есть АФЧХ разомкнутой САУ должна охватывать $g/2$ раз точку $(-1, j0)$.

3. Критерий устойчивости по логарифмическим частотным характеристикам

На практике чаще используется критерий Найквиста для логарифмических частотных характеристик разомкнутых САУ: система, устойчивая в разомкнутом состоянии, будет устойчивой в замкнутом состоянии, если ЛАЧХ пересекает ось абсцисс (в последний раз) раньше, чем ЛФЧХ пересечет (в последний раз) ординату $-\pi$.

На рис.3 (а, б) показаны ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутых систем, годографы которых приведены на рис. 2 (а, б). ЛАЧХ и ЛФЧХ, приведенные на рис.3, а соответствует устойчивой разомкнутой системе, которая также устойчива и в замкнутом состоянии. ЛАЧХ и ЛФЧХ, приведенные на рис.1, б соответствуют устойчивой разомкнутой системе, которая неустойчива в замкнутом состоянии.



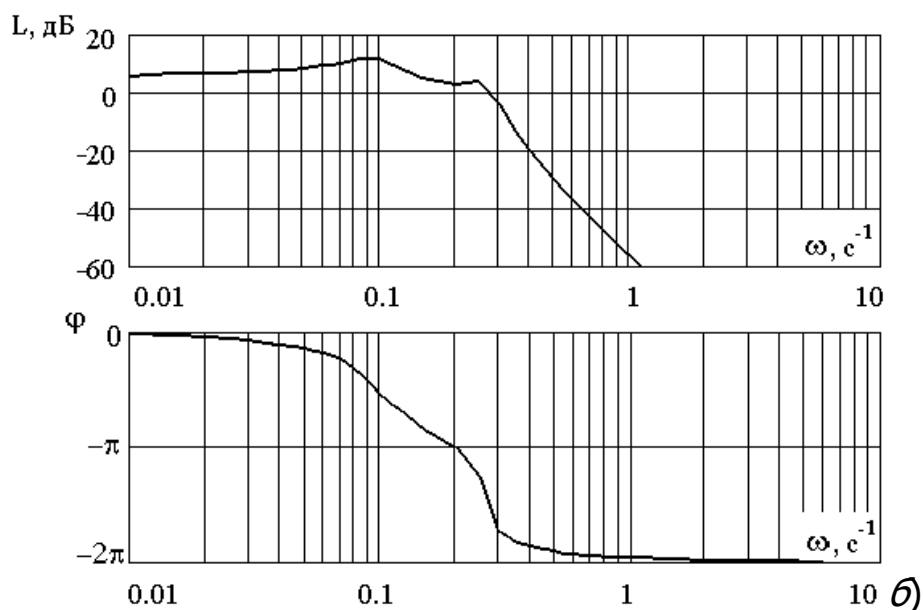


Рис.3 – ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутых САУ

4. Запасы устойчивости

Другим преимуществом критерия устойчивости Найквиста перед остальными критериями является возможность оценки не только факта устойчивости системы, но и "степени устойчивости", то есть условной оценки "удаленности" системы от опасного состояния при изменении ее параметров.

При оценке САУ по критерию Найквиста можно ввести и оценить такие показатели степени устойчивости систем, как *запасы по модулю и по фазе*. Порядок определения запасов устойчивости по логарифмическим характеристикам и необходимые для этого построения показаны на рис.3, а.

Запас устойчивости по модулю ΔL показывает во сколько раз или на сколько децибел можно увеличить коэффициент усиления при неизменной фазе, сохраняя устойчивость системы.

Запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi$ показывает, на какой угол может быть смещена фазовая характеристика при неизменной амплитудной с сохранением устойчивости.

Величины запасов устойчивости САУ косвенно связаны с параметрами ее переходного процесса: чем меньше запас устойчивости по модулю, тем интенсивнее протекают переходные процессы в системе; чем меньше запас устойчивости по фазе, тем сильнее их колебательность.

Требуемые запасы устойчивости

Порядок системы, n	Запас устойчивости по модулю ΔL , дБ	Запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi$, град.
Статическая система		
<3	7...10	35-45
3...6	10–15	45-60
>6	>15	>60
Астатическая система 1-го порядка		
<3	10...15	45-60
3...6	15–20	60-90
>6	>20	>90
Астатическая система 2-го порядка		
<3	15...20	60-90
3...6	20–25	90-120
>6	>25	>120

Задание.

1. Записать передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы.
2. Исследовать устойчивость замкнутой линейной САУ с помощью частотного критерия Михайлова при различных параметрах системы.
3. Исследовать устойчивость замкнутой САУ с помощью частотного критерия Найквиста при различных параметрах системы.
4. Провести анализ устойчивости замкнутой системы по логарифмическим частотным характеристикам разомкнутой системы и оценить влияние параметров на запасы устойчивости по модулю и по фазе.
5. Сформулировать выводы о влиянии параметров звеньев системы на ее устойчивость.

Отчет о работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Структурную схему, передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы.
3. Описание частотного критерия Михайлова, уравнение годографа Михайлова, таблицы и графики кривой Михайлова для различных значений T_p и K_p . Выводы об устойчивости системы и влиянии параметров на устойчивость.

4. Описание частотного критерия Найквиста, уравнение частотной функции разомкнутой САУ. Таблицы и графики частотной характеристики Найквиста при различных T_p и k_p . Выводы об устойчивости системы и влиянии параметров на устойчивость.
5. Частотную передаточную функцию разомкнутой системы и выражения для ЛАЧХ и ЛФЧХ. Логарифмические частотные характеристики и таблицы значений исследуемой системы с выводами об устойчивости и запасах устойчивости по амплитуде и фазе.

Варианты.

Структурные схемы САУ и параметры звеньев выбрать по вариантам лабораторной работы № 3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

Оценка качества автоматической системы управления

Цель работы: освоение методов оценки качества автоматических систем управления по прямым и косвенным показателям.

Теоретические сведения

Устойчивость САУ является необходимым, но не достаточным условием для ее эффективного функционирования. Важное значение имеет *качество управления*, то есть степень удовлетворения совокупности требований к форме кривой переходного процесса, которая определяет пригодность системы для конкретных условий работы.

Для сравнения качества различных САУ исследуется их реакция на типовые воздействия. Обычно это ступенчатая функция, как один из наиболее неблагоприятных видов возмущений.

Все современные методы анализа качества управления можно разделить на *прямые методы* анализа по кривой переходного процесса или по частотным характеристикам, и *косвенные методы*, позволяющие, не решая дифференциального уравнения, определить некоторые показатели качества процесса управления; к ним, в частности, относятся *корневые, интегральные и частотные* методы.

1. Прямые показатели качества САУ

1.1 Оценка качества системы по переходному процессу

Прямые показатели качества можно определить непосредственно по кривой переходной характеристики $h(t)$ (рис. 1) при воздействии на вход единичной ступенчатой функции:

$$1(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases}$$

и нулевых начальных условиях.

1. *Время регулирования t_p* – это время когда переходной процесс входит в $M\%$ трубку регулирования и в дальнейшем из нее не выходит. Время регулирования оценивает быстродействие системы. Обычно принимают $\Delta = 0.05 h_{уст}$, 5%.

$$|h - h_{уст}| \leq \Delta,$$

где Δ - трубка регулирования, которая задается в процентах от установившегося значения выходной величины $h_{уст}$.

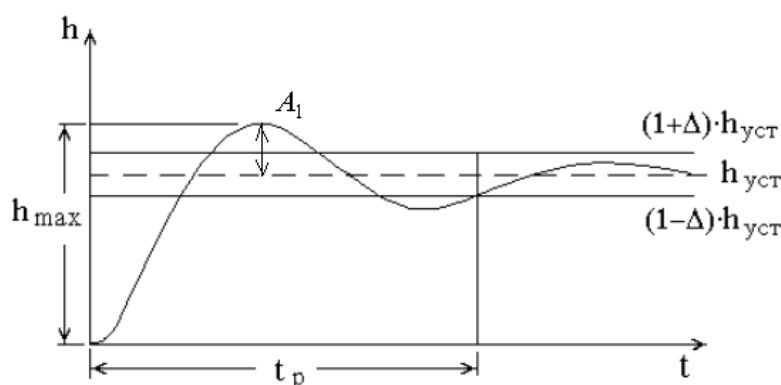


Рисунок 1 – Нахождение прямых показателей качества

2. *Перерегулирование σ* - максимальное отклонение переходной характеристики от установившегося значения выходной величины, выраженное в относительных единицах или процентах:

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\% ,$$

где h_{max} - значение максимума переходной характеристики.

При больших перерегулированиях могут возникнуть значительные динамические усилия в механической части системы, электрические перенапряжения и т.п. Допустимое значение σ определяется из опыта эксплуатации, обычно оно составляет 0.1...0.3, иногда допускается до 0.7. Величина перерегулирования отражает динамическую точность системы, т.е. точность системы в процессе ее перехода из одного состояния в другое.

3. Для колебательных процессов существенным является показатель ψ - *интенсивность затухания*.

$$\psi = \frac{A_1 - A_2}{A_1},$$

где A_1, A_2 – амплитуды первого и второго всплесков переходного процесса относительно установившегося значения.

1.2 Оценка качества системы по частотным характеристикам

1. *Запасы устойчивости по модулю и по фазе* определяются по ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы (рис.2).

Запас устойчивости по модулю ΔL показывает во сколько раз или на сколько децибел можно увеличить коэффициент усиления при неизменной фазе, сохраняя устойчивость системы.

Запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi$ показывает, на какой угол может быть смещена фазовая характеристика при неизменной амплитудной с сохранением устойчивости.

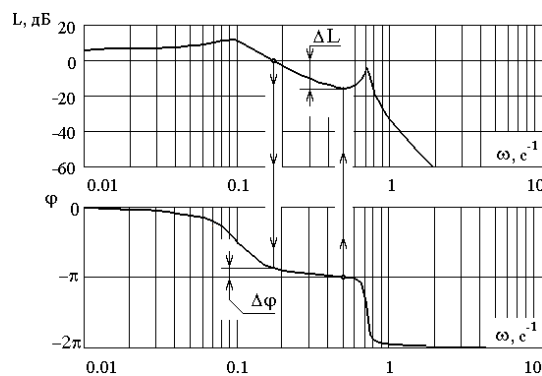


Рисунок 2 – ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутых САУ

2. *Запасы устойчивости по модулю и по фазе* можно определить по АФЧХ разомкнутой системы.

АФЧХ: по оси абсцисс $Re(W_{раз}(j\omega))$, по оси ординат $Im(W_{раз}(j\omega))$, $W_{раз}$ – передаточная функция разомкнутой системы.

Согласно критерия Найквиста, чем дальше АФЧХ от критической точки $(-1, j0)$, тем больше запас устойчивости.

Запас устойчивости по модулю характеризует удаление годографа АФЧХ разомкнутой САУ от критической точки в направлении вещественной оси и определяется расстоянием ΔL от критической точки до точки пересечения годографом оси абсцисс (рис.3).

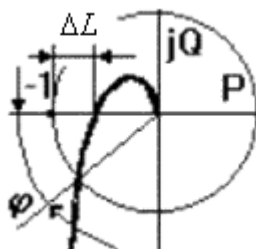
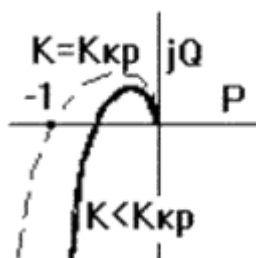


Рисунок 3 – Определение запасов устойчивости по АФЧХ разомкнутой системы

Запас устойчивости по фазе характеризует удаление годографа от критической точки по дуге окружности единичного радиуса и определяется углом $\Delta\varphi$ между отрицательным направлением вещественной полуоси и лучом, проведенным из начала координат в точку пересечения годографа с единичной окружностью.

С ростом коэффициента передачи разомкнутой САУ растет модуль каждой точки АФЧХ и при некотором значении $k = k_{кр}$ АФЧХ пройдет через критическую точку и попадет на границу устойчивости, а при $k > k_{кр}$ замкнутая САУ станет неустойчива.



3. *Частота среза ω_{cp}* - частота, при которой ЛАЧХ разомкнутой системы пересекает ось абсцисс (АЧХ замкнутой САУ принимает значение, равное единице). По ней можно судить о длительности переходного процесса $t_p \leq (8...12) / \omega_{cp}$.

1.3 Основные соотношения между вещественной частотной характеристикой замкнутой системы (ВЧХ) и переходным процессом

1. Начальное значение ВЧХ $P(0)$ равно установившемуся значению переходной характеристики $h_{уст} = \lim_{t \rightarrow 0} P(\omega) = P(0)$.

2. САУ с вогнутой ВЧХ (рис.4, а кривая 1) не имеет перерегулирования, то есть ей соответствует монотонная переходная характеристика (рис.4, б кривая 1).

3. САУ с трапециидальной ВЧХ (рис.4, а кривая 2, такую ВЧХ можно аппроксимировать трапецией) имеет *апериодическую* переходную характеристику (рис.4, б кривая 2), причем величина перерегулирования σ не превышает 18%.

4. Кривые 3 и 4 на рис.4, а соответствуют колебательной переходной характеристике (рис.3, б кривая 3). Величина перерегулирования σ тем больше, чем больше отношение $P(\omega)_{max}/P(0)$. Если это отношение стремится к бесконечности, то есть имеет место разрыв ВЧХ, то переходная характеристика приобретает вид незатухающих колебаний и САУ переходит на границу устойчивости. Величину перерегулирования можно приблизительно вычислить исходя из соотношения:

$$\sigma < \frac{1.18 \cdot P_{max} - P(0)}{P(0)}$$

Наличие отрицательного экстремума у ВЧХ (кривая 4) свидетельствует о повышенной колебательности системы.

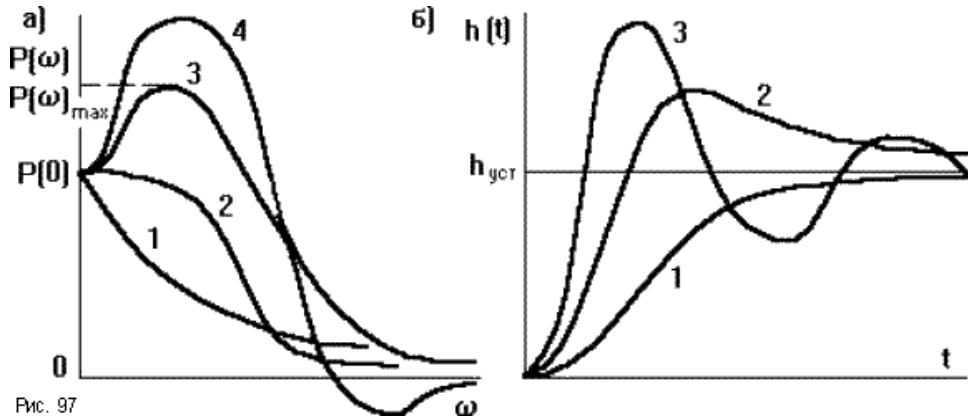


Рис.4 – ВЧХ и переходные процессы

5. Время переходного процесса t_p можно оценить приблизительно по виду ВЧХ без построения кривой $h(t)$. Оно определяется полосой частот ω_p , при которых $P(\omega) > 0.2P(0)$ (рис.5). ω_p называют интервалом положительности $P(\omega)$. При этом всегда $t_p > \pi/\omega_p$.

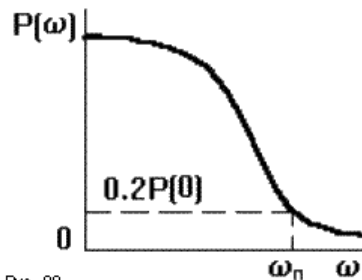


Рис.5 – Вещественная частотная характеристика

2. Косвенные показатели качества САУ Корневой метод оценки качества управления

Это косвенный метод, основанный на определении границ области расположения корней характеристического уравнения на комплексной плоскости, что дает возможность приблизительно оценить качество управления.

Передаточная функция замкнутой системы может быть записана в виде:

$$W_{зам}(s) = \frac{M(s)}{D(s)} = \frac{b_m(s - v_1)(s - v_2)...(s - v_m)}{a_n(s - \lambda_1)(s - \lambda_2)...(s - \lambda_n)}$$

где v_1, v_2, \dots, v_m – нули передаточной функции или корни многочлена $M(s)$; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ – полюса передаточной функции или корни многочлена $D(s)$.

Многочлен $D(s)$ определяет характеристическое уравнение, поэтому полюса передаточной функции являются корнями характеристического уравнения.

Пусть $G(s)$ – входной сигнал, тогда изображение регулируемой величины

$$X(s) = G(s) \frac{b_m(s - v_1)(s - v_2)...(s - v_m)}{a_n(s - \lambda_1)(s - \lambda_2)...(s - \lambda_n)}$$

показывает, что переходной процесс зависит не только от полюсов, но и от нулей передаточной функции (переходной процесс определяется как левой, так и правой частями дифференциального уравнения).

В частом случае, когда передаточная функция не имеет нулей и правая часть дифференциального уравнения соответствует умножению входного воздействия на постоянный коэффициент, переходной процесс зависит только от распределения полюсов передаточной функции и его изображение:

$$X(s) = G(s) \frac{b_0}{a_n(s - \lambda_1)(s - \lambda_2)...(s - \lambda_n)}$$

Полюсы и нули передаточной функции могут быть представлены геометрически на комплексной плоскости соответствующими точками. *Свойства переходного процесса зависят от того, как располагаются полюсы на комплексной плоскости, какую часть плоскости они занимают.*

Для ограничения области распределения полюсов обычно используют понятия степени устойчивости η , колебательности μ и абсолютного значения ξ вещественной части наиболее удаленного от мнимой оси полюса (рис.6).

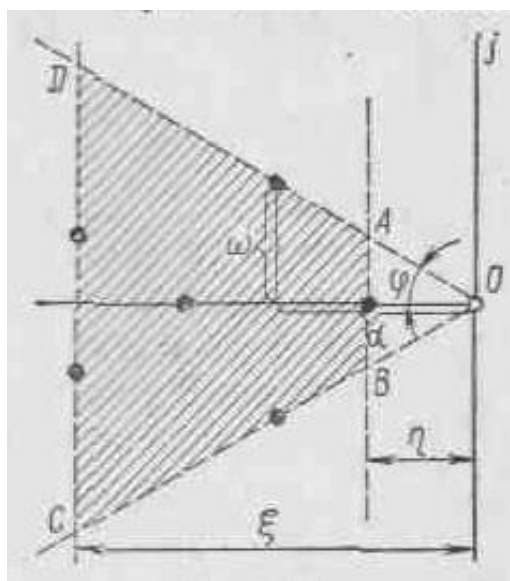


Рис.6 – Расположение полюсов передаточной функции на комплексной плоскости

Степенью устойчивости η называется абсолютная величина вещественной части корня, расположенного ближе всех остальных к мнимой оси. η показывает быстродействие системы и степень ее устойчивости. Время регулирования переходного процесса равно:

$$t_p = \frac{(3...5)}{\eta}.$$

Отношение мнимой части β к действительной α в той паре комплексно сопряженных корней ($\lambda = \alpha \pm j\beta$), которые дают наибольший угол 2φ , называется *колебательностью* μ :

$$\mu = \beta/\alpha = \operatorname{tg}(\varphi).$$

Три указанных характеристики распределения полюсов передаточной функции образуют трапецию $ABCD$, внутри которой и на ее сторонах располагаются корни характеристического уравнения. Если колебательность μ задана, то область расположения корней на комплексной плоскости должна ограничиваться двумя лучами – OC и OD проведенными из начала координат под углом:

$$\varphi = \operatorname{arctg}(\mu).$$

Еще одним показателем качества системы является *декремент затухания* равный отношению действительной части α корня к мнимой β :

$$d = \alpha/\beta,$$

если $\beta \rightarrow 0$, то $d \rightarrow \infty$ – колебания переходного процесса отсутствуют; если $\alpha \rightarrow 0$, то $d \rightarrow 0$ – колебания переходного процесса незатухающие.

Интенсивность затухания ψ определяется по формуле:

$$\psi = 1 - e^{-2\pi d} = 1 - e^{-\mu}.$$

3. Написание *m* - файлов в пакете *MatLab*

Задание параметров системы осуществляется следующим образом (строка после знака «%» является комментарием):

```
%Задание параметров системы
k1=1;
T1=0.005;
kd=5;
Td=0.05;
kt=0.2;
%Задание варьируемых параметров системы
kp=20; % 2, 5, 20
Tp=0.05; % 0.05, 0.1, 0.5
```

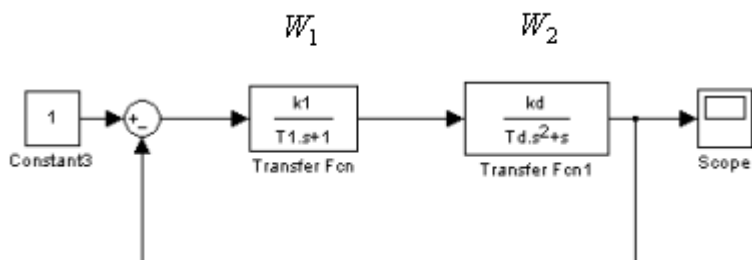
Задание передаточной функции в *m* – файле осуществляется следующим образом:

```
коэффициенты числителя
Num=[5.1124];
коэффициенты знаменателя (начинают со старшей степени)
Den=[0.0025 0.125 1.2368 5.1124];
передаточная функция
W=tf([Num],[Den]); (или W=tf([5.1124],[ 0.0025 0.125 1.2368
5.1124]);)
```

Результатом будет ПФ вида:
 5.112

$$0.0025 s^3 + 0.125 s^2 + 1.237 s + 5.112$$

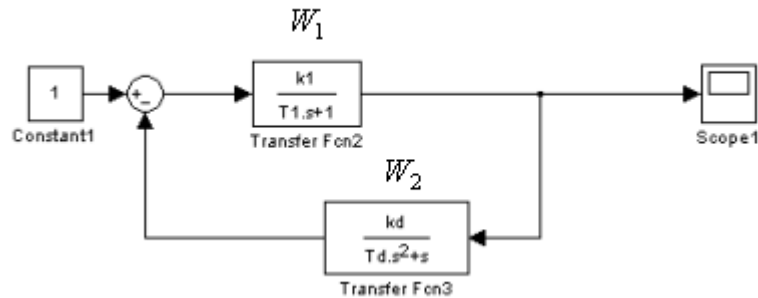
Для нахождения передаточной функции замкнутой системы используется замыкание обратной отрицательной связью:



$$W_{раз} = W_1 \cdot W_2,$$

$$W_{zam} = \frac{W_1 \cdot W_2}{1 + W_1 \cdot W_2},$$

Wzam=feedback(W1*W2,1);



$$W_{raz} = W_1 \cdot W_2$$

$$W_{zam} = \frac{W_1}{1 + W_1 \cdot W_2}$$

Wzam=feedback(W1,W2);

Переходной процесс системы в пакете *MatLab* строится с использованием функции:

step(Wzam)

Wzam – ПФ замкнутой системы.

Логарифмические частотные характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ):

bode(Wraz)

Wraz – ПФ разомкнутой системы.

Для вывода нескольких графиков используется функция: **figure;**, которая ставится перед каждым графиком.

Функция **grid on;** рисует сетку на графике.

Нахождение частотной передаточной функции замкнутой системы:

```
i=sqrt(-1); %мнимая единица
j=0;
for w=0:0.1:10 % задание диапазона изменения частоты
    j=j+1;
    ww(j)=w;
    Wch(j)=...; % записывается ПФ замкнутой системы при за-
мене s= ww(j)
end;
```

Построение вещественной частотной характеристики ВЧХ осуществляется с помощью функции:

plot(ww, real(Wch))

Вычисление *полюсов передаточной функции* (корней характеристического уравнения):

$r = \text{pole}(W_{\text{зам}})$;

График распределения корней на комплексной плоскости (корневой годограф):

$\text{plot}(\text{real}(r), \text{imag}(r), 'o')$

4. Построение модели системы в библиотеке *Simulink* пакета *MatLab*

1. Для создания *постоянного воздействия* из библиотеки *Sources* (источники сигналов и воздействий) выбирается блок *Constant*, в котором задается необходимое значение константы.

2. Из библиотеки математических блоков *Math* выбирается блок масштабирования *Gain* (умножение на заданную константу) и блок суммирования *Sum*.

3. Из библиотеки *Continuous* выбирается блок интегрирования данных *Integrator*, блок дифференцирования данных *Derivative* и блок передаточной функции *Transfer Fcn*.

4. Из библиотеки *Sinks* выбирается блок *Scope* – осциллограф для наблюдения временных и других зависимостей.

Задание.

1. Построить указанную в индивидуальном задании систему в пакете *Simulink* и получить график переходного процесса системы. Для этого предварительно создать *m* – файл, содержащий числовые значения параметров системы.
2. В *m* – файле записать передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы.
3. Оценить качество системы управления по прямым показателям: по характеру переходного процесса и по частотным характеристикам (ЛАЧХ, ЛФЧХ, АФЧХ, ВЧХ) при различных значениях варьируемых параметров системы.
4. Оценить качество системы управления по косвенным показателям, используя корневой метод, при различных значениях варьируемых параметров системы.
5. Сформулировать выводы о влиянии параметров звеньев системы на ее качество.

Отчет о работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.

2. Структурную схему, передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы.
3. Описание прямых показателей качества системы управления (по переходному процессу, по частотным характеристикам). Результаты оценки качества заданной системы управления при различных параметрах.
4. Описание косвенных показателей качества системы управления (корневой метод). Результаты оценки качества заданной системы управления при различных параметрах.
5. Выводы о влиянии параметров системы на ее качество.

Варианты.

Структурные схемы САУ и параметры звеньев выбрать по вариантам лабораторной работы № 3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

Исследование характеристик ПИД-регуляторов

Цель работы: исследовать влияние параметров ПИД-регулятора на устойчивость и качество системы.

Теоретические сведения

1. Критерий устойчивости Найквиста по логарифмическим характеристикам

Критерий Найквиста для логарифмических частотных характеристик разомкнутых САУ: система, устойчивая в разомкнутом состоянии, будет устойчивой в замкнутом состоянии, если ЛАЧХ пересекает ось абсцисс (в последний раз) раньше, чем ЛФЧХ пересечет (в последний раз) ординату $-\pi$.

ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутых систем, приведенные на рис.1 соответствуют устойчивой разомкнутой системе, которая также устойчива и в замкнутом состоянии.

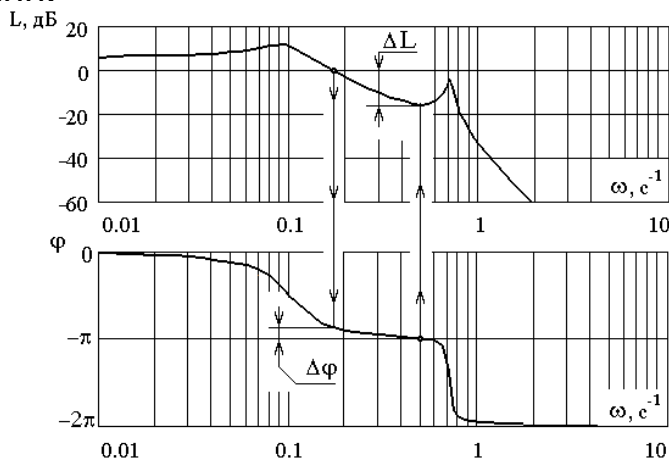


Рисунок 1 – ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутых САУ

Время регулирования можно приближенно оценить по частоте среза:

$$t_{\text{рег}} \leq \frac{8 \dots 12}{\omega_{\text{ср}}}.$$

Логарифмические частотные характеристики разомкнутой системы (ЛАЧХ и ЛФЧХ) в пакете *MatLab* строятся с использованием функции:

bode(Wraz)

Wraz – ПФ разомкнутой системы.

2. Определение запасов устойчивости по логарифмическим характеристикам

Преимуществом критерия устойчивости Найквиста перед остальными критериями является возможность оценки не только факта устойчивости системы, но и "*степени устойчивости*", то есть условной оценки "удаленности" системы от опасного состояния при изменении ее параметров.

При оценке САУ по критерию Найквиста можно ввести и оценить такие показатели степени устойчивости систем, как *запасы по модулю и по фазе*. Порядок определения запасов устойчивости по логарифмическим характеристикам и необходимые для этого построения показаны на рис.1.

Запас устойчивости по модулю ΔL показывает во сколько раз или на сколько децибел можно увеличить коэффициент усиления при неизменной фазе, сохраняя устойчивость системы.

Запас устойчивости по фазе $\Delta \varphi$ показывает, на какой угол может быть смещена фазовая характеристика при неизменной амплитудной с сохранением устойчивости.

Величины запасов устойчивости САУ косвенно связаны с параметрами ее переходного процесса: чем меньше запас устойчивости по модулю, тем интенсивнее протекают переходные процессы в системе; чем меньше запас устойчивости по фазе, тем сильнее их колебательность.

3. Построение корневого годографа замкнутой системы

Вычисление *полюсов передаточной функции (корней характеристического уравнения)* в пакете *MatLab*:

r=pole(Wzam);

Wzam – ПФ замкнутой системы.

График распределения корней на комплексной плоскости (корневой годограф):

plot(real(r), imag(r), 'o')

4. Построение переходного процесса замкнутой системы

Переходной процесс замкнутой системы в пакете *MatLab* строится с использованием функции:

step(Wzam)

Wzam – ПФ замкнутой системы.

Задание.

1. Используя критерий устойчивости Найквиста по логарифмическим характеристикам, провести оценку влияния коэффициентов типовых законов регулирования (П, Д и И-регуляторов) на устойчивость замкнутой системы и на запасы устойчивости.

2. Используя критерий устойчивости Найквиста по логарифмическим характеристикам, оценить влияние параметров ПИД-регулятора на устойчивость замкнутой САУ и на запасы устойчивости. Определить настройку регулятора, удовлетворяющую требуемым запасам устойчивости и максимальную частоту среза. По полученной частоте среза определить приближенное время регулирования системы.

3. Построить переходной процесс замкнутой системы при выбранных в пункте 2 параметрах ПИД-регулятора и по прямым показателям оценить качество САУ.

4. Сделать выводы по лабораторной работе.

Варианты.

Вариант 1

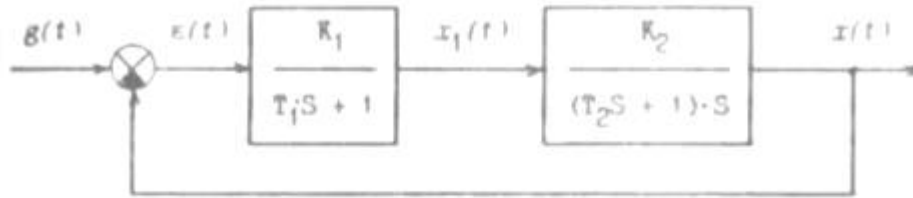


Рис. 1.

$$K_1 = 20; K_2 = 5s^{-1}; T_1 = 0,05c; T_2 = 0,2c.$$

Вариант 2

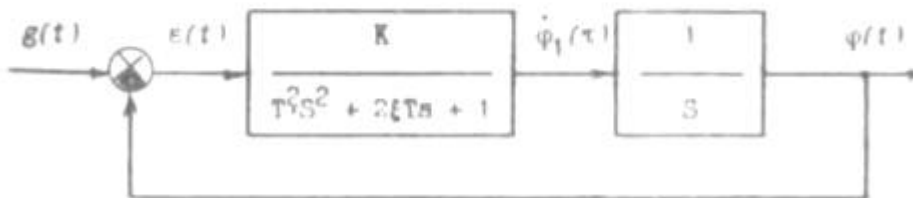


Рис. 2.

$$K = 20c^{-1}; T = 0,1c; \xi = 0,4.$$

Вариант 3

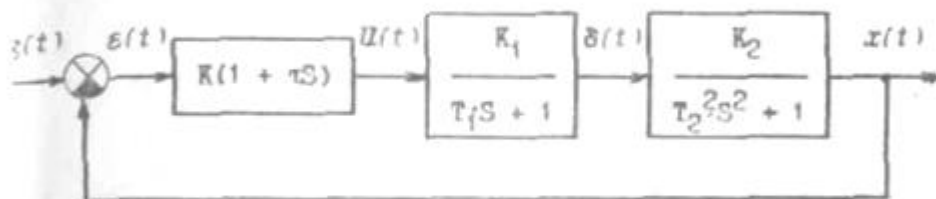


Рис. 3.

$$K = 5; K_1 = 5; K_2 = 2; \tau = 0,2c; T_1 = 0,1c; T_2 = 0,3c.$$

В схему, приведенную в задании типовые регуляторы необходимо включить следующим образом:



Передаточная функция П-регулятора имеет следующий вид:

$$W_{II}(s) = k_n \cdot$$

Передаточная функция Д-регулятора имеет следующий вид:

$$W_{II}(s) = k_\partial \cdot s \cdot$$

Передаточная функция И-регулятора имеет следующий вид:

$$W_{II}(s) = \frac{k_u}{s} \cdot$$

Передаточная функция ПИД-регулятора имеет следующий вид:

$$W_{pez}(s) = k_n + \frac{k_u}{s} + k_\partial \cdot s = \frac{k_\partial \cdot s^2 + k_n s + k_u}{s},$$

где k_n , k_u , k_∂ – коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющей ПИД – закона соответственно.

Требуемые запасы устойчивости

Порядок системы, n	Запас устойчивости по модулю ΔL , дБ	Запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi$, град.
Статическая система		
<3	7...10	35-45
3...6	10–15	45-60
>6	>15	>60
Астатическая система 1-го порядка		
<3	10...15	45-60
3...6	15–20	60-90
>6	>20	>90
Астатическая система 2-го порядка		
<3	15...20	60-90
3...6	20–25	90-120
>6	>25	>120

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

Исследование устойчивости и качества импульсных САУ в Matlab

Цель работы: сравнение временных и частотных характеристик непрерывной и импульсной систем автоматического управления на примере системы управления вращательным звеном робота, анализ влияния периода квантования импульсной системы на ее устойчивость и характер переходного процесса.

Теоретические сведения

1. Классификация дискретных систем

Системы, в которых передача, обработка и преобразование информации осуществляются только в определенные моменты времени (дискретно) и действуют сигналы, являющиеся последовательностью импульсов называются *дискретными*.

Благодаря наличию импульсных сигналов информация в системе передается отдельными частями, квантами. Процессы, описывающие преобразование этой информации, называются дискретными, а преобразование непрерывных процессов в дискретные называется *квантованием*. Существует три вида квантования: по времени, по уровню и по времени и уровню одновременно.

При квантовании по времени исходная непрерывная функция $x(t)$ преобразуется в последовательность дискретных значений $x(t_i)$, где t_i — это дискретные моменты времени на временной оси. Расстояние между значениями t_i может быть произвольным, однако на практике чаще всего имеет место случай периодического квантования с постоянным периодом повторения T_n , показанный на рис.1., а. При этом $t_i = iT_n$, где число i может принимать все целые значения от $-\infty$ до $+\infty$.

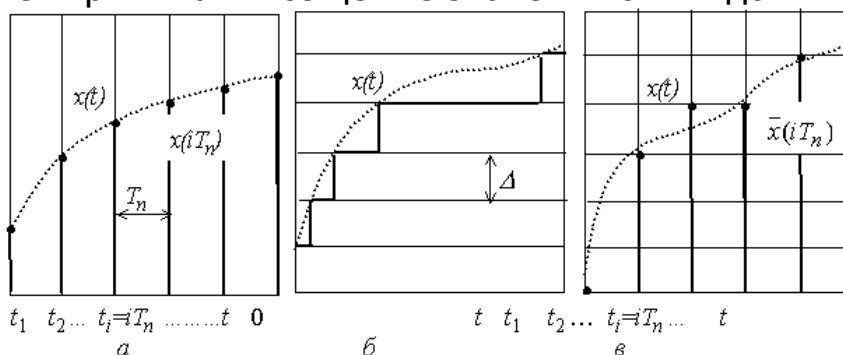


Рис. 1. Квантование сигналов по времени (а); уровню (б); по времени и по уровню (в)

При квантовании по уровню вся область возможных x разбивается на отдельные дискретные уровни, и дискретный процесс может принимать только те значения, которые совпадают с выбранными уровнями. На рис.1., б показано квантование по уровню процесса $x(t)$ в случае постоянного шага квантования Δ .

Комбинированный случай квантования по времени и уровню при постоянном периоде T_n и шаге Δ показан на рис.1., в.

Информация о значениях дискретного процесса передается с помощью импульсных сигналов путем модуляции их параметров: амплитуды, длительности, фазы, частоты. Отсюда различают системы с амплитудной, широтной, фазовой и частотной модуляциями.

Если каждый квант информации дискретного процесса, квантованного только по времени, передается с помощью импульса при определенном виде модуляции его параметров, то дискретные системы называются **импульсными**.

Различают импульсные системы с амплитудной (АИМ), широтной (ШИМ), фазовой (ФИМ), частотной (ЧИМ) видами модуляции. Кроме того, бывают системы с комбинированными видами модуляции. Если в системах с АИМ амплитуда импульсов пропорциональна значениям квантованного процесса, то такие импульсные системы *линейные*. При всех других видах модуляции они относятся к классу *нелинейных систем*.

Если в дискретных САУ преобразуются процессы, квантованные по уровню, то они называются **релейными**. Системы с квантованием процессов по времени и уровню называются **цифровыми**. Релейные и цифровые системы являются нелинейными.

2. Непрерывная система управления звеном робота с вращательным сочленением

Структурная схема системы управления звеном робота с вращательным сочленением представлена на рис.2. Система предназначена для управления угловым положением звена робота по одной координате $\theta(t)$. Звено робота моделируется в виде момента инерции J_3 .

На основании второго закона Ньютона для вращательного движения:

$$J_3 \frac{d^2\theta}{dt^2} = u,$$

где u – вращающий момент, создаваемый приводом.

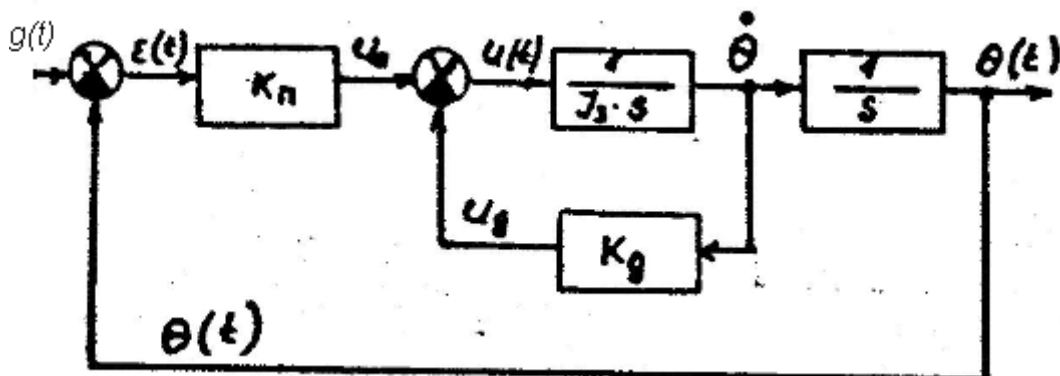


Рисунок 2 – Непрерывная система управления звеном робота с вращательным сочленением

Передаточная функция разомкнутой по главной обратной связи системы имеет вид:

$$W_{раз}(s) = \frac{k_{II}}{s(J_3 s + k_D)}$$

Передаточная функция замкнутой системы:

$$W_{зам}(s) = \frac{k_{II}}{J_3 s^2 + k_D s + k_{II}}$$

Поскольку система имеет второй порядок, то при $J_3, k_D, k_{II} > 0$, непрерывная система будет устойчивой.

3. Импульсная система управления звеном робота с вращательным сочленением

Далее рассматривается импульсная система управления звеном робота, в которой выходные сигналы датчиков положения и скорости обрабатываются дискретным устройством выборки и хранения с частотой квантования T . Структурная схема импульсной системы представлена на рис.3.

Импульсный элемент ИЭ представлен двумя элементами: идеальным импульсным элементом (квантователь), преобразующим непрерывный сигнал в последовательность импульсов (АЦП), и экстраполятором нулевого порядка (ЦАП) с передаточной функцией:

$$W_{\phi}(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s}$$

$$W_{\phi}(z) = Z\left\{\frac{1 - e^{-Ts}}{s}\right\} = Z\{1 - e^{-Ts}\}Z\left\{\frac{1}{s}\right\} = \frac{1 - z^{-1}}{1 - z^{-1}} = 1$$

Таким образом, в терминах z -преобразований при переходе через экстраполятор сигнал не изменяется.

Z -передаточная функция объекта управления:

$$W_{oy}(z) = Z\{W_{\phi}(s)W_o(s)\} = Z\left\{\frac{1 - e^{-Ts}}{s}W_o(s)\right\} = \frac{1 - z^{-1}}{1}Z\left\{\frac{W_o(s)}{s}\right\} = \frac{z - 1}{z}Z\left\{\frac{W_o(s)}{s}\right\}$$

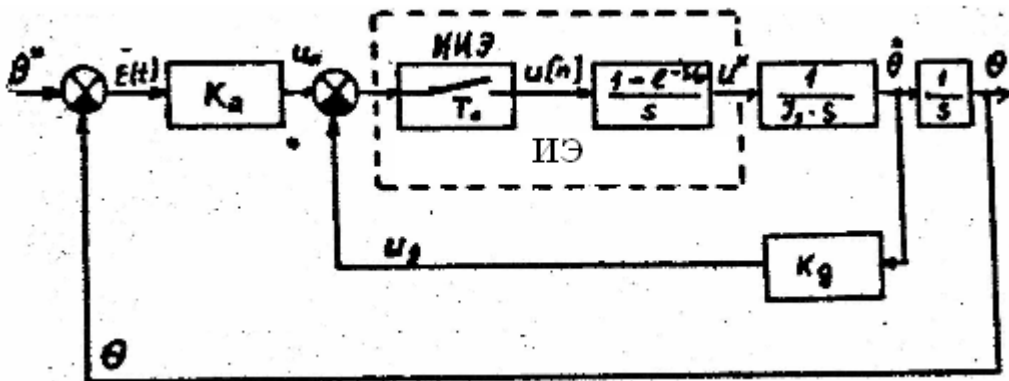


Рисунок 3 – Импульсная система управления звеном робота

с вращательным сочленением

Приведенная структурная схема может быть заменена эквивалентной схемой в терминах Z -преобразований. Для этого перехода необходимо найти обратное преобразование Лапласа от передаточной функции разомкнутой системы, сделать замену $t=nT$, а затем к полученному выражению применить прямое Z -преобразование:

$$W_{raz}(z) = Z \left\{ L^{-1} \left\{ kn \cdot \frac{W_{\phi}(s) \frac{1}{J \cdot s} \cdot \frac{1}{s}}{1 + W_{\phi}(s) \frac{1}{J \cdot s} \cdot kd} \right\}_{t=nT} \right\} = Z \left\{ L^{-1} \left\{ \frac{D(s)}{1 + M(s)} \right\}_{t=nT} \right\}.$$

Для нахождения передаточной функции разомкнутой системы необходимо последовательно преобразовать числитель и знаменатель:

$$D(z) = Z \left\{ L^{-1} \left\{ kn \cdot W_{\phi}(s) \frac{1}{J \cdot s} \cdot \frac{1}{s} \right\}_{t=nT} \right\} = \frac{z-1}{z} Z \left\{ L^{-1} \left\{ kn \cdot \frac{1}{s} \frac{1}{J \cdot s} \cdot \frac{1}{s} \right\}_{t=nT} \right\},$$

$$M(z) = Z \left\{ L^{-1} \left\{ W_{\phi}(s) \frac{1}{J \cdot s} \cdot kd \right\}_{t=nT} \right\} = \frac{z-1}{z} Z \left\{ L^{-1} \left\{ \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{J \cdot s} \cdot kd \right\}_{t=nT} \right\}.$$

Тогда передаточной функции разомкнутой дискретной системы будет иметь вид:

$$W_{raz}(z) = \frac{D(z)}{1 + M(z)}.$$

Z -передаточная функция замкнутой системы находится по аналогии с непрерывными системами: $W_{zam}(z) = \frac{W_{raz}(z)}{1 + W_{raz}(z)}$.

Учитывая, что Z -преобразование является взаимно-неоднозначным, то переход от $W(z)$ к $W(p)$ – это некорректная постановка задачи. Это связано с процессом квантования в отдельные моменты времени, то есть $W(z)$ содержит входной сигнал в отдельные моменты времени (в точках дискретизации).

Период дискретизации выбирается в соответствии с желаемым временем регулирования по формуле: $T = \frac{tp}{10...15}$.

4. Оценка устойчивости непрерывных систем

Корневой критерий оценки устойчивости непрерывных систем

Корневым критерием называется критерий оценки устойчивости системы по корням характеристического полинома.

Корневой критерий устойчивости состоит в том, чтобы все полюсы характеристического полинома системы:

$$D(p) = a_0 p^n + \dots + a_{n-1} p + a_n,$$

т.е. корни знаменателя ее передаточной функции λ_j , имели отрицательную вещественную часть (лежали в левой части комплексной плоскости):

$$\operatorname{Re}(\lambda_j) < 0, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Разомкнутые системы управления, собранные из устойчивых элементов, всегда будут устойчивыми. Однако при замыкании систем обратными связями необходим дополнительный анализ их устойчивости, который проводится с помощью различных критериев.

Для нахождения корней характеристического полинома $D(p)$ используется функция *MathCAD polyroots(v)*.

Вектор v будет иметь вид:

$$v = \begin{pmatrix} a_n \\ a_{n-1} \\ \dots \\ a_0 \end{pmatrix}.$$

Например,

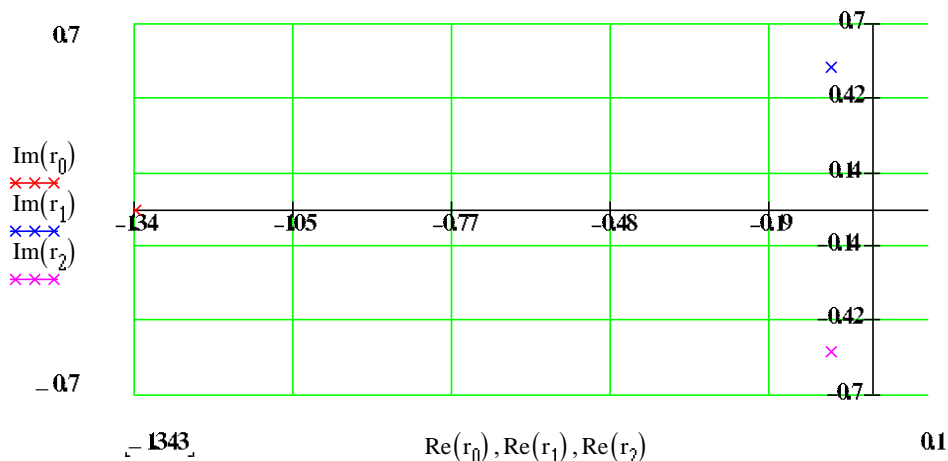
$$D(s) := T_1 \cdot T_2 \cdot s^3 + (T_1 + T_2) \cdot s^2 + (1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_p \cdot T_p) \cdot s + k_1 \cdot k_2 \cdot k_p$$

$$v(T_p, k_p) := \begin{pmatrix} k_1 \cdot k_2 \cdot k_p \\ 1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_p \cdot T_p \\ T_1 + T_2 \\ T_1 \cdot T_2 \end{pmatrix}$$

$$r := \text{polyroot}(v(T_p, k_p))$$

$$r = \begin{pmatrix} -1343 \\ -0.078 + 0.54i \\ -0.078 - 0.54i \end{pmatrix}$$

Вектор r содержит корни данного характеристического уравнения. Расположение корней характеристического уравнения замкнутой системы на комплексной плоскости:



Частотный критерий устойчивости Найквиста непрерывных систем

Наиболее удобным является критерий устойчивости Найквиста. С его помощью можно оценить устойчивость замкнутой системы по виду АФЧХ разомкнутой системы.

Для САУ, содержащих в разомкнутом варианте только устойчивые звенья (разомкнутая система устойчива), принята *упрощенная формулировка признака устойчивости*: замкнутая САУ будет устойчива, если АФЧХ разомкнутой системы не охватывает точку с координатами $(-1; j0)$.

АФЧХ: по оси абсцисс $Re(W_{раз}(j\omega))$, по оси ординат $Im(W_{раз}(j\omega))$, $W_{раз}$ – передаточная функция разомкнутой системы.

На рис.4 показаны АФЧХ устойчивых разомкнутых систем четвертого порядка. Первая система (а) будет устойчива в замкнутом состоянии, а вторая (б) – нет.

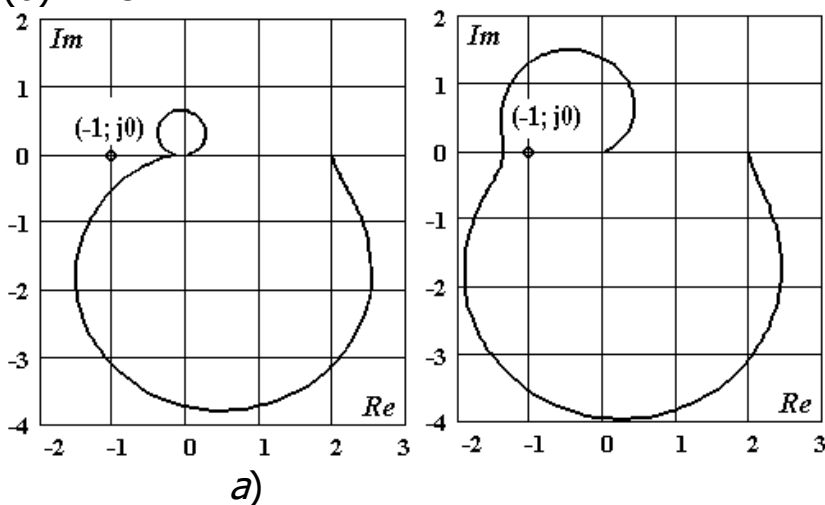


Рисунок 4 – АФЧХ разомкнутых САУ

В некоторых случаях используют *вспомогательную функцию - годограф*, представляющую собой АФЧХ разомкнутой САУ, сдвинутую на единицу вправо:

$$F(j\omega) = 1 + W_p(j\omega).$$

Тогда критерий устойчивости замкнутой системы при устойчивой разомкнутой будет формулироваться следующим образом: замкнутая САУ будет устойчива, если годограф не охватывает точку начала координат.

Формулировка критерия Найквиста для общего случая: когда характеристический полином разомкнутой системы n -го порядка содержит s устойчивых, g неустойчивых и q нулевых корней ($s + g + q = n$): если разомкнутая САУ неустойчива и имеет g правых корней (неустойчивых), то для того, чтобы замкнутая САУ была устойчива необходимо и достаточно, чтобы годограф при изменении частоты ω от 0 до $+\infty$ охватывал начало координат в положительном направлении $g/2$ раз, то есть АФЧХ разомкнутой САУ должна охватывать $g/2$ раз точку $(-1, j0)$.

5. Оценка устойчивости дискретных систем

Корневой критерий оценки устойчивости дискретных систем

Для устойчивости дискретной замкнутой системы необходимо чтобы корни характеристического уравнения по модулю были < 1 (внутри окружности единичного радиуса – z -плоскость).

При небольших периодах дискретизации устойчивые корни на z -плоскости расположены вблизи единичной окружности, поэтому при вычислении этих корней с использованием ЭВМ погрешности могут приводить к неверной оценке свойства устойчивости.

Трудность оценки расположения корней на z -плоскости преодолевается заменой переменных z на v по следующей формуле:

$$z = \frac{1+v}{1-v} \Leftrightarrow v = \frac{z-1}{z+1}.$$

Тогда окружность единичного радиуса на z -плоскости отображается в левую полуплоскость v , а внешняя часть окружности – в правую полуплоскость v .

Такое преобразование называется *билинейным преобразованием*.

Частотный критерий устойчивости Найквиста дискретных систем

Годограф АФЧХ разомкнутой дискретной системы строится путем формальной замены $z \rightarrow \exp(j\omega T)$ в передаточной функции $W_{раз}(z)$.

$$\omega_s := \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad j := \sqrt{-1}$$

$$\omega := 0.0001, 0.01 \dots \frac{\omega_s}{2}$$

$$z(\omega) := e^{j \cdot \omega \cdot T}$$

Если разомкнутая система устойчивая, то для устойчивости замкнутой дискретной системы необходимо, чтобы годограф АФЧХ разомкнутой системы при изменении частоты ω от 0 до $\omega_s/2$ не охватывал точку $(-1; j0)$ (частота дискретизации $\omega_s = 2\pi/T$).

Если разомкнутая система неустойчивая, и ее передаточная функция $W_{раз}(z)$ имеет r неустойчивых корней, то замкнутая система будет устойчивой, если годограф разомкнутой системы охватывает точку $(-1; j0)$ в положительном направлении $r/2$ раз.

Построение переходного процесса дискретных систем

Для записи разностного уравнения необходимо представить передаточную функцию замкнутой системы в следующем виде:

$$W(z) = \frac{b_m z^m + \dots + b_1 z^1 + b_0}{a_n z^n + \dots + a_1 z^1 + a_0}$$

Домножим числитель и знаменатель $W(z)$ на z^{-n} . В результате получим:

$$W(z) = \frac{b_m z^{m-n} + \dots + b_1 z^{1-n} + b_0 z^{-n}}{a_n + \dots + a_1 z^{1-n} + a_0 z^{-n}}$$

Разностное уравнение имеет вид:

$$a_n y[k] + \dots + a_1 y[k+1-n] + a_0 y[k-n] = b_m x[k+m-n] + \dots + b_1 x[k+1-n] + b_0 x[k-n]$$

Тогда выходная переменная (переходной процесс):

$$y[k] = \frac{1}{a_n} [\dots - a_1 y[k+1-n] - a_0 y[k-n] + b_m x[k+m-n] + \dots + b_1 x[k+1-n] + b_0 x[k-n]]$$

Задание.

1. Ознакомиться с классификацией дискретных систем автоматического управления.
2. Найти Z -передаточные функции разомкнутой и замкнутой систем.
3. Используя корневой критерий устойчивости оценить устойчивость непрерывной и импульсной систем.
4. Используя критерий устойчивости Найквиста оценить устойчивость непрерывной и импульсной систем.

5. Построить переходные процессы непрерывной и импульсной систем и оценить качество управления по прямым показателям качества (перерегулирование, время регулирования, колебательность).
6. Оценить влияние периода дискретизации T на устойчивость и качество импульсной системы.
7. Сделать выводы по лабораторной работе.

Варианты.

№ варианта	Момент инерции звена робота, J_z , кг·м ²
1	0.05
2	0.06
3	0.07
4	0.08
5	0.09
6	0.1
7	0.11
8	0.12
9	0.13
10	0.14
11	0.15
12	0.16
13	0.17
14	0.18
15	0.19
16	0.2
17	0.21
18	0.22
19	0.23
20	0.24
21	0.25
22	0.26
23	0.27
24	0.28
25	0.29

Примечание. Исследование непрерывной и импульсной систем провести для двух случаев (система устойчива, система неустойчива).

Для этого студентам необходимо выбрать соответствующие параметры k_D , k_{II} .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

Исследование релейно-контактной аппаратуры

Цель работы: - ознакомиться с конструкцией электромагнитных реле постоянного и переменного тока. Определить их напряжение, ток, время срабатывания и отпускания;
- ознакомиться с конструкцией предохранителей, автоматических выключателей и тепловых реле; определить зависимость времени срабатывания предохранителей, автоматических выключателей и тепловых реле от величины тока перегрузки;
- ознакомиться с основным логическими элементами и их электрическими аналогами, собрать схемы исследования.

Назначение и классификация релейно-контактной аппаратуры

Аппаратура предназначена для следующих функций:

- включать и отключать потребителей электроэнергии и электрических цепей;
- электрической защиты электроприемников и электрических сетей от перегрузок, коротких замыканий;
- регулирования частоты вращения электродвигателей;
- электрического торможения электродвигателей;
- реверсирования электродвигателей.

Аппараты управления различают:

- длительного режима работы;
- непрерывного режима работы;
- кратковременного режима работы.

Аппараты первого типа – называют ручными, а второго типа – автоматическими.

Аппараты разделяют на 3 группы:

- контакторы;
- реле;
- командоаппараты.

2. Конструкция и принцип действия электромагнитного реле.

Реле – это элемент автоматики, в котором при достижении входной величины X определенного значения выходная величина $У$ изменяется скачком. Реле предназначены для включения и отключения электроцепей.

По способу включения различают:

- первичные реле (включают непосредственно в цепи управления);
- вторичные реле, которые включают через измерительные трансформаторы тока и напряжения;
- промежуточные реле (работают от исполнительных органов других реле).

В паспорте реле указываются:

- номинальные данные – ток, напряжение, время;
- значение тока срабатывания;
- уставка реле – значение параметра, на которое отрегулировано данное реле.

Электромеханические реле характеризуются:

- напряжением (током) срабатывания, т.е. наименьшим значением тока на зажимах обмотки реле;
- напряжением (током) отпускания – наибольшим значением напряжения на зажимах обмотки реле;
- коэффициент возврата реле – отношение напряжения отпускания к напряжению срабатывания (всегда меньше единицы).

Реле обычно состоит из 3 органов:

- воспринимающего
- промежуточного
- исполнительного

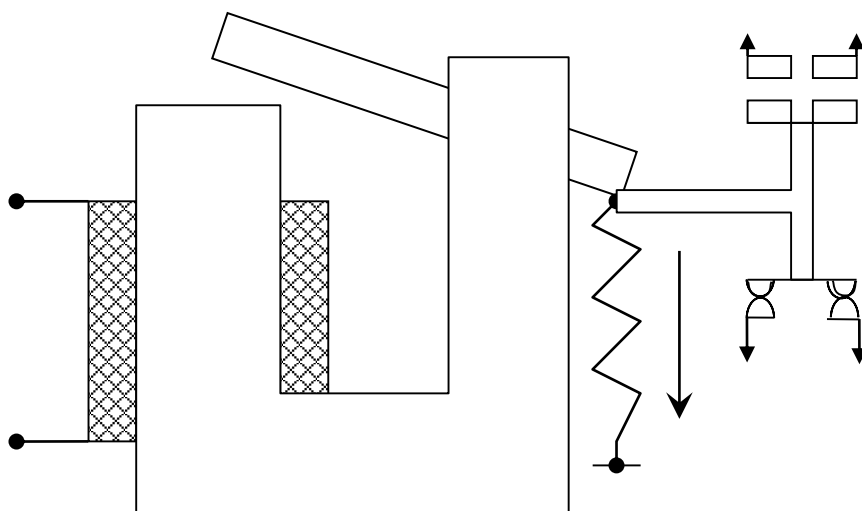


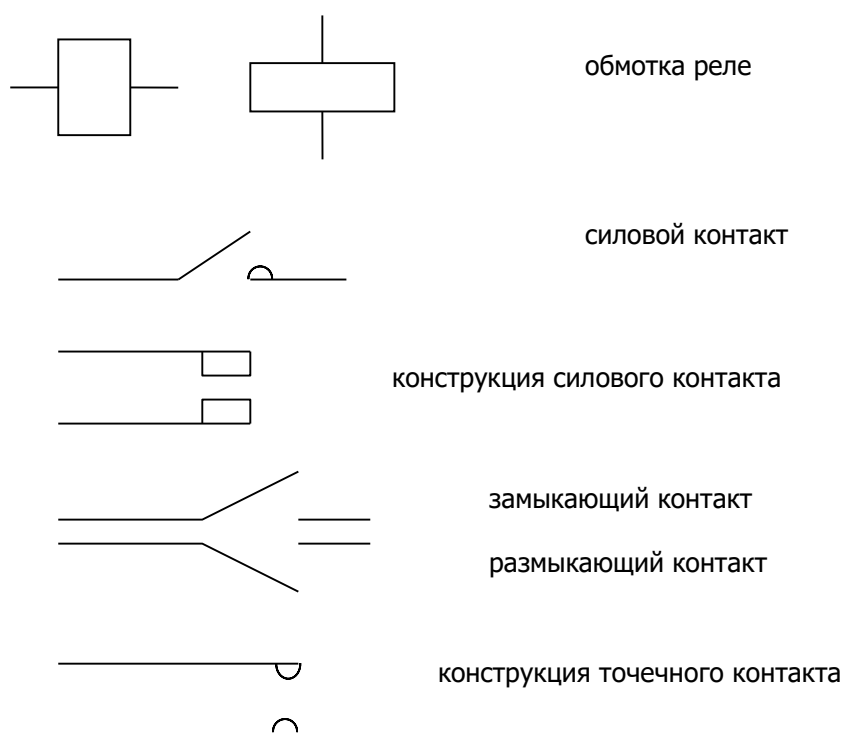
Рисунок 1. Конструкция электромагнитного реле: 1 – обмотка; 2 – магнитопровод; 3 – подвижный якорь; 4 – возвратная пружина; 5 – контакторы

Принцип действия:

При включении напряжения на обмотку реле в ее витках возникает ток, ток создает перпендикулярный магнитный поток, цепь которому создана магнитопроводом, а он имеет воздушный зазор между подвижным якорем, последний притягивается, так как действует закон неразрывности магнитных силовых линий. Контакты реле меняют свое состояние на противоположное. При отключении напряжения на обмотке реле контакты возвращаются в нормальное состояние под действием возвратных пружин.

Нормально-разомкнутые контакты называются замыкающими, а нормально-замкнутые – размыкающими. По конструкции контакты бывают точечные и плоскостные. Точечные обеспечивают надежный контакт и используются для пропуска малых токов в цепях управления, а плоскостные пропускают большие токи и используются в силовых цепях, однако в момент коммутации возникает точечный контакт, возрастает плотность тока, что ведет к выгоранию контакта. Для предотвращения этого напряжение в момент замыкания с контактов снимается.

Условные обозначения:



Зависимость между током входной и состоянием выходной цепей называют статической релейной, т. е. прерывистой, скачкообразной характеристикой реле.

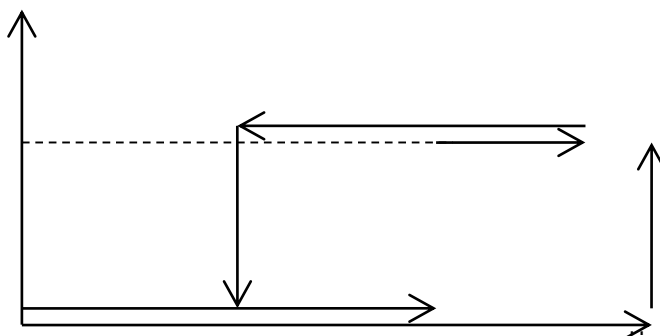


Рисунок 2. Статическая характеристика реле

При увеличении тока в катушке реле от нуля до величины тока срабатывания (участок «*oa*») значение выходного тока не изменяется.

В тот момент, когда ток катушки достигает значения тока срабатывания (точка «*a*»), происходит срабатывание реле (притягивается якорь), контакты меняют свое состояние на противоположное и значение выходного тока изменяется скачком от нуля до его амплитудного значения, что соответствует состоянию логической единицы (участок «*ab*»).

Установившееся (рабочее) значение тока катушки определяется равенством:

$$I_p = \frac{U_n}{R_n} = K_3 \cdot I_{cp}, \text{ где}$$

U_n – напряжение, приложенное к обмотке

R_n – сопротивление обмотки

K_3 – коэффициент запаса на срабатывание (1.3 – 5)

Отношение $\frac{I_{om}}{I_{cp}} = k_{63}$ называется коэффициентом возврата и

обычно составляет 0.25 – 0.95.

Коэффициент запаса реле

$$\frac{I_p}{I_{cp}} = K_{запас} = (1.4 \div 2)$$

необходим для надежного срабатывания реле и удержания якоря в рабочем состоянии питающего напряжения. Вводится для ускорения времени срабатывания.

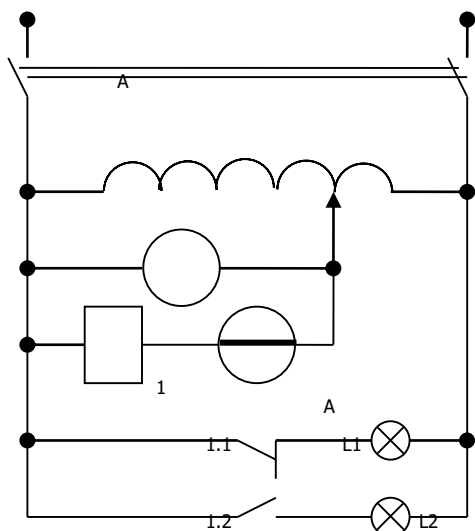


Рисунок 3. Схема определения напряжения и тока срабатывания и отпускания реле

Входному параметру I_{cp} соответствует мощность срабатывания P_{cp} . Мощность, которая многократно коммутируется контактами реле как в силовых, так и в цепях управления, называется управляющей мощностью P_y .

Отношение $\frac{P_y}{P_{cp}} = k_y$ называется коэффициентом управления

реле.

Описание лабораторной установки

Установка представляет собой стенд, на котором смонтированы реле различных типов. На стенд выведены изолированные клеммы для подключения обмоток реле и контактов, колодки с предохранителями, клеммы измерительных приборов.

Программа работы и методика исследования

1. Ознакомиться конструкциями электромагнитных реле.
2. Собрать схему:

а) снять вольтамперную характеристику $U = f(I)$, определить U_{cp}

и I_{cp} ;

мА	$I,$						
В	$U,$						

б) определить рабочий ток I_p при номинальном напряжении;

в) определить ток срабатывания и отпускания I_{om}, U_{om} ;

3. Из полученных данных определить:

а) коэффициент запаса реле

$$K_3 = \frac{U_n}{U_{cp}};$$

б) коэффициент возврата по напряжению

$$K_6 = \frac{U_{om}}{U_{cp}};$$

4. Построить вольтамперную характеристику $I = f(U)$.

5. Для определения времени срабатывания реле собрать схемы.

6. Сделать выводы.

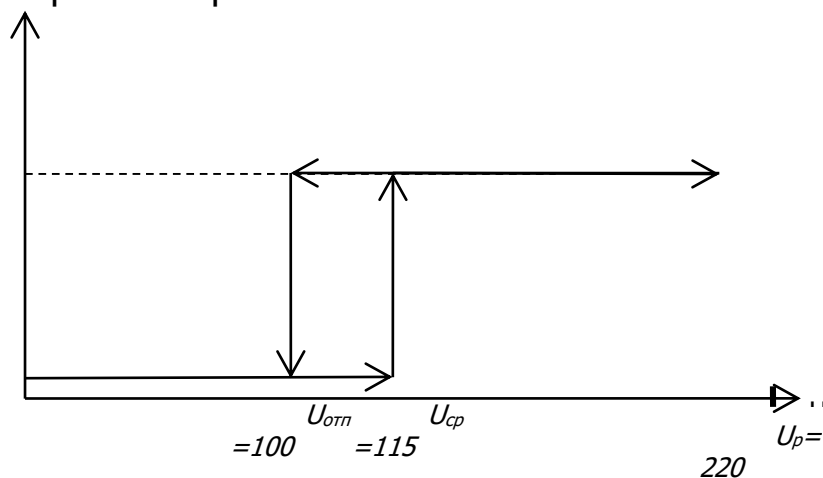
Испытания реле переменного тока

1. Магнитный пускатель ПМЕ211 переменного тока, 3х-фазный с тепловой защитой

Напряжение срабатывания – 115 В

Напряжение отпускания – 100 В

Напряжение рабочее – 220 В



$$K_{\epsilon} = \frac{U_{om}}{U_{cp}} = \frac{100}{115} = 0.86$$

$$K_{\zeta} = \frac{U_p}{U_{cp}} = \frac{220}{115} = 1.91$$

2. Однофазное РП 21-УКЛЧ

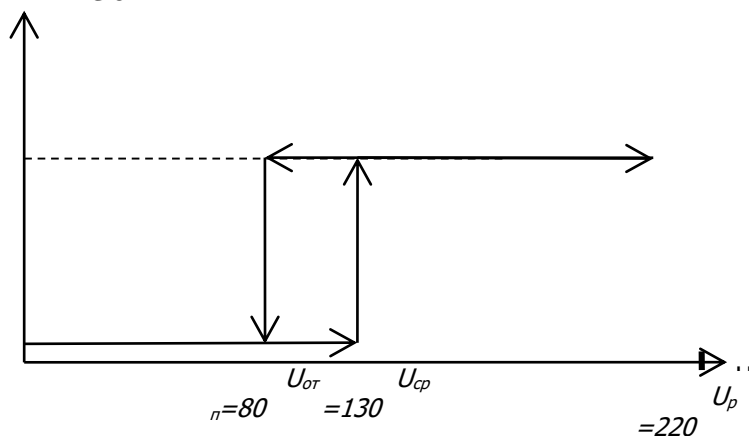
$$U_p = 220B$$

$$U_{cp} = 130B$$

$$U_{omn} = 80B$$

$$K_{\epsilon} = \frac{80}{130} = 0.62$$

$$K_{\zeta} = \frac{220}{130} = 1.69$$



3. МКУ48С

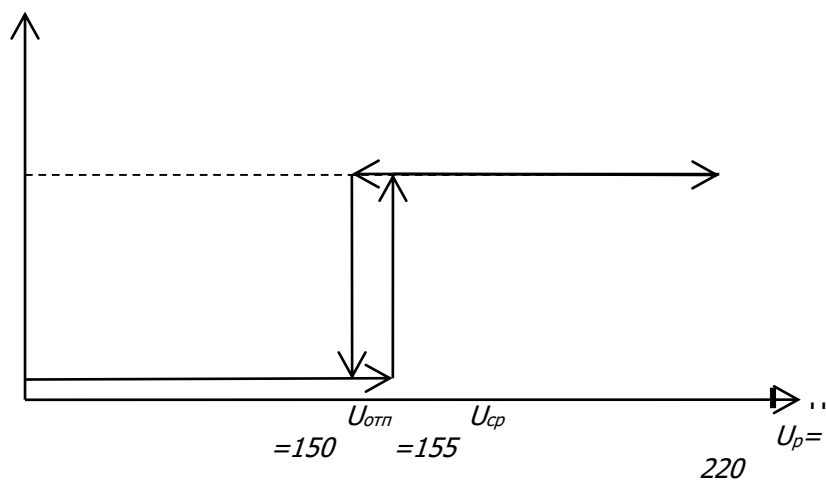
$$U_p = 220B$$

$$U_{cp} = 155B$$

$$U_{omn} = 150B$$

$$K_{\epsilon} = \frac{150}{155} = 0.96$$

$$K_{\zeta} = \frac{220}{155} = 1.42$$



Постоянного тока

4. ЗРДТ 10А

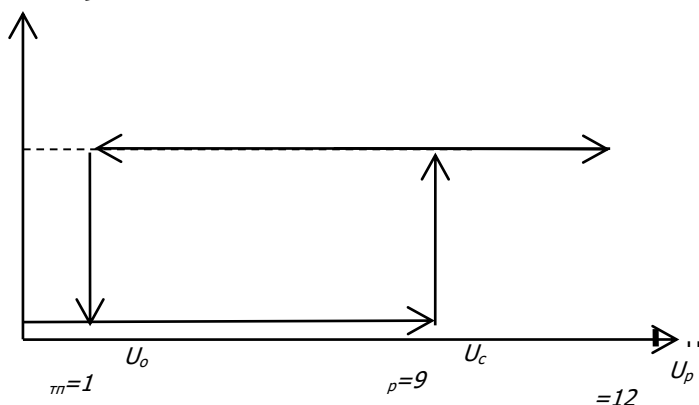
$$U_p = 12B$$

$$U_{cp} = 9B$$

$$U_{отт} = 1B$$

$$K_e = \frac{1}{9} = 0.111$$

$$K_3 = \frac{12}{9} = 1.33$$



5. Пускатель 380В-10А катушки ПМЕ111

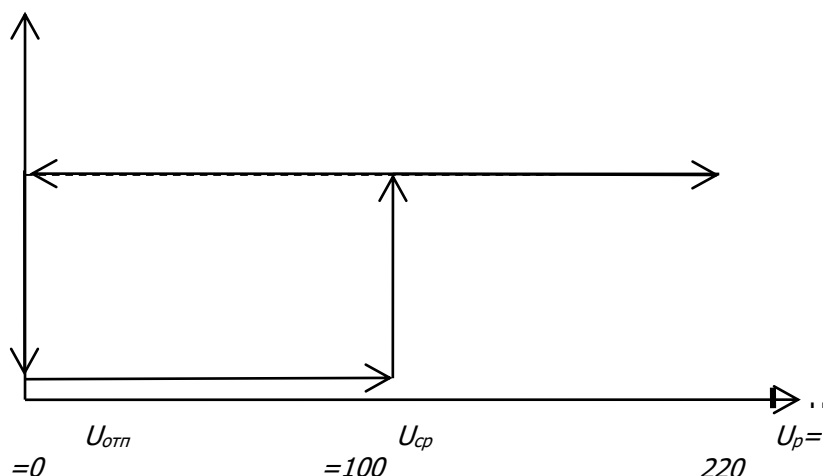
$$U_p = 220B$$

$$U_{cp} = 100B$$

$$U_{отт} = 0B$$

$$K_e = \frac{0}{100} = 0$$

$$K_3 = \frac{220}{100} = 2.2$$



Вывод: На различии коэффициентов возврата и коэффициентов запаса строится логика управления технологическими процессами

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

Испытание электрических предохранителей, автоматических выключателей и реле

Цель работы:

- ознакомиться с конструкциями, принципом действия предохранителей, автоматических выключателей и тепловых реле;
- определить зависимость времени срабатывания предохранителей, автоматических выключателей и тепловых реле от величины тока перегрузки.

Предохранителем называют электрический аппарат, который при токе, большем заданной величины, размыкает цепь путем расплавления плавкой вставки, непосредственно нагретой током до расплавления.

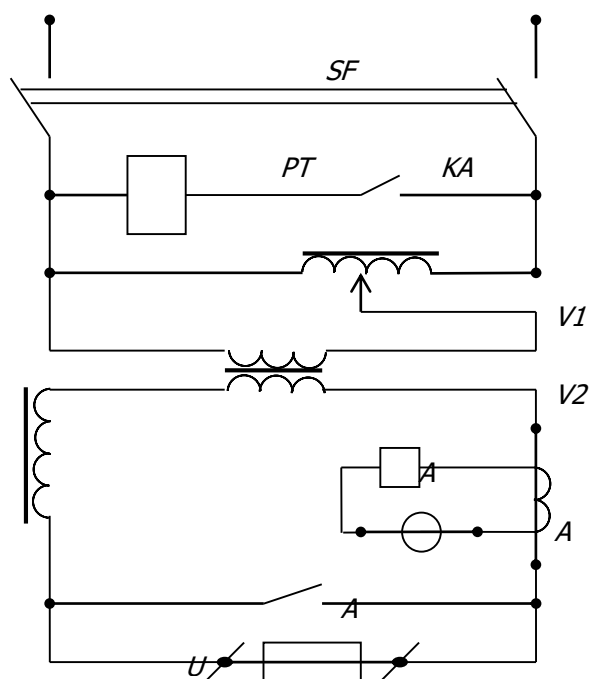
$$I = \frac{U}{R \rightarrow 0} \rightarrow \infty$$

Можно классифицировать предохранители по степени закрытия плавкой вставки:

- 1) с открытой плавкой вставкой;
- 2) с полузакрытым патроном;
- 3) с закрытым патроном.

Времятоковой характеристикой называется зависимость времени полного отключения от тока.

Схема лабораторной установки для снятия время-токовых характеристик плавких вставок



Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями и конструкциями низковольтных предохранителей по имеющимся образцам.

2. Снять времятоковую характеристику медной круглой плавкой вставки $\varnothing 0.25\text{мм}$:

- заготовить вставки длиной 70 мм (10 шт);
- установить вставку в гнезда установки;
- установить автотрансформатор TV1 в нулевое положение, замкнуть контакты выключателя SA и автоматического выключателя SF;
- плавным поворотом рукоятки автотрансформатора TV1 установить во вторичной цепи трансформатора ТА ток в 8А;
- разомкнуть контакты автовыключателя SF, установив секундомер на ноль и разомкнуть контакты SA;
- замкнуть контакты SF и записать показания секундомера – время срабатывания плавкой вставки;
- отключить автовыключателем цепь от сети и поставить новую плавкую вставку.

Определить время срабатывания при токах 10, 15, 20, 25А и построить график $t = f(I)$

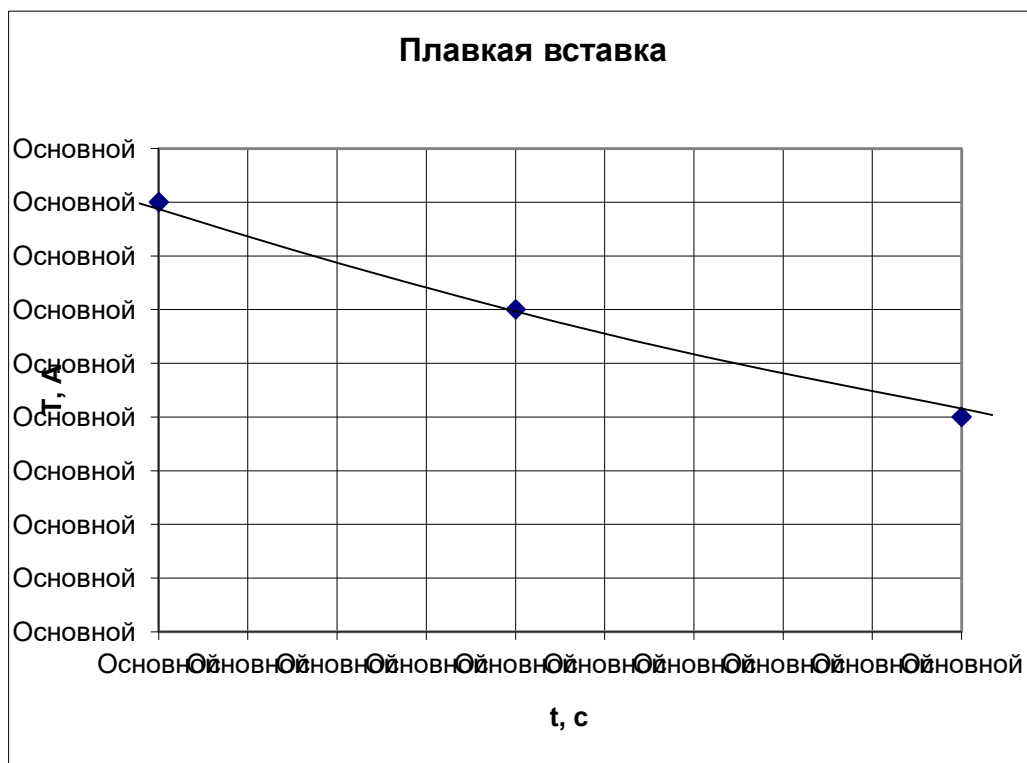
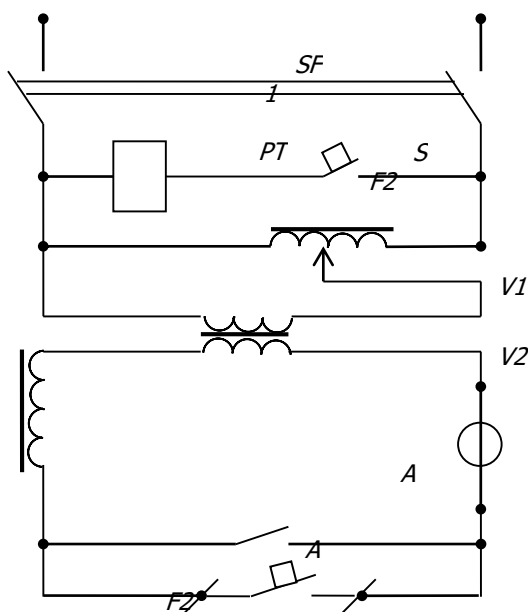


Схема установки для снятия времятоковых характеристик автоматических выключателей



Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с конструкцией автоматических выключателей.
2. Снять времятоковую характеристику автоматического выключателя при различных токах перегрузки:
 - собрать схему;

- при замкнутых контактах выключателя SA и разомкнутых контактах SF2 подключить схему выключателем SF1 к сети и поворотом рукоятки TV1 установить во вторичной цепи трансформатора TV2 ток, превышающий уставку SF2;

- разомкнуть SA, а контакты SF2 замкнуть и определить по секундомеру РТ время срабатывания тепловых расцепителей выключателя SF2;

- определить кратность перегрузки

$$K = \frac{I}{I_n}, \text{ где } I \text{ – ток нагрузки, А;}$$

I_n – номинальный ток автоматического выключателя, А;

SF	Тип	I_n , А	I , А	К	Время срабатывания, с
АЕ 103/11			40		3
			30		6
			20		20
Авто- матич. пробко- вый			40		0.5
			30		0.8
			20		3
			10		10
			5		∞

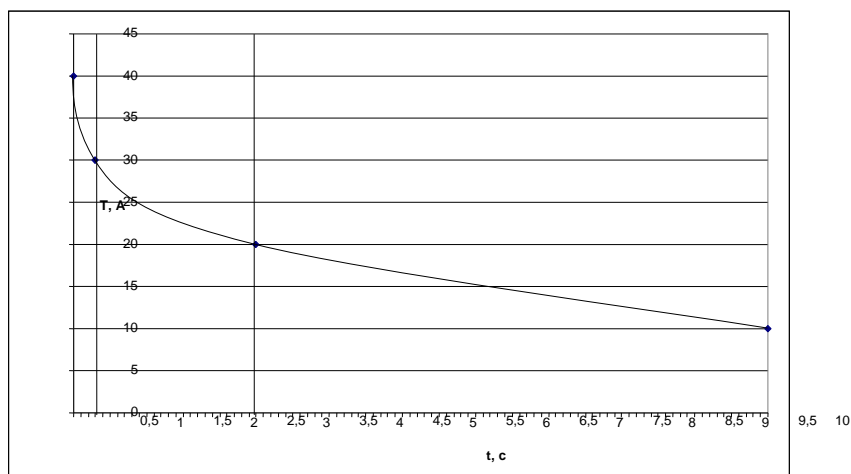
- через 3-5 мин замкнуть контакт SA и плавным поворотом рукоятки трансформатора TV1 установить во вторичной цепи TV2 очередной ток перегрузки SF2;

- разомкнуть SA, а SF2 замкнуть и определить по секундомеру РТ время срабатывания тепловых расцепителей выключателя SF2;

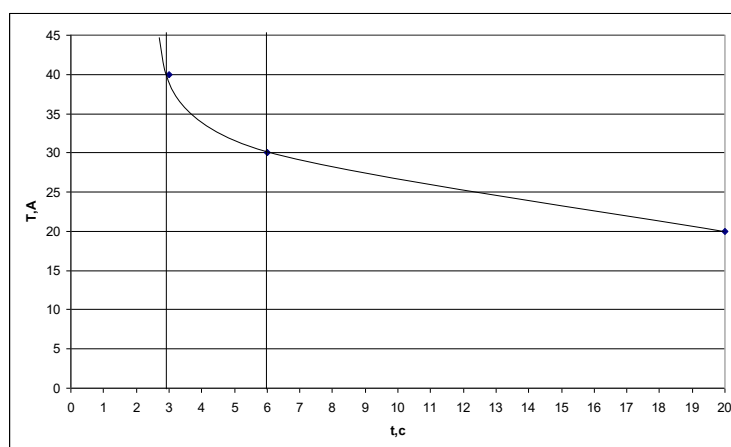
- еще через 3-5 мин, увеличивая ступенчато ток нагрузки, определить время срабатывания;

- построить график зависимости $t = f(K)$

Автоматический пробковый выключатель



AE 103111



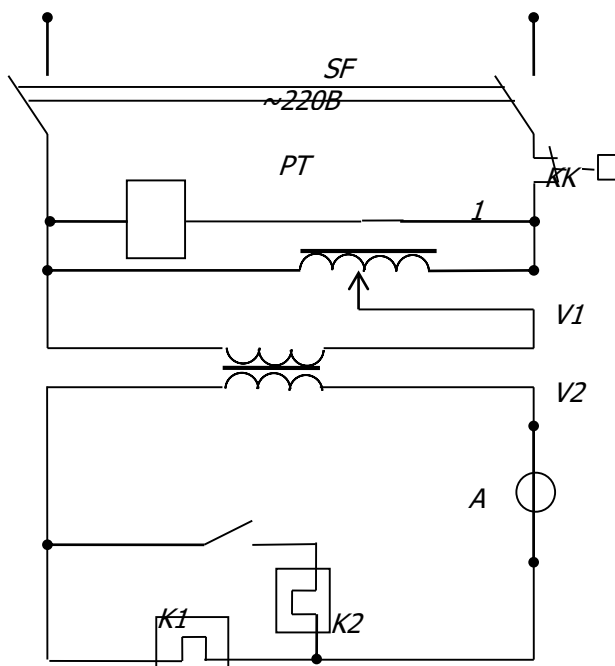
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10 Испытание тепловых реле

Основа теплового реле – биметаллическая пластина, представляющая собой спаянные вместе пластины из разнородных металлов, один из которых активный, а другой – пассивный. Активный металл имеет больший коэффициент температурного расширения, чем пассивный, при этом его поверхность, соединенная с поверхностью пассивного металла, имеет меньшую свободу и почти не удлиняется, поэтому пластина изгибается в сторону активного слоя.

Ток может пропускаться либо по самим пластинам, либо по нагревательным элементам.

Реле бывают с освобождающейся защелкой, с прыгающим контактом, с прыгающей биметаллической пластиной, с изменением направления силы цилиндрической пружины и т.д.

Схема лабораторной установки



К клеммам сетевого автоматического выключателя подключена первичная обмотка автотрансформатора TV1 и электрический секундомер РТ, имеется размыкающий контакт КК1 теплового реле, который отключает секундомер после срабатывания. К нагрузочным клеммам автотрансформатора TV1 подключена первичная обмотка силового трансформатора TV2. Нагревательный элемент КК1 зашунтирован элементом КК2 с таким же номинальным током с помощью SA, который используется при настройке тока в цепи вторичной обмотки TV2.

Вывод: тепловое реле состоит:

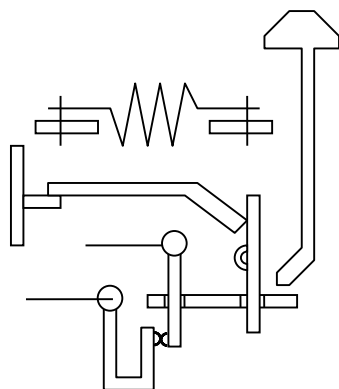


Рисунок 3. Конструкция теплового реле: 1 – нагревательный элемент; 2 – биметаллическая пластина; 3 – рычаг; 4 – тяга; 5 – контакты; 6 – кнопка самовозврата

Принцип действия:

Нагревательный элемент теплового реле включается последовательно с обмоткой двигателя в тепловую цепь. При перегрузке двигателя по его обмоткам а значит, и по нагревательному элементу начинает протекать ток больше номинального, что приводит к большому выделению тепла. Расположенная рядом с нагревательным элементом 1 биметаллическая пластина при нагревании изгибается и через рычаг 3 и тягу 4 размыкает контакты 5, разрывая тем самым цепь намагничивающей катушки электромагнитного реле. Кнопка 6 самовозврата служит для возврата системы после остывания в рабочее состояние.

Тепловое реле срабатывает при длительных перегрузках и не реагирует на значительные, но кратковременные превышения тока в защищаемой цепи, которые не представляют опасности для целостности электродвигателя.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11 **Схемы электроприводов с асинхронным электродвигателем**

Цель работы:

- 1) Исследование работы схем электроприводов, в которых используется асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым контуром
- 2) Ознакомление с аппаратурой управления и защиты.

Основные положения

Электрическая цепь, по которой осуществляется подача электроэнергии от трехфазной сети к асинхронному двигателю, называется силовой цепью электропривода. Электрическая схема этой цепи называется схемой силовой цепи.

Необходимый режим работы асинхронного электродвигателя в той или иной установке обеспечивается электрическими аппаратами цепи управления. Функции этой цепи заключаются в осуществлении пуска, остановки, реверсирования и защиты двигателя. Поэтому в электрической схеме цепи управления находятся магнитные пускатели, контакторы, кнопки управления, различные реле и аппараты защиты.

Электрическая схема простейшего нереверсивного электропривода с асинхронным двигателем показана на рисунке.

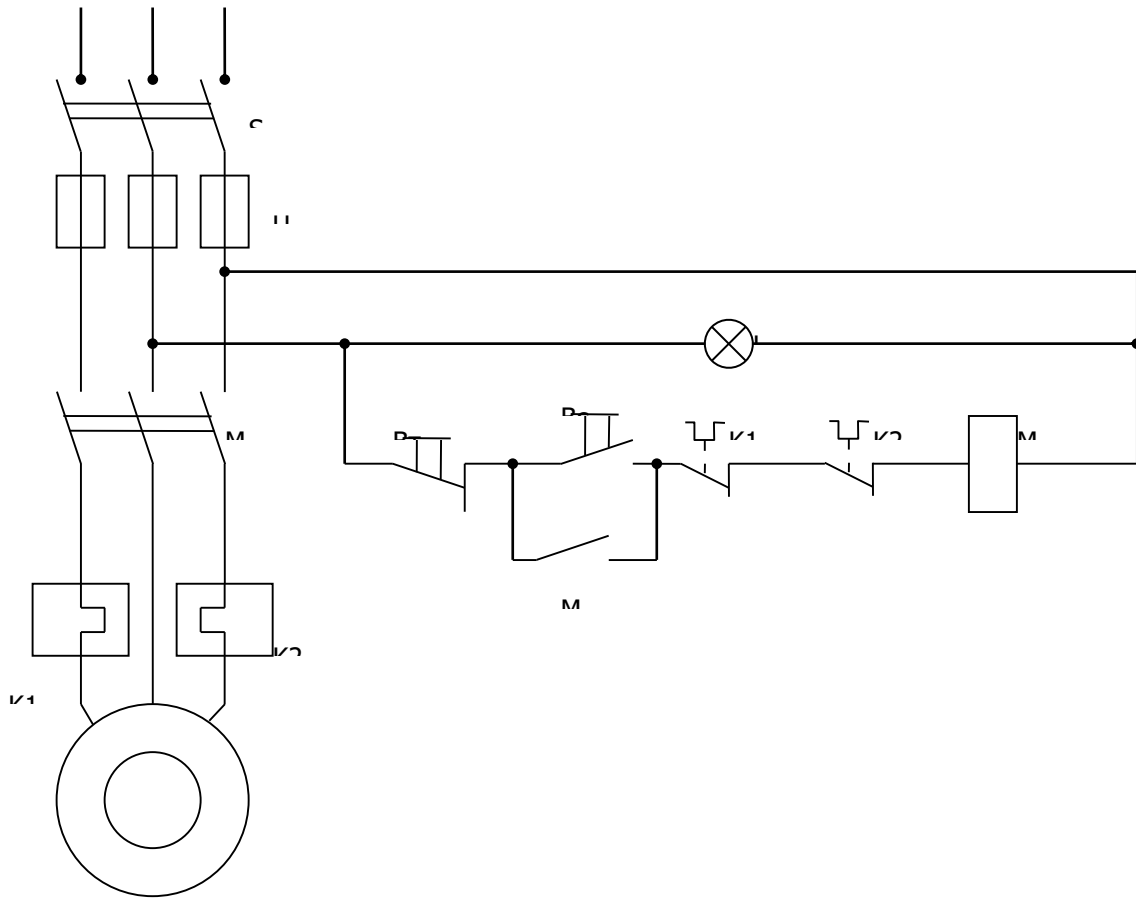


Схема защиты электродвигателя при обрыве линейного провода

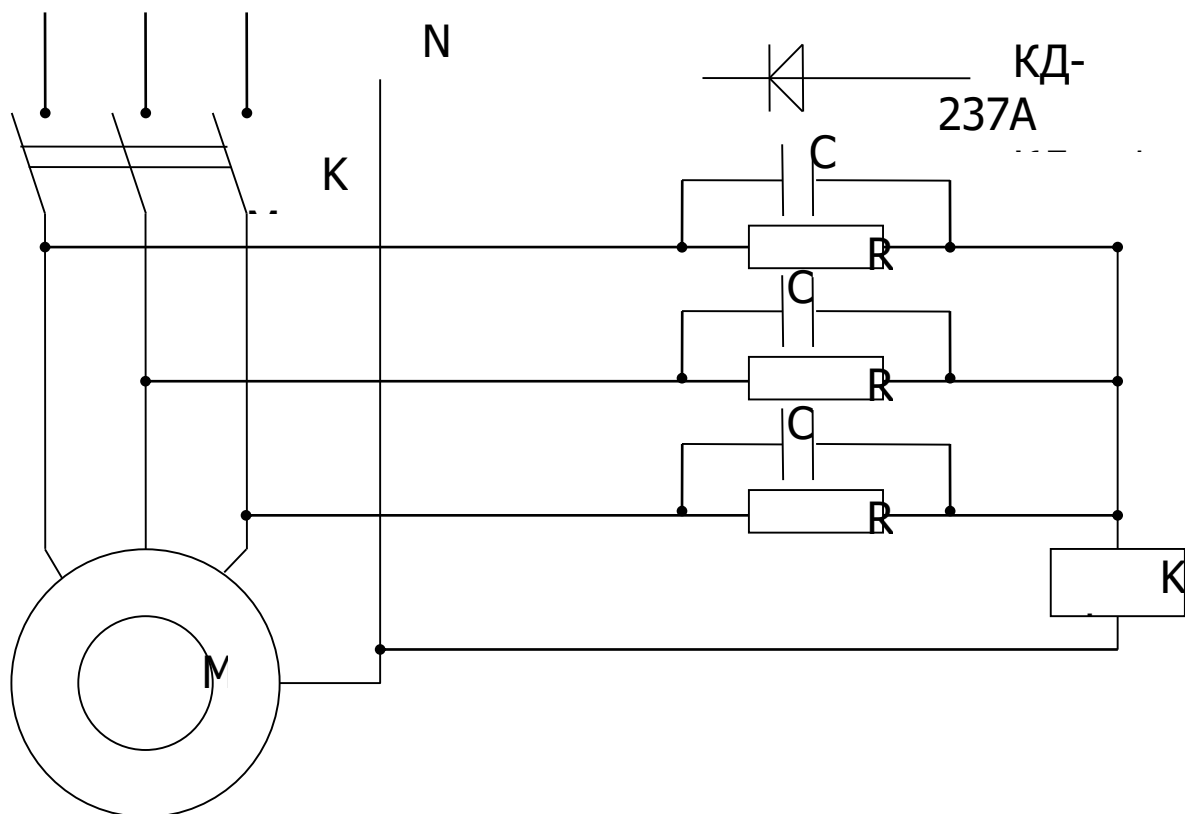
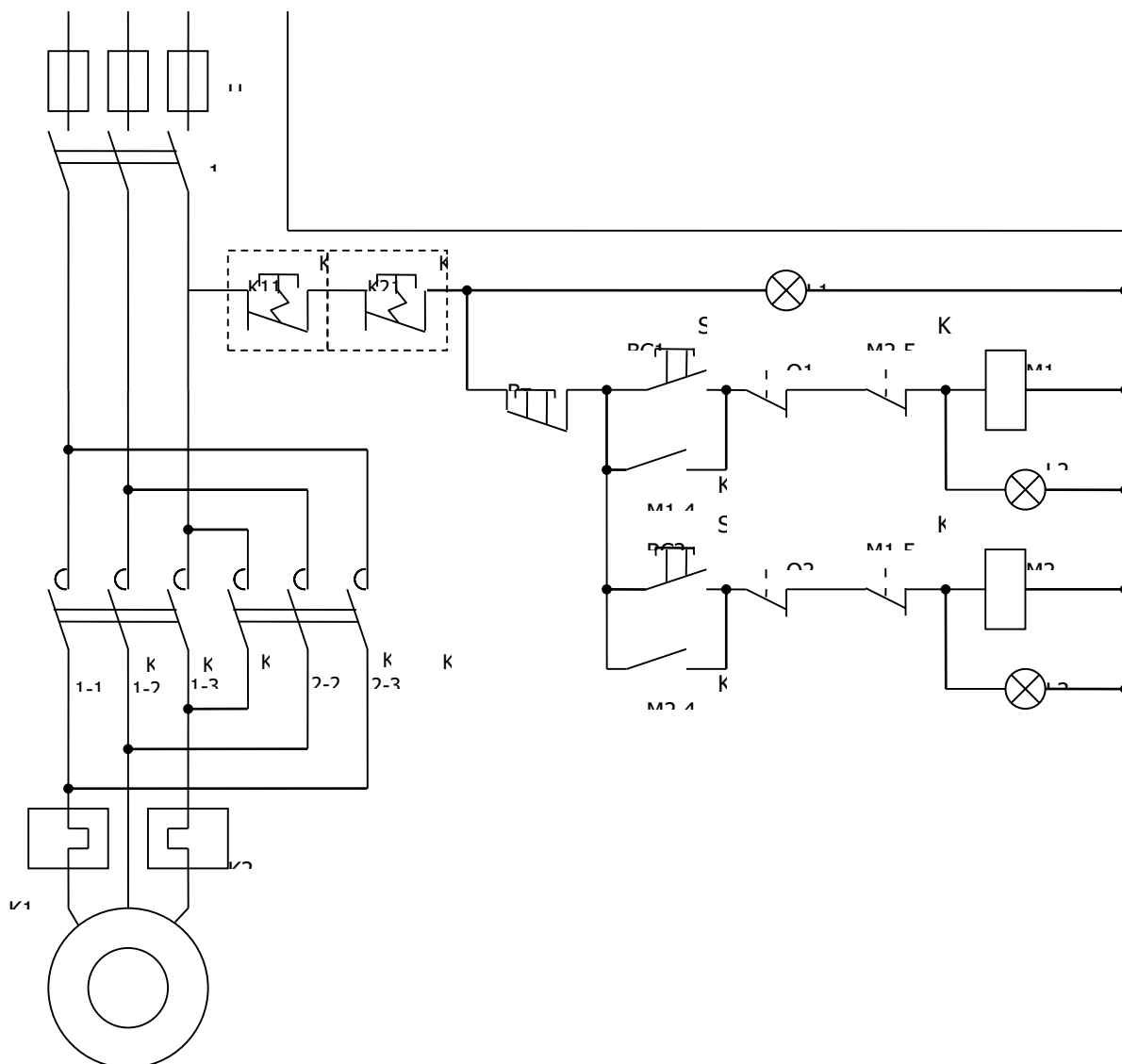


Схема реверсионного управления асинхронным электродвигателем



Лабораторная установка представляет собой действующую модель реверсивного электропривода с асинхронным двигателем.

В состав лабораторной установки входят асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором М, автоматический трехфазный выключатель QF, плавкие предохранители FU, выключающая кнопка SBT «Стоп», включающая кнопка SBC1 «Вперед» (вращение электродвигателя по часовой стрелке), выключающая кнопка SBC2 «Назад» (вращение электродвигателя против часовой стрелки), магнитные пускатели KM1 «Вперед» и KM2 «Назад», концевые выключатели SQ1 и SQ2 для ограничения угла поворота механизма, сигнальные лампочки HL1, HL2, HL3. Магнитные пускатели KM1 и KM2 объединены конструктивно в одном корпусе. Одновременно их включить невозможно.

Вывод:

Нагрузка двигателя считается симметричной. В процессе эксплуатации из-за больших пусковых токов возникают короткие межвитковые замыкания. Нейтраль смещается, возникает режим асимметрии, которая развивается в межфазовое КЗ. Защита от КЗ осуществляется с помощью плавкого предохранителя FU. На оставшихся 2 фазах напряжение увеличивается в $\sqrt{3}$ раза. Защита от асимметрии осуществляется с помощью защитного диодного моста на нулевой точке, у которой появляется потенциал. При токе 12 мА катушка отключения срабатывает и размыкает свой нормально замкнутый контакт КО в цепи управления, а магнитный пускатель отключает все 3 фазы двигателя, а замыкающим блоком контактом подается сигнал электрику.

Защита от режима перегрузки осуществляется с помощью тепловых реле. Увеличение механического момента вызывает возрастание силы тока в цепи, нагревательные элементы реле включены в силовую цепь двигателя и контролируют значение рабочего тока, а нормально замкнутые контакты КК1 и КК2 включены в цепь управления последовательно с обмотками магнитных пускателей. Реле реагирует на избыточное выделение энергии (20% перегрузки в теч. 1 мин). Необходимо и достаточно 2 реле, т.к. выполняется логическая операция «или не». Для реверсирования асинхронного двигателя необходимо и достаточно поменять местами любые две фазы.

Для защиты от КЗ силовой цепи используются нормально замкнутые блок контакты КМ. Если один из пускателей под током, он своим контактом размыкает цепь другого контакта. Для согласования напряжений питания силовой цепи и цепи управления используются понижающие котельные трансформаторы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12

Командный электропневматический прибор КЭП-12У

Цель работы: изучить устройство, принцип работы и порядок настройки прибора КЭП-12У. Построить циклограмму настройки прибора.

Прибор КЭП-12У предназначен для формирования команд, определяющих последовательность и продолжительность различных технологических операций. Прибор применяется в безрефлексных системах программного управления технологическим процессом, например, в

пропарочных камерах при тепловой обработке железобетонных изделий.

Основными элементами прибора КЭП-12У является синхронный электродвигатель ($U=127\text{ В}$, $P=40\text{ Вт}$) и распределительный вал с кулачками. Электродвигатель осуществляет привод распределительного вала через редуктор с постоянным передаточным числом, храповой расцепляющий механизм (находится внутри колокола редуктора) и четырехступенчатую коробку скоростей.

Цена одного деления пороговой шкалы верхнего колокола, который вращается вместе с распределительным валом:

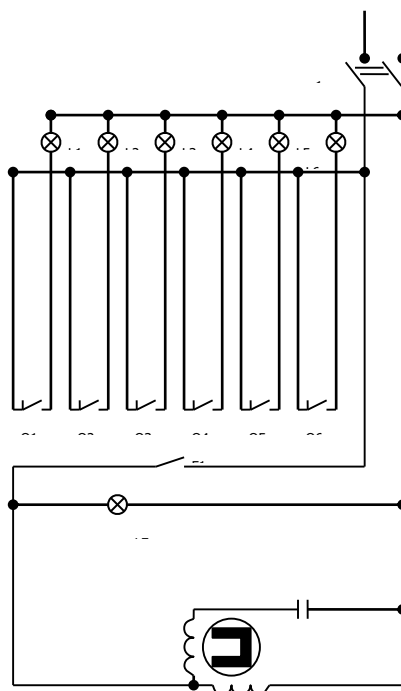
$$N = \frac{T_{\text{ц}}}{A}, \text{ где}$$

A – число делений круговой шкалы верхнего колокола,
 $T_{\text{ц}}$ – продолжительность цикла (мин, с)

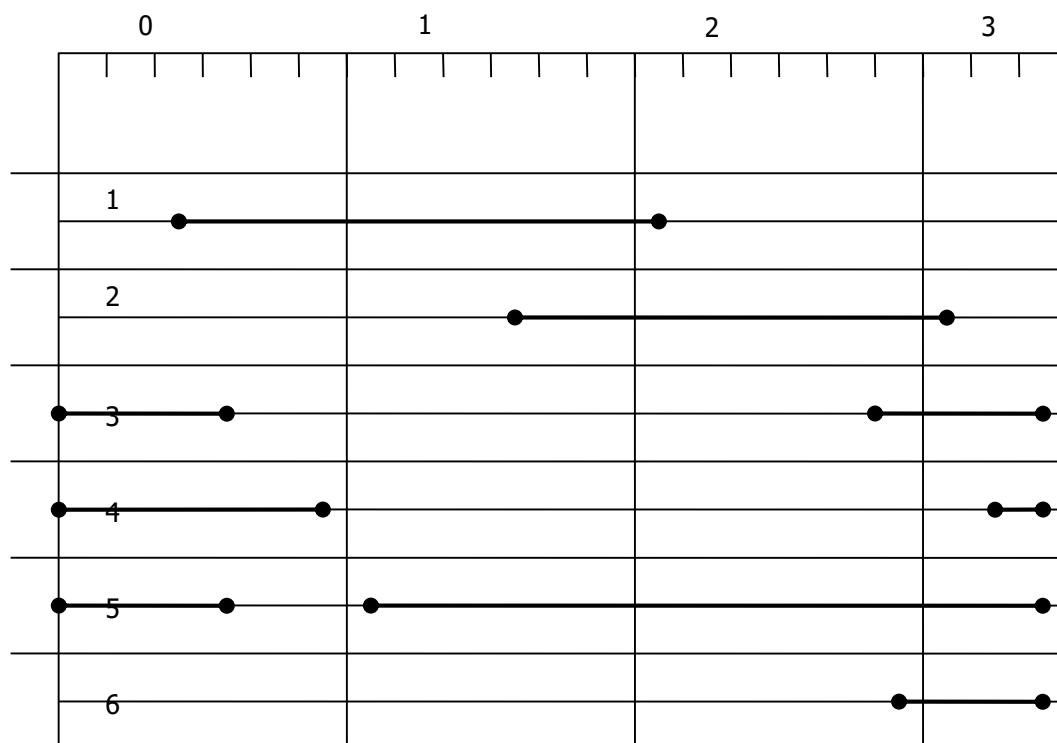
Число делений A_1 и A_2 шкалы верхнего колокола, соответствует времени начала T_1 и времени окончания T_2 конкретной операции цикла:

$$A_1 = T_1 : N = \frac{T_1}{T_{\text{ц}}} \cdot A; A_2 = T_2 : N = \frac{T_2}{T_{\text{ц}}} \cdot A$$

Электрическая схема прибора типа КЭП-12У



Циклограмма настройки прибора



$T_{\text{верх.колокол}} = 0$
 $T_{\text{нижн.колокол}} = 10$
 $T_{\text{цикла задан.}} = 3.24 \text{ сек.}$
 $T_{\text{цикла фактич.}} = 3.28 \text{ сек.}$

Выводы:

КЭП-12У – командный электропневматический прибор.

6 – пневматич., 6 – электрич.

Является программным задатчиком. по принципу действия – САР безрефлексная, т.е. отсутствует обратная связь с регулируемым производственным параметром, поэтому требуется наличие оператора.

С помощью нижнего колокола и редуктора задается время цикла – 1 полный оборот распределительного вала: от 3 мин. до 18 часов.

С помощью верхнего колокола и распределительного вала задается начало (в левую канавку вкл.) и конец (отключ. в правую), т. е. продолжительность и последовательность операций – программа.

Достоинство – высокая надежность.

Недостаток – сложность конструкции.

Применяется в бетоно-смесительных узлах, пропарочных камерах, во всех циклических производственных процессах.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13

Исследование поточно-транспортной системы

Цель работы: Исследование принципа построения и режимов работ поточно-транспортной системы.

ПТС широко используется в строительстве, на предприятиях промышленности строительных материалов и на других объектах для перемещения сыпучих и штучных материалов.

ПТС в общем случае включает несколько транспортеров, которые приводятся в действие при помощи индивидуальных электродвигателей, предназначенных для длительного режима работ, т. е. ПТС являются установками непрерывного действия.

Транспортеры приводятся в действие асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором, мощность которых выбирают равной статической мощности производственного механизма.

Установка непрерывного транспорта требует значительного пускового момента, т. е. при пуске, особенно после длительного перерыва в работе и в зимнее время, когда смазка в подшипниках застывает, момент их сопротивления может быть немного выше нормального статического момента. Кроме того, электродвигателю приходится преодолевать инерцию значительных масс установки.

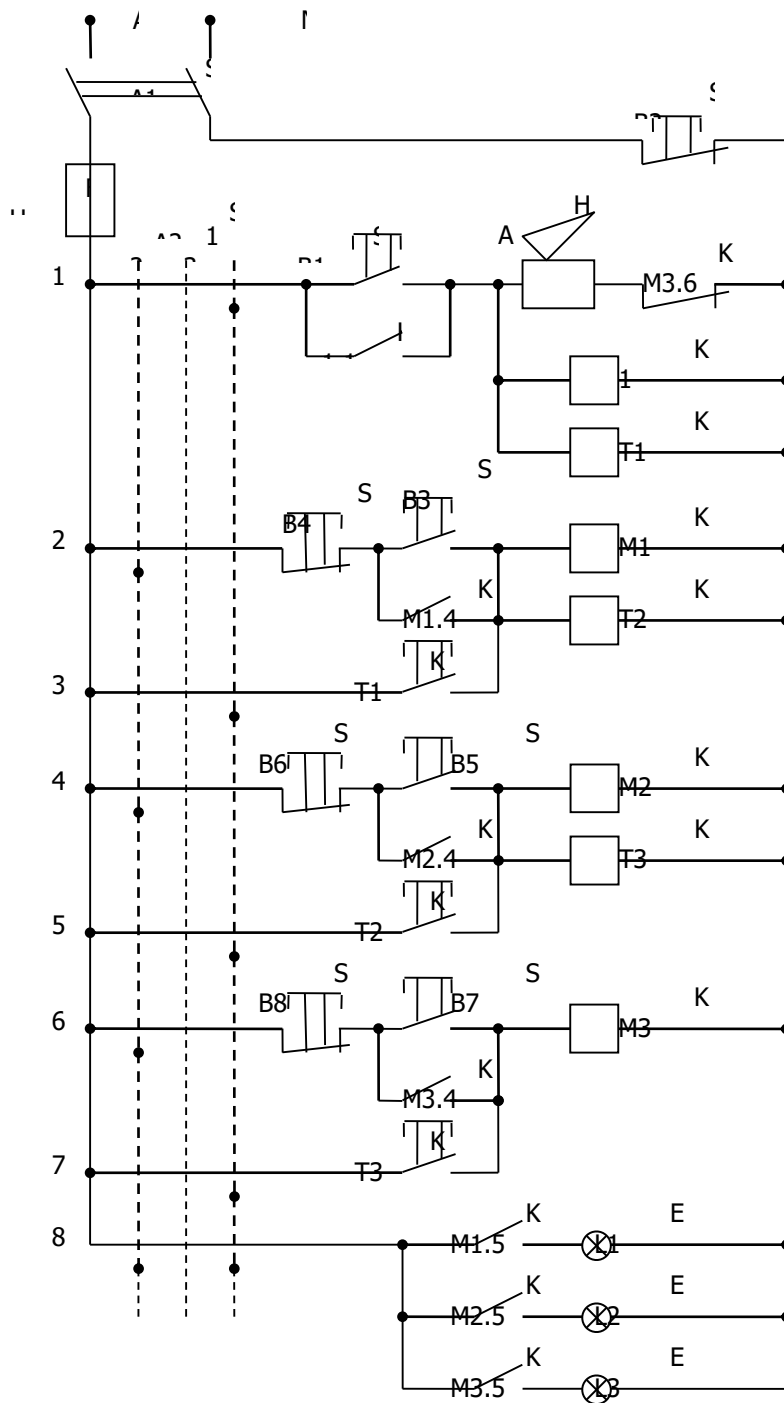
Для электродвигателей, применяемых в приводе транспортеров, отношение пускового момента к номинальному должно быть не менее 1,2.

Схема управления ПТС

Основными элементами являются: магнитные пускатели КМ 1, 2, 3, реле времени КТ1, промежуточное реле К1, гудок РФ, выключатели кнопочные на вкл. SB 1, 3, 5, 7, выключатели на откл. SB 2, 4, 6, 8, универсальный переключатель SA2, выключатель SA1, для подачи напряжения на схему управления, сигнальные лампы EL 1, 2, 3, главный предохранитель FU, контакт реле электротеплового КК.

Режим работы определяется положением SA2, который имеет три положения:

- 1 – режим дистанционного управления, замкнутые четные цепи 2, 4, 6, 8;
- 2 – все цепи управления разомкнуты;
- 3 – автоматический режим, замкнуты нечетные цепи 1, 3, 5, 7 и цепь сигнализации 8.



Выводы:

- универсальный переключатель SA2 в положении 2 – все цепи управления разомкнуты. УП в положении 1 – замкнуты четные цепи; обеспечивает: включение электродвигателей транспортеров в любой последовательности с помощью пусковых кнопок SB 3, 5, 7 в любой последовательности, используется при ремонтах или требованиях к технологии. Остановка производится кнопками SB 4, 6, 8. УП в положении

З - замкнуты нечетные цепи управления, обеспечивает: включение ПТС одной кнопкой SB1, под ток становятся: звуковой сигнал HA, контактор K1, шунтирующий пусковую кнопку, и реле времени KT1;

- HA – звуковая сигнализация обеспечивается выдержкой KT1, для предупреждения обслуживающего персонала о предстоящем запуске ПТС в автоматическом режиме по требованиям;

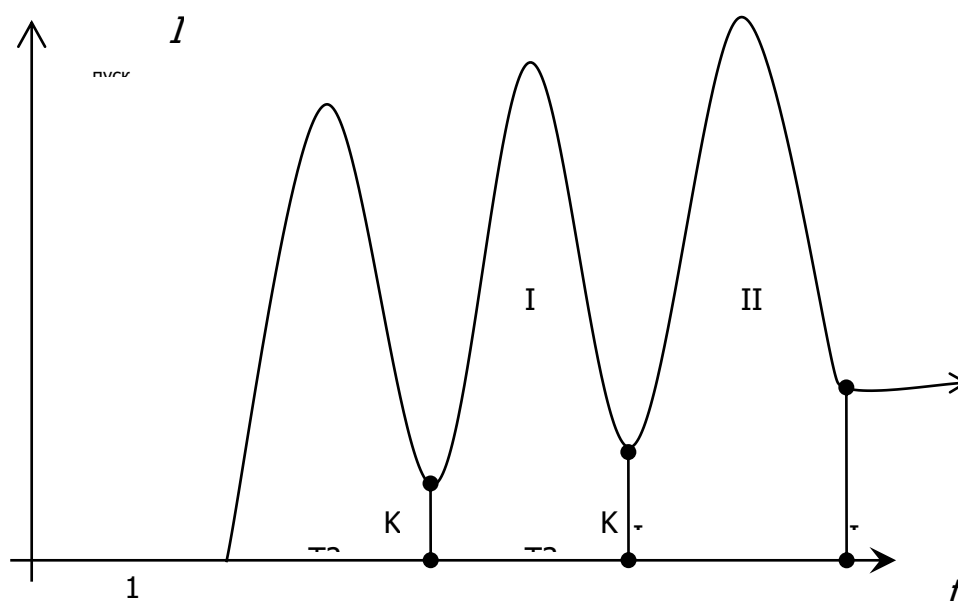
- ступенчатый пуск электродвигателей из-за больших пусковых токов KT2, KT3;

- обратную последовательность пуска транспортера перемещаемому грузу с целью исключения завалов;

- световую сигнализацию работы двигателей HL 1, 2, 3;

- систему аварийного отключения SBT2

Работа ПТС – непрерывный технологический процесс, поэтому предусмотрены блокировки включения резервных транспортеров.



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №14

Исследование системы двухпозиционного автоматического регулирования температуры с манометрическим термометром

Цель работы: изучить приборы и принцип работы системы двухпозиционного автоматического регулирования температуры с манометрическим термометром.

1. Общие положения

В технике регулирование различных параметров технологического процесса выполняется с помощью различных регуляторов: пропорциональных (П), пропорционально-интегральных (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД), релейных, позиционных.

При жестких требованиях, предъявляемых к системам автоматического регулирования, применяются ПИ и ПИД регуляторы. Они способны точно поддержать на заданном значении параметр регулирования.

В случаях, когда технологический процесс допускает возможность изменения значений параметров регулирования в пределах некоторого диапазона, применяются позиционные регуляторы.

Позиционным называется регулятор, при помощи которого регулируемый орган (клапан, заслонка, задвижка, контакты реле и т.п.) занимает вполне определенное положение (позиции). Применяются двух- и трехпозиционные регуляторы.

Для двухпозиционных систем регулирования характерно 2 положения регулирующего органа (открыто-закрыто, включено-отключено).

При трехпозиционном регулировании регулируемый орган кроме крайних положения может еще занимать среднее положение (нормально). Качество позиционного регулирования оценивается по среднему значению и амплитуде отклонения регулируемой величины в установившемся режиме.

Конструкция манометрического термометра.

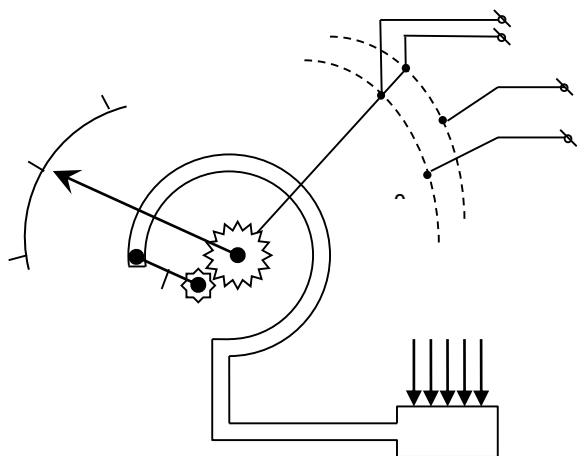


Рисунок 1. Конструкция манометрического термометра:
 1 – термобаллон; 2 – капилляр;
 3 – трубчатая пружина овального сечения; 4 – шестеренчатая передача;
 5 – поводок; 6 – стрелка; 7 – шкала;
 8 – подвижные электрические контакты; 9, 10 – неподвижные электрические контакты

При заданном диапазоне изменение регулируемого параметра оценивается теоретическими величинами T_1 и T_2 . Вследствие инерционности системы в реальных условиях величины T_1 и T_2 принимают значения T_{\max} и T_{\min} .

При настройке двухпозиционного регулятора необходимо выполнить условие:

$$\tau^* = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2}, \text{ где}$$

τ^* - заданное при настройке среднее значение регулируемого параметра.

Величина $\varepsilon = \tau_2 - \tau_1$ - называется зоной нечувствительности позиционности регулятора.

Точность работы позиционного регулятора характеризуется ошибкой по формуле:

$$\Delta\tau_{ст} = \tau_{ср} - \tau^*, \text{ где}$$

$$\tau_{ср} = \frac{\tau_{\min} + \tau_{\max}}{2} - \text{ фактическое значение регулируемой величины}$$

Величины τ_{\min} и τ_{\max} , а, следовательно, и статическая ошибка $\Delta\tau_{ст}$ тем больше, чем больше зона нечувствительности и инерционность регуляторов.

Принцип работы манометрического термометра основан на изменении давления жидкости или газа, находящегося в замкнутом внутреннем объеме при изменении температуры. Работа таких термометров подчиняется закону Менделеева-Клапейрона:

$$PV = MRT, \text{ где}$$

P – давление манометрической жидкости массой M внутри системы объемом V ;

R – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура манометрической жидкости.

Из этой формулы очевидна пропорциональная зависимость между абсолютной температурой и давлением.

2. Описание лабораторной установки.

На рис. 2 показана электрическая схема установки двухпозиционного регулирования температуры с манометрическим термометром. Основными элементами установки являются: нагревательный элемент ЕК (электроплитка), манометрический сигнализирующий и ПЗ-регулирующий термометр типа ТС-100 с контактами SK1 и SK2, электромагнитные реле K1 и K2, кнопки дистанционного управления SB1 и SB2, сингалные лампы EL1 и EL₂, переключатель S₂, дистанционное управление – «автоматика», выключатель S1.

При дистанционном режиме управления схема работает следующим образом: переключатель S2 устанавливается в положение 1, с помощью выключателя S1 на схему подается питание напряжением 220 В. Дальнейшее управление осуществляется пусковой кнопкой SB1, при нажатии которой по цепи, состоящей из SB1, кнопки «стоп» SB2 и катушки электромагнитного реле K1, протекает ток. Реле K1 срабатывает, замыкается контакт K1.1, что позволяет отпустить кнопку SB1. Замыкание контакта K1.2 включает лампу EL1, размыкание контакта K1-3 отключает лампу E1-2. Контакт K1-4 включает электрический нагреватель EK под напряжение. Выключение электронагревателя осуществляется с помощью кнопки SB2, которая разрывает цепь питания катушки K1.

При автоматическом режиме управления переключатель S2 устанавливается в положение 3. При этом режиме управление схемой определяется состоянием контактов SK1 и SK2, зависящим от температуры объекта регулирования.

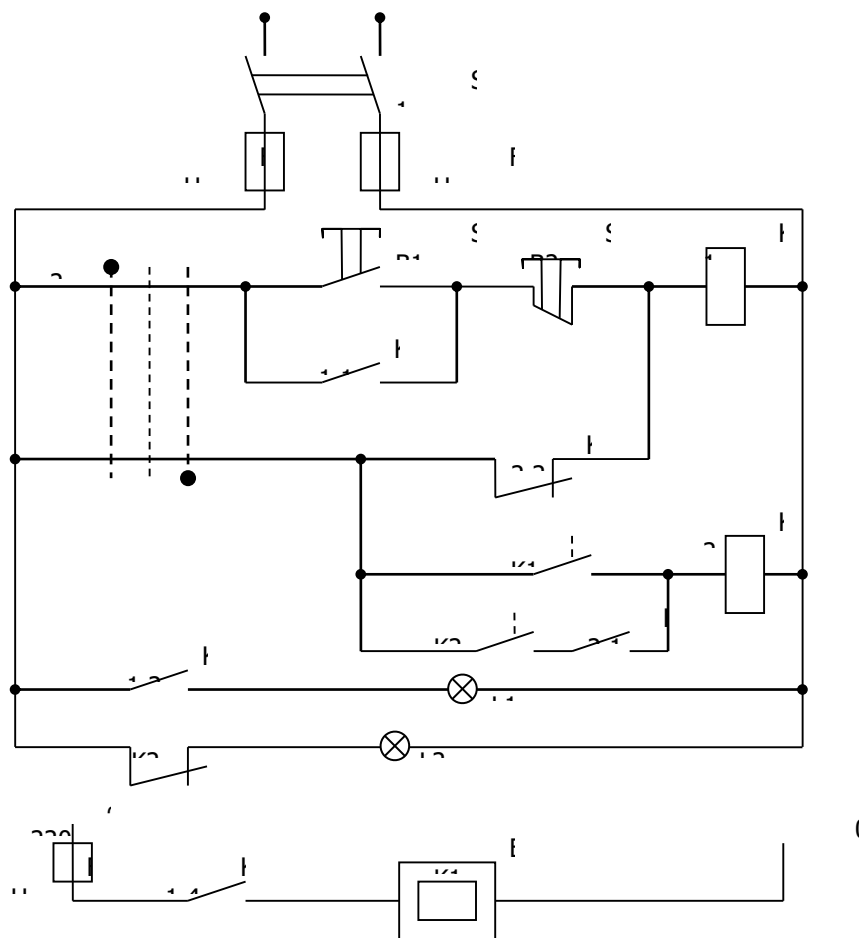
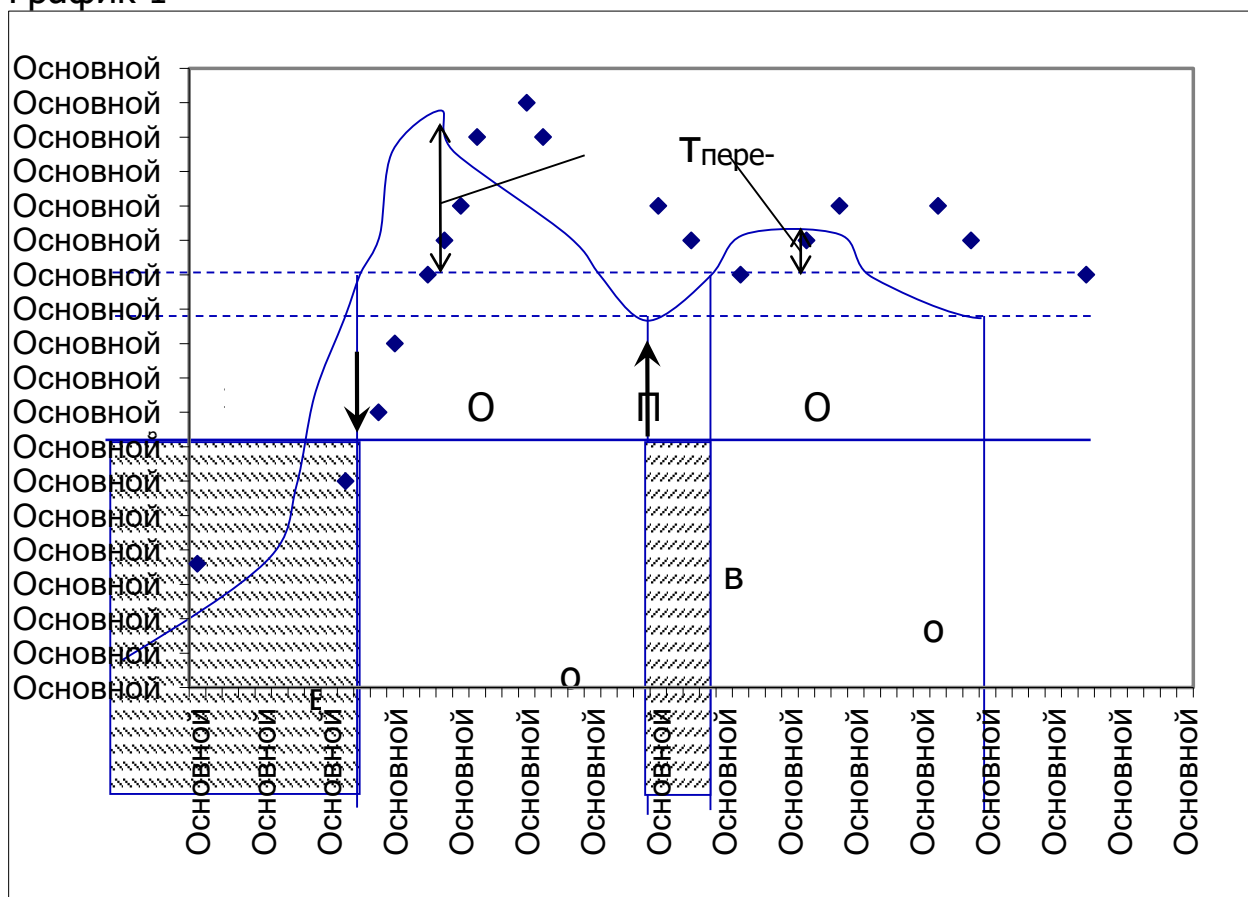


Рисунок 2. Схема лабораторной установки

					min	max			
T, °C	18	30	40	50	60	65	70	80	85
t	0	8,55	11	12	14	15	15,35	17	20
					33	30	28,30	21	
						37,20	38,40		
					54	47,30	45,30		

График 1



Вывод:

По принципу - САР рефлексная, т.е. с жесткими обратными связями. При достижении максимальной заданной температуры действует ООС, все отключается, а при достижении минимальной температуры действует ПОС, в результате человек исключен из процесса управления.

Главное достоинство: имеется участок характеристики с отключенным нагревательным элементом; экономия теплоэнергетических ресурсов.

Используется в нагревателях битума, скользящих опалубках ЖБИ и т.п.

Недостатки:

Неравномерная шкала, точность $\pm 5^\circ\text{C}$. Очень большая инерционность, что приводит к дополнительным потерям. Отсутствует обратная связь с независимыми параметрами (температура окружающей среды, ход технологического процесса).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №15 **Исследование работы автоматизированной** **насосной станции**

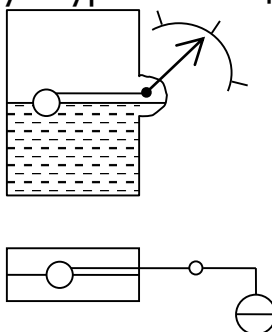
Цель работы: - ознакомиться с устройством и принципом действия основных приборов для контроля жидкости;
- изучить работу автоматизированной насосной станции в режимах ручного и автоматического управления, а также в аварийных режимах.

Основные операции, которые выполняются на насосных станциях автоматически:

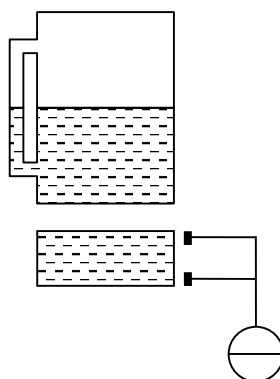
- включение и выключение одного или нескольких насосных агрегатов в определенной последовательности;
- отключение работающего насоса при нарушении режима его работы и включение резервного насоса;
- передача сигналов о работе агрегатов и аварийных ситуациях на диспетчерский пункт.

Наиболее распространены:

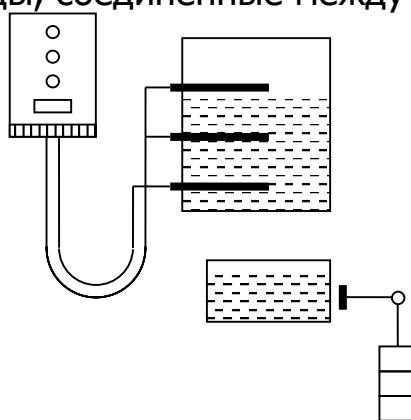
а) Поплавковые уровнемеры, основным элементом является поплавок, частично погруженный в жидкость. Перемещаясь по вертикали, он с помощью указателя фиксирует уровень жидкости.



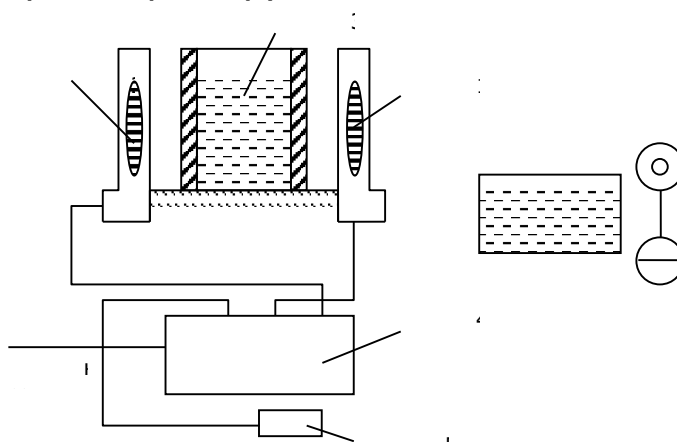
б) Визуальные уровнемеры, построенные по принципу сообщающихся сосудов. Уровнемер имеет стекло 1, закрепленное так, что середина его находится на высоте требуемого уровня.



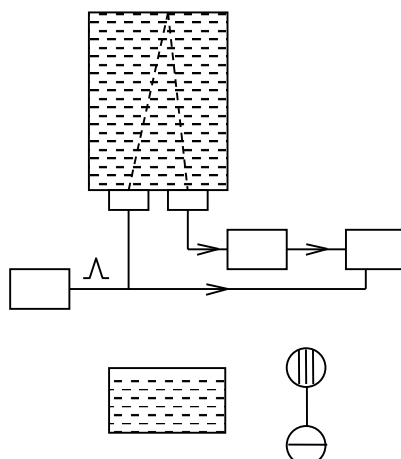
в) Емкостные уровнемеры, которые включают в себя высокочастотный генератор и электроды, соединенные между собой кабелем.



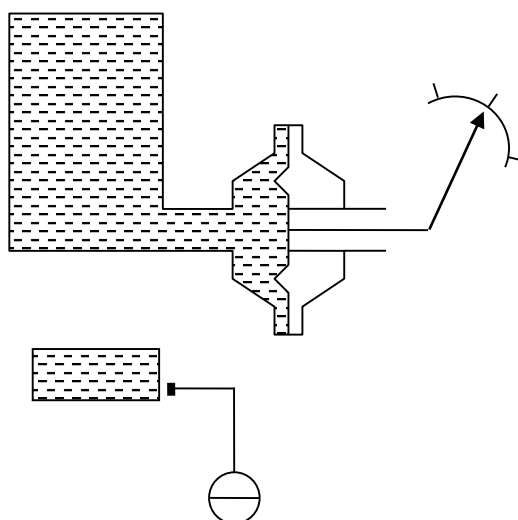
г) радиоактивные уровнемеры используют явление изменения интенсивности γ -излучения при прохождении его через вещество. Источник 1 и приемник 2 (счетчик) гамма-излучения устанавливают с разных сторон сосуда 3, уровень жидкости в котором измеряют. При изменении уровня изменяется интенсивность лучей, поступающих через усилитель 4 в счетчик 5, который и фиксирует эти изменения.



д) ультразвуковые уровнемеры, принцип действия которых основан на измерении времени прохождения ультразвукового импульса от дна резервуара до поверхности жидкости и обратно.



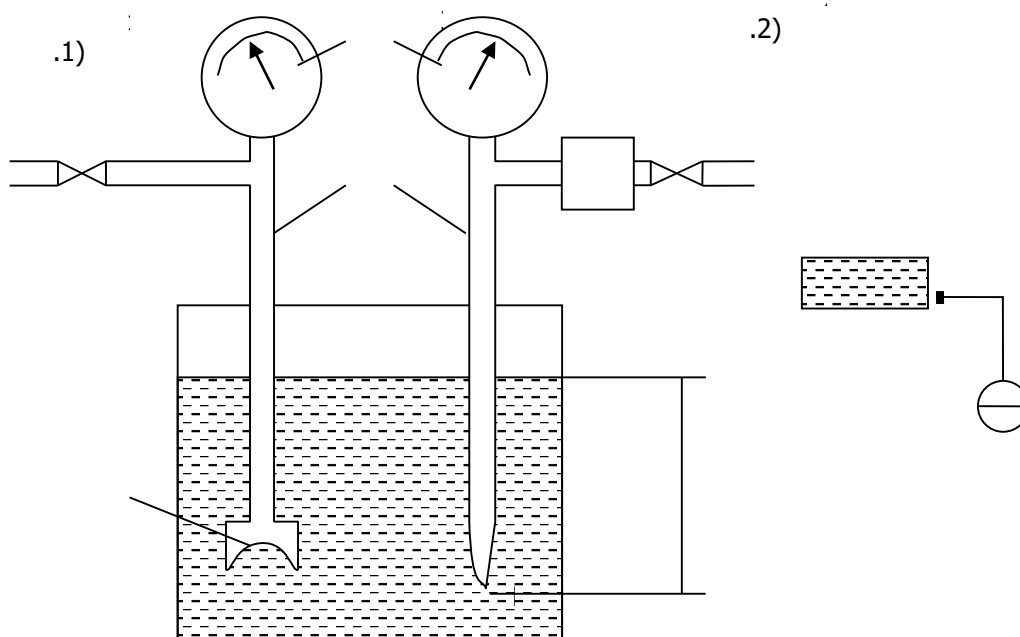
е) мембранные уровнемеры, принцип действия которых основан на уравнивании давления гидростатического столба жидкости силой упругой деформации мембраны. Под действием давления мембрана прогибается. Вместе с ней прогибается пружина и перемещается стрелка 3.



ж) При измерении уровня жидкости в резервуарах, расположенных ниже мест установки уровнемера, могут использоваться колокольный и пневмометрический уровнемеры.

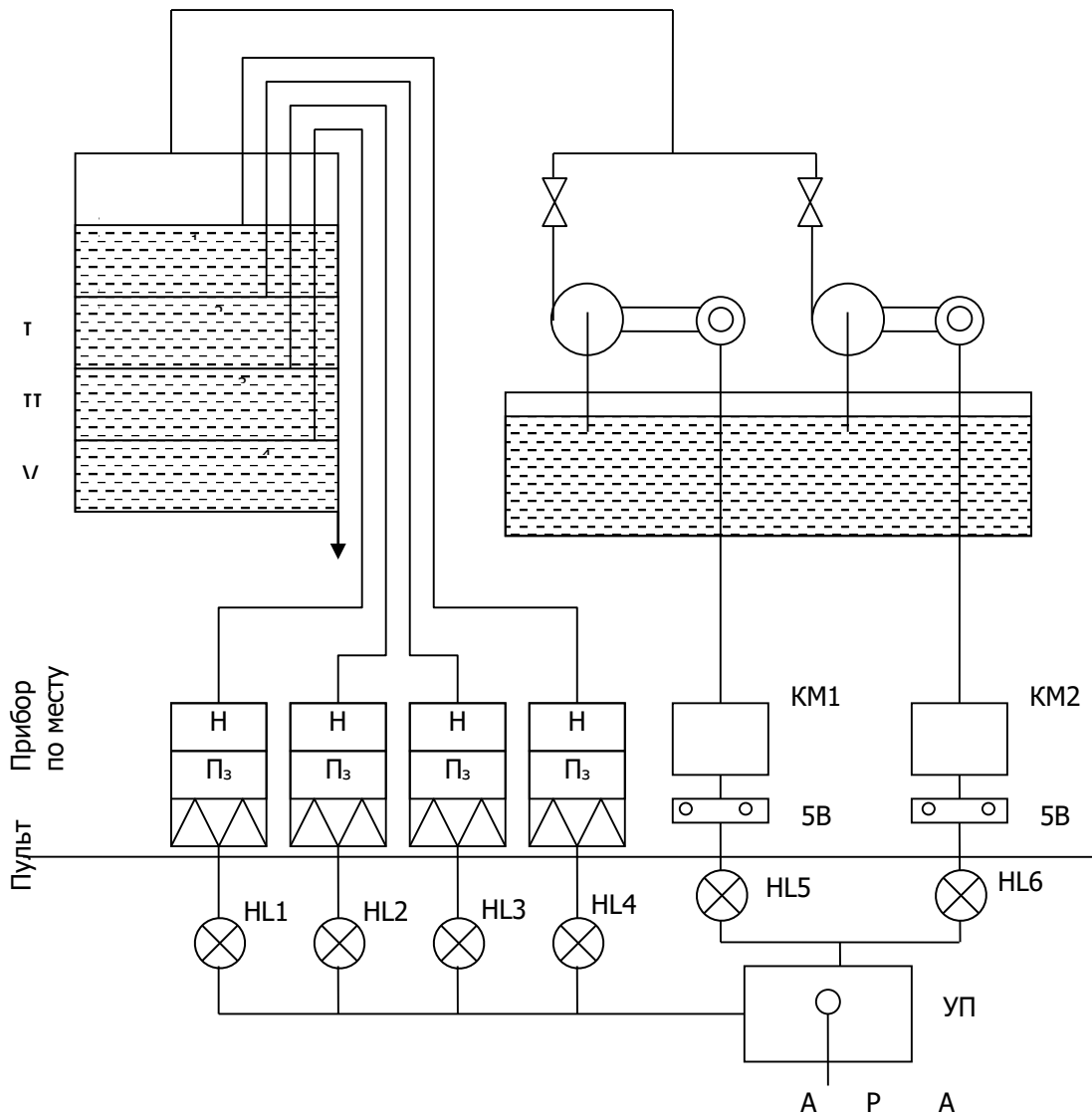
ж.1) Колокольный уровнемер:

При измерении в агрессивной жидкости нижняя часть колокола может закрываться гибкой мембраной. Подъем или снижение уровня жидкости внутри колокола или прогиб мембраны изменяет объем воздуха, зажатого в колоколе и соединенной с ним трубкой. При этом изменяется давление, фиксированное с помощью манометра.



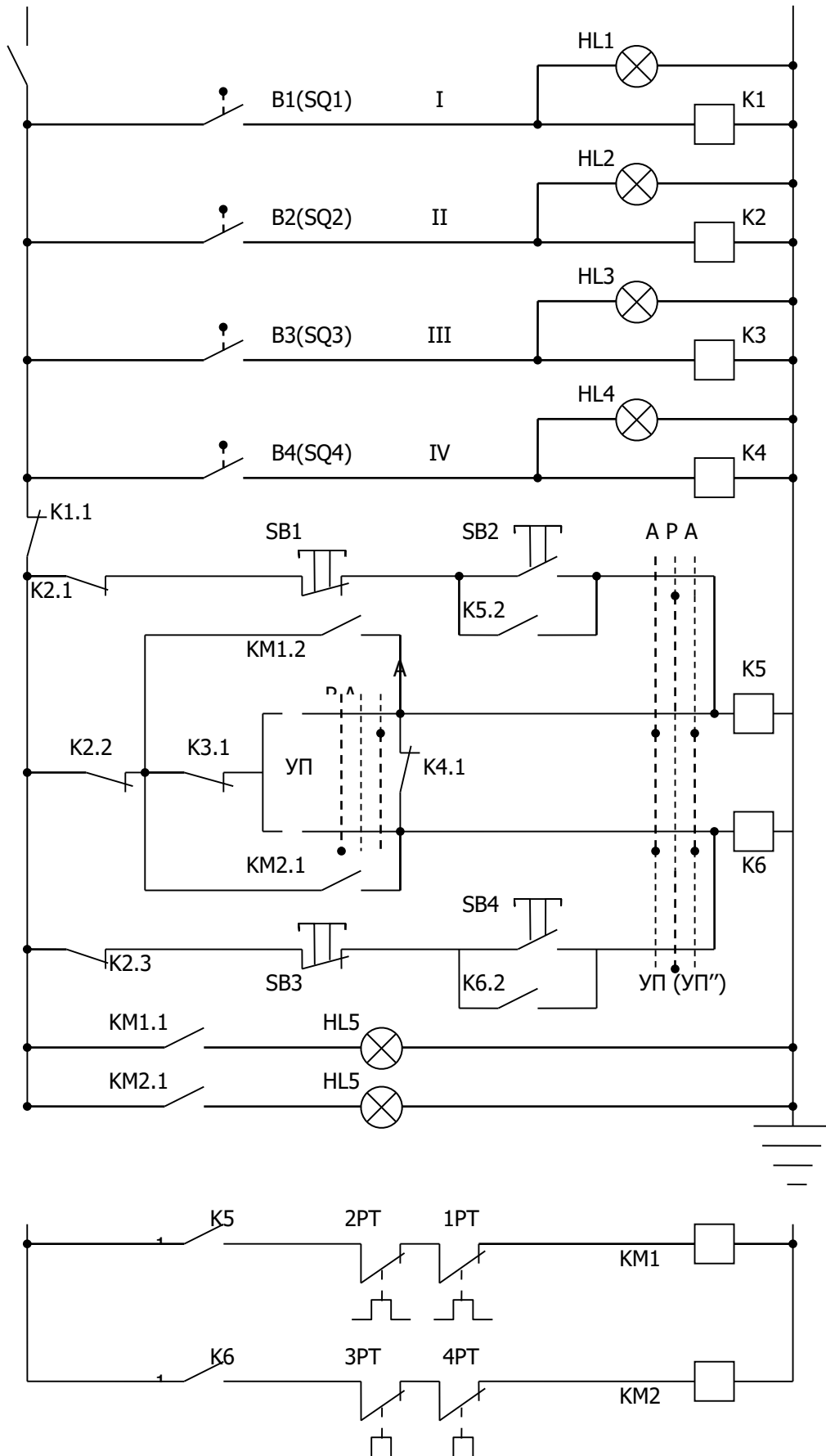
ж.2) Пневмометрический уровнемер:

Соединительную трубку 2 погружают в емкость практически до самого дна и продувают через нее воздух с постоянным давлением и расходом, что обеспечивается редуктором 4. При измерении уровня жидкости таким способом используется строгая закономерность: давление воздуха P у конца трубки равно длине погруженной части H , умноженной на удельный вес жидкости. Изменение уровня жидкости приводит к изменению давления в трубке из-за увеличения или уменьшения аэродинамического сопротивления столба жидкости, что фиксируется манометром 3.



Принципиальная электрическая схема автоматизированной насосной установки

з) Электродные уровнемеры, относящиеся к классу электрических приборов для измерения уровня, получили достаточно широкое рас



распространение в устройствах автоматического управления насосами водоснабжения и канализационными насосными станциями. Основным элементом таких приборов являются электродные датчики, (например, стержневые), изготовленные из нержавеющей стали, меди или латуни, которые помещаются в резервуар, уровень жидкости в котором необходимо регулировать. При соприкосновении электродов с жидкостью замыкаются цепи питания сигнальных устройств или релейных блоков, управляющих работой насосных агрегатов.

Вывод: основным управляющим звеном автоматической насосной станции является электродное реле уровня четырехпозиционное.

B1 (SQ1) контролирует верхний аварийный уровень, B2 (SQ2) – верхний рабочий уровень, B3 (SQ3) – нижний рабочий уровень, B4 (SQ4) – нижний аварийный уровень.

Если уровень жидкости находится в номинальных (рабочих) пределах, то автоматически включается двигатель одного насоса на наполнение или на откачку резервуара (в зависимости от технологии). При выходе уровня за рабочие пределы автоматически включаются два насоса.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №16

Тема: Пуск/Останов котельной

Цель работы: Получить практические навыки об основных этапах пуска/останова котельной.

Ход работы:

Лабораторная работа выполняется с помощью программы «Автоматизация технологических процессов АТП-01», подключенной к лабораторному стенду (см. п.4.2.1 Руководства по эксплуатации стенда АТП-01, далее Руководство).

Основные этапы процессов пуска/останова стенда котельной перечислены в п.4.2.2 Руководства.

Произвести пуск котельной с заполнением системы теплоносителем.

Вывести на **заданные**¹ режимы, заполнить «Таблицу параметров пуска/останова котельной», сохранить в компьютере и по возможности распечатать на принтере графики: нагрева теплоносителя, расхода электроэнергии, потерь тепла, давление в «Прямой» и «Обратки», потерь теплоносителя.

Оформить результаты (индивидуально по усмотрению преподавателя).

Таблица параметров пуска/останов котельной:

Время изме- рения	Р. Кг/см ² «Пря- мая»	Р. Кг/см ² «Об- ратна»	Т, С" «Пря- мая»	Т, С" «Пря- мая»	Р. Гц. Преоб- разова- теля	Q1, литр «Пря- мая»	Q2 .литр «Пря- мая»	Q2 .литр «Под- питки

Останов котельной, производится в обратном порядке за исключением, что записываются параметры температур расхолаживания, а не нагрева теплоносителя.

1) Заданные режимы, такие как температура, за котлом, давление в «Обратке» установить во вторичных преобразователях

«Радон Риц» согласно приложению №3. Давление в «Прямой» устанавливается в программе «Модель котельной АТ-01» во вкладке «Сетевой насос».

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №17

Тема: Применение ПИД-регулирования в котельной

Цель работы: Получить практические и теоретические навыки использования ПИД- регулирования для поддержания заданных параметров системы на заданном уровне.

Ход работы:

Лабораторная работа выполняется с использованием программы «Автоматизация технологических процессов АТП-01». Для проведения лабораторной работы необходимо перевести пуск котельной перевести в «замкнутое состояние» (п.4.2.2 Руководства), наблюдение за переходными процессами, происходящими при ПИД-регулировании и выставление параметров ПИД-регулятора, рассматривается в п.4.2.5 Руководства.

Общая методика наблюдения за переходными процессами при ПИД-регулировании следующая:

- подготовка действий по заданию возмущений в регулируемом процессе;
- включение сбора информации о переходном процессе;
- выполнение действий, приводящих к возмущению;

- настройка параметров ПИД-регулятора с целью успешного урегулирования процесса;
- экспортирование данных по переходному процессу.
- оформление работы (индивидуально по усмотрению преподавателя.) Рекомендуемые методы создания возмущений в системе:
 1. закрытие/открытие вентилей отключения потребителей тепла (производится в ручную)
 2. закрытие/открытие регулирующего клапана для искусственного создания потерь теплоносителя в системе отопления потребителя (производится из программы).
 3. отключение подпиточного насоса (производится из программы).
 4. кратковременное закрытие запорного клапана отключения потребителя на подающем трубопроводе («Прямая»), (Производится из программы).
 5. перевод системы из замкнутого состояния в пусковой режим (производится из программы).
 6. резкое изменение частоты вращения двигателя сетевого насоса (производится из программы путем настройки ПИД-регулятора).
 7. кратковременное открытие/закрытие вентилей воздушников радиаторов отопления (производится в ручную).Все методы выбираются индивидуально по усмотрению преподавателя.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №18.

Тема: Расчет тепловой энергии и тепловой мощности.

Цель работы: Приобрести теоретические и практические навыки в расчете тепловой энергии, полученной потребителями.

Ход работы: Лабораторная работа выполняется с использованием программы «Автоматизация технологических процессов АТП-01». Для проведения лабораторной необходимо, чтобы на стенде установился процесс нагрева (температура теплоносителя держится на одном уровне). Автоматический расчет потребляемого пользователями тепла начинает проводиться в режиме расчета тепловой энергии (п.4.2.7 Руководства)

Расчет отданной потребителям тепловой энергии проводится в соответствии с Рекомендацией МИ 2412-97, приведенной в Приложении №4 Руководства.

Необходимо провести данные расчеты за выбранный промежуток времени и сравнить их с автоматически рассчитанными программой.

Оформление работы (индивидуально по усмотрению преподавателя.)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №19

Тема: Процесс нагрева теплоносителя в котле

Цель работы: Исследовать процесс нагрева теплоносителя котельной.

Ход работы: Лабораторная работа выполняется с использованием программы «Автоматизация технологических процессов АТП-01»

Для проведения данной работы необходимо произвести пуск котельной, перейти из пусковой схемы в рабочую «замкнутое состояние», затем включить котел и сбор данных о нагреве котла (п. 4.2.6 и 4.2.7 Руководства). Провести нагрев теплоносителя до тех пор, пока процесс нагрева не остановится, пронаблюдать графики кривой нагрева котла, потерь температуры теплоносителя и сделать соответствующие выводы.

Провести нагрев теплоносителя, включив экономайзер до тех пор, пока процесс нагрева не остановится, пронаблюдать графики кривой нагрева котла, потерь температуры теплоносителя и сделать соответствующие выводы.

Оформить работу (индивидуально по усмотрению преподавателя.)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №20

Тема: Создание и обработка аварийных ситуаций

Цель работы: Получить знания о возможных аварийных ситуациях и навыки их обработки и устранения.

Ход работы: Лабораторная работа может выполняться как с использованием программы «Автоматизация технологических процессов АТП-01» (в основном для создания глобальных аварийных ситуаций), так и напрямую на стенде (в основном для создания локальных аварийных ситуаций).

К глобальным аварийным ситуациям можно отнести те, которые могут потребовать вмешательства оператора и грозят остановкой работы котельной.

К локальным аварийным ситуациям можно отнести те, которые решаются автоматикой стенда и не требуют вмешательства оператора. Также могут привести к остановке технологического процесса.

Аварийные ситуации, которые могут быть воспроизведены на стенде, приведены в п.4.2.10 Руководства.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №21

Тема: Измерение затраченной электроэнергии на выработку необходимого количества тепла (возможность имитации включения экономайзера котла).

Цель работы: Получить знания о затратах электроэнергии на нагрев теплоносителя.

Ход работы: Лабораторная выполняется с использованием программы «Автоматизация технологических процессов АТП-01».

- Произвести обнуление показаний счетчика электроэнергии в программе (закладка «Файл» пункт «сброс параметров тепловычислителя»),

- Включить сбор данных в программе (закладка «Кривая нагрева» в пункте «Затраченная электроэнергия» установить галочку, сбросить данные.).

- Произвести пуск котельной в рабочий режим «Замкнутое состояние».

- Выйти на установленный режим нагрева теплоносителя.

- Экспортировать данные затраченной электроэнергии.

- Произвести анализ и необходимые расчеты затрат электроэнергии.

- Включить экономайзер котла выйти на заданный режим (дождаться, когда процесс успокоится после возмущения).

- Произвести анализ и необходимые расчеты затрат электроэнергии.

- Сравнить расчеты сделать выводы.

Оформить результаты работы (индивидуально по усмотрению преподавателя).

22. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курс UniTrain-I "Автоматическое управление температурой, скоростью и светом", www.unitrain-i.com.

2. В.А. Бесекерский, Е.П. Попов «Теория автоматического управления», СПб, Изд-во «Профессия», 2003.-752с.

3. Л.Д. Певзнер «Практикум по теории автоматического управления»: Учеб. пособие-М.: Высш. шк., 2006.-590с.

4. Современные системы управления/ Р. Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б.И. Копылова.- М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002.-832 с.:ил.