

**Н. С. Благодарный**

**УПРАВЛЕНИЕ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ  
СИСТЕМАМИ**

**ЧАСТЬ 1**

**Практикум**

**Санкт-Петербург  
2024**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«Санкт-Петербургский государственный университет  
промышленных технологий и дизайна»  
Высшая школа технологии и энергетики**

**Н. С. Благодарный**

**УПРАВЛЕНИЕ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ  
СИСТЕМАМИ**

**ЧАСТЬ 1**

**Практикум**

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург  
2024

**УДК 621.314.26(07)**  
**ББК 32.965.3я7**  
**Б 681**

*Рецензент*

кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-измерительных технологий  
и систем управления Высшей школы технологии и энергетики  
Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна  
*А. В. Бахтин*

**Благодарный, Н. С.**

**Б 681** Управление электромеханическими системами. Часть 1: практикум /  
Н. С. Благодарный. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. — 59 с.

Практикум соответствует программам и учебным планам дисциплины «Управление электромеханическими системами» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». В практикуме представлены пять лабораторных работ, даны рекомендации по их выполнению. Лабораторные работы посвящены изучению основ построения, моделирования и исследования типовых структур систем управления технологическими и электромеханическими объектами.

Практикум предназначен для подготовки бакалавров всех форм обучения.

УДК 621.314.26(07)  
ББК 32.965.3я7

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2024  
© Благодарный Н. С., 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	5
1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 .....	7
1.1. Цель и задачи работы .....	7
1.2. Теоретическая часть .....	7
1.3. Описание объекта исследования .....	9
1.4. Задание .....	9
1.5. Указания по выполнению работы .....	9
1.6. Порядок выполнения работы .....	10
1.7. Требования к оформлению отчета .....	12
1.8. Вопросы для самопроверки .....	13
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 .....	14
2.1. Цель и задачи работы .....	14
2.2. Теоретическая часть .....	14
2.3. Описание объекта исследования .....	15
2.4. Задание .....	15
2.5. Указания по выполнению работы .....	16
2.6. Порядок выполнения работы .....	17
2.7. Требования к оформлению отчета .....	19
2.8. Вопросы для самопроверки .....	20
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 .....	21
3.1. Цель и задачи работы .....	21
3.2. Теоретическая часть .....	21
3.3. Описание объекта исследования .....	23
3.4. Задание .....	23
3.5. Указания по выполнению работы .....	24
3.6. Порядок выполнения работы .....	25
3.7. Требования к оформлению отчета .....	27
3.8. Вопросы для самопроверки .....	28
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 .....	29
4.1. Цель и задачи работы .....	29
4.2. Теоретическая часть .....	29
4.3. Описание объекта исследования .....	31
4.4. Задание .....	34
4.5. Указания по выполнению работы .....	34
4.6. Требования к оформлению отчета .....	36
4.7. Вопросы для самопроверки .....	36

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 .....	37
5.1. Цель и задачи работы .....	37
5.2. Теоретическая часть .....	37
5.3. Описание объекта исследования .....	39
5.4. Задание .....	40
5.5. Указания по выполнению работы .....	40
5.6. Порядок выполнения работы .....	43
5.7. Требования к оформлению отчета .....	45
5.8. Вопросы для самопроверки .....	46
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	47
ПРИЛОЖЕНИЕ. НАЗНАЧЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА .....	48
1. ИНСТРУКЦИЯ ПО РАБОТЕ С ПРОГРАММОЙ .....	49
1.1. Открытие нового окна редактора .....	49
1.2. Выбор и установка блока на наборную панель .....	49
1.3. Удаление содержимого ячейки редактора .....	50
1.4. Соединительные линии между блоками .....	50
1.5. Установка параметров блока .....	50
1.6. Отметка контрольных точек .....	50
1.7. Копирование, перемещение и удаление фрагментов схемы .....	50
1.8. Вставка комментария .....	51
1.9. Сохранение схемы системы в файл .....	52
1.10. Загрузка схемы из файла .....	52
1.11. Работа с макровставками .....	52
2. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММЫ .....	53
2.1. Построение переходного процесса .....	53
2.2. Построение фазового портрета .....	53
2.3. Построение ЛАЧХ/ФЧХ .....	54
3. БИБЛИОТЕКА БЛОКОВ .....	54
3.1. Генераторы .....	54
3.2. Сумматоры .....	55
3.3. Линейные звенья .....	55
3.4. Нелинейные звенья .....	56
3.5. Макросы .....	58

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данный практикум содержит пять лабораторных работ по дисциплине «Управление электромеханическими системами», а также рекомендации по их выполнению. Лабораторные работы охватывают первую часть (семестр) двухсеместрового курса и посвящены изучению основ построения, моделирования и исследования типовых структур систем управления технологическими и электромеханическими объектами. В этих работах изучаются следующие разделы дисциплины:

- одноконтурные, каскадные и комбинированные системы управления общепромышленными механизмами (типовые законы регулирования, основные методы расчета настроек регуляторов);
- особенности работы и конструктивные особенности бесконтактного моментного привода;
- нормирование координат, системы подчиненного регулирования.

Каждая лабораторная работа содержит:

- теоретическую часть, в которой описаны основные теоретические сведения по теме выполняемой работы;
- исполняемую часть лабораторной работы в виде указаний по выполнению работы в аудитории на ЭВМ;
- расчетную часть, посвященную исследованию системы управления, расчету и построению ее характеристик;
- требования к составлению отчета по лабораторной работе;
- вопросы для самопроверки, знание ответов на которые позволит успешно защитить лабораторную работу.

Исполняемая часть всех лабораторных работ выполняется в программном комплексе «Анализ систем».

В дисциплине «Управление электромеханическими системами» изучаются эффективные структуры систем управления самыми разнообразными по физической природе объектами, но упор делается на управление электроприводными системами. Вторая и третья работы посвящены управлению технологическими объектами, но рассмотренные структуры широко используются и для управления электромеханическими системами. Остальные работы посвящены построению систем управления электроприводами.

В приложение к лабораторному практикуму включено краткое описание программного комплекса «Анализ систем».

В таблице 1.1 указаны темы, которым посвящены лабораторные работы и примерная трудоемкость их выполнения в часах. Часы аудиторной работы тратятся на выполнение лабораторной работы на ЭВМ. Часы самостоятельной работы студента (СРС) тратятся на освоение теоретической части, выполнение расчетной части лабораторной работы и оформление отчета.

Таблица 1.1 – Содержание и трудоемкость лабораторных работ

№ л. р.	Тема	Аудиторные часы	Часы СРС
1	Одноконтурные системы управления общепромышленными механизмами	2	1
2	Каскадные системы управления общепромышленными механизмами	4	4
3	Комбинированные системы управления общепромышленными механизмами	4	4
4	Особенности работы и конструктивные особенности БМП	2	3
5	Системы подчиненного регулирования	6	6
	ВСЕГО	18	18

# 1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## «Принципы моделирования автоматических систем. Построение и настройка ПИД-регулятора»

### 1.1. Цель и задачи работы

Изучение принципов моделирования систем автоматического управления для исследования их динамических свойств. Знакомство с программным комплексом «Анализ систем». Построение системы управления технологическим объектом, настройка и расчет ПИД-регулятора.

### 1.2. Теоретическая часть

Одноконтурная система автоматического управления (САУ) обеспечивает выполнение задачи стабилизации или регулирования выходной переменной объекта управления (ОУ)  $y(t)$ , путем подачи на его вход управляющего воздействия  $u(t)$ . Полная структурная схема САУ показана на рисунке 1.1. Здесь: З – задающее устройство; АУУ – автоматическое управляющее устройство (регулятор); УМ – усилитель мощности; ИМ – исполнительный механизм; РО – рабочий орган (клапан); Д – датчик (измеряющее устройство); П – преобразователь сигнала.

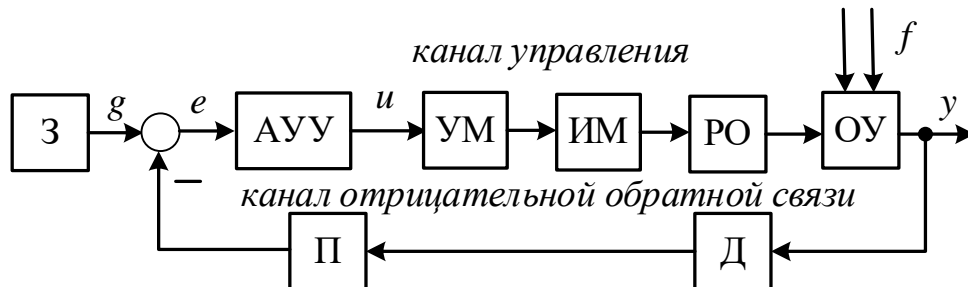


Рисунок 1.1 – Структурная схема САУ

Для анализа и расчета САУ обычно используют упрощенную структурную схему, состоящую из регулятора с передаточной функцией  $R(p)$ , и ОУ, имеющего передаточную функцию  $W_0(s)$ . Остальные устройства САУ, считаются входящими в состав ОУ (см. рисунок 1.2) [1].

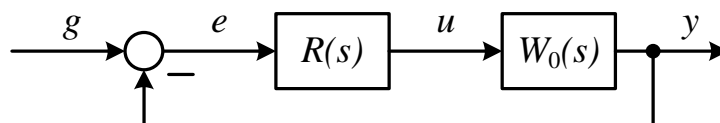


Рисунок 1.2 – Упрощенная структурная схема САУ



Технологические ОУ часто обладают запаздыванием, обусловленным тем, что рабочий орган может располагаться вдалеке от объекта, и поток вещества движется по трубопроводу некоторое время  $\tau$ . Существуют специальные методы для расчета настроек типовых регуляторов для объектов с запаздыванием. Наиболее известные из них: сложный метод – расширенных частотных характеристик и простой метод – незатухающих колебаний.

Рассмотрим второй из них. В соответствии с этим методом расчет настроек регулятора проводится в два этапа: 1) расчет критической настройки  $K_1^{кр}$  пропорционального регулятора, при которой САУ будет находиться на границе устойчивости и определение критической частоты  $\omega^{кр}$  незатухающих колебаний; 2) определение по приближенным формулам рабочих настроек, обеспечивающих для большинства объектов приемлемую степень затухания  $\psi \cong 0,75$  и сравнительно небольшую динамическую ошибку.

Этап 1. Согласно критерию Найквиста замкнутая САУ будет находиться на границе устойчивости, если АФХ разомкнутой системы проходит через точку с координатами  $(-1, j 0)$ , т. е. для некоторого значения частоты (обозначим ее  $\omega^{кр}$ ) будет выполняться соотношение  $W_{раз}(j \cdot \omega^{кр}) = -1$ . Последнее уравнение можно переписать в виде:

$$W_{раз}(j \cdot \omega^{кр}) = R(j \cdot \omega^{кр}) \cdot A_o(\omega^{кр}) \cdot e^{j\varphi_o(\omega^{кр})} = -1. \quad (1.1)$$

Учитывая, что для П-регулятора  $R(j \cdot \omega^{кр}) = K_1^{кр}$ , окончательно получаем:  $K_1^{кр} \cdot A_o(\omega^{кр}) \cdot e^{j\varphi_o(\omega^{кр})} = -1$ , или

$$\begin{cases} K_1^{кр} \cdot A_o(\omega^{кр}) = 1; \\ \varphi_o(\omega^{кр}) = -\pi. \end{cases} \quad (1.2)$$

Из системы уравнений требуется определить критическую частоту  $\omega^{кр}$  и критический коэффициент передачи П-регулятора  $K_1^{кр}$ . Эту систему уравнений можно решить либо подбором, либо численным поисковым методом на ЭВМ.

При решении задачи подбором сначала из второго уравнения системы подбирается критическая частота  $\omega^{кр}$ , а затем из первого уравнения определяется критический коэффициент передачи П-регулятора  $K_1^{кр}$ .

При решении системы уравнений на ЭВМ удобно использовать математический пакет Mathcad.

Этап 2. Искомые значения  $\omega^{кр}$  и  $K_1^{кр}$  используются для вычисления настроечных коэффициентов П-, ПИ- или ПИД-регулятора по формулам [2]:

для П-регулятора с передаточной функцией:  $R(p) = K_1$ :

$$K_1 = 0,5 \cdot K_1^{кр};$$

для ПИ-регулятора с передаточной функцией:  $R(p) = K_1 + K_0/p$ :

$$K_1 = 0,45 \cdot K_1^{\text{кр}}; \quad K_0 = 0,086 \cdot K_1^{\text{кр}} \cdot \omega^{\text{кр}};$$

для ПИД-регулятора с передаточной функцией:  $R(p) = K_1 + K_0/p + K_2 \cdot p$ :

$$K_1 = 0,6 \cdot K_1^{\text{кр}}; \quad K_0 = 0,192 \cdot K_1^{\text{кр}} \cdot \omega^{\text{кр}}; \quad K_2 = 0,471 \cdot K_1^{\text{кр}} / \omega^{\text{кр}}.$$

После нахождения настроечных коэффициентов передаточную функцию регулятора необходимо привести к стандартному виду, например для ПИД-регулятора к виду:  $R(p) = k_n(1 + 1/T_{ин}p + T_{дн}p)$ .

### 1.3. Описание объекта исследования

Исследованию подлежит замкнутая одноконтурная система управления с ПИД-регулятором и объектом, описываемым апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием  $W_o(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau_0 \cdot p}}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$ .

### 1.4. Задание

1.4.1. Изучить принципы моделирования систем автоматического управления в программном комплексе «Анализ систем».

1.4.2. Построить одноконтурную систему с ПИД законом регулирования. Экспериментально настроить ПИД-регулятор. Построить переходные процессы в одноконтурной системе регулирования при подаче ступенчатого задающего и возмущающего воздействий.

1.4.3. Вычислить критический коэффициент  $K_1^{\text{кр}}$  П-регулятора и частоту  $\omega^{\text{кр}}$  незатухающих колебаний. Выставить рассчитанный коэффициент П-регулятора в модели системы и убедиться в возникновении незатухающих колебаний с частотой  $\omega^{\text{кр}}$ .

1.4.4. Рассчитать настройки ПИД-регулятора методом незатухающих колебаний, сравнить расчетные значения настроек с экспериментальными, полученными в п. 1.4.2. Установить рассчитанные настройки ПИД-регулятора и вновь повторить построение переходных процессов.

1.4.5. Определить прямые показатели качества и используя их, сравнить переходные процессы, полученные с экспериментально настроенным и рассчитанным регуляторами. Для сравнения найденных показатели качества каждой из систем их следует свести в таблицу.

### 1.5. Указания по выполнению работы

1.5.1. Построение моделей автоматических систем и их исследование выполняется в программном комплексе «Анализ систем», описание которого приведено в Приложении.

1.5.2. Параметры объекта управления указаны в таблице 1.2 и выбираются в соответствии с номером варианта.

1.5.3. Расчет настроек регулятора целесообразно осуществить в пакете Mathcad.

## 1.6. Порядок выполнения работы

1.6.1. Изучите принципы моделирования в пакете «Анализ систем», описанные в разделе 1 Приложения.

В соответствии с описанием этого раздела на наборной панели пакета «Анализ систем» установите блоки генераторов постоянного (ступенчатого) и гармонического (синусоидального) сигналов. Задайте следующие параметры блоков: для генератора постоянного сигнала – величину воздействия  $K = 0,8$ ; для генератора гармонического сигнала – амплитуду выхода  $A = 2$ , частоту  $f = 0,3$ . Прокомментируйте названия блоков, на выходе блоков отметьте контрольные точки (осциллографы).

Таблица 1.2 – Варианты заданий

ПФ объекта	№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. $W_o(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau_o \cdot p}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$	$k$	0,6	1,3	2,8	3,2	4,7	1,9	0,4	1,4	0,8	1,1
	$T_1$	1,2	4,0	3,3	4,6	0,7	1,8	2,0	3,0	1,5	2,0
	$T_2$	0,8	2,2	4,7	1,8	2,6	5,2	0,9	3,0	2,8	3,0
	$\tau_o$	1,5	2,5	1,2	2,5	1,9	3,6	0,7	1,8	2,0	4,0
ПФ объекта	№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1. $W_o(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau_o \cdot p}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$	$k$	0,8	2,7	0,6	1,3	2,8	3,2	4,7	1,9	0,4	2,2
	$T_1$	4,0	1,2	2,5	3,3	4,6	0,7	1,8	2,0	3,0	5,8
	$T_2$	1,3	3,7	4,8	8,3	1,4	2,5	6,3	5,2	7,7	3,4
	$\tau_o$	7,2	2,8	3,5	5,7	1,2	2,3	4,5	4,1	5,5	2,9

Постройте переходные процессы обоих сигналов в соответствии с описанием п. 2.1. Приложения (шаг расчета удобно выбрать, равным 0,01 с).

Для оформления отчета по лабораторной работе построенные графики и схемы необходимо сохранять в созданном Вами файле текстового редактора Word. Для этого, нажав правой кнопкой мыши на области графического окна, вызывается контекстное меню, и выбирается команда «Копировать как картинку» – «Весь график» (для графиков) или «Копировать как рисунок» – «Все» (для схем). Далее эти схемы и графики вставляются из буфера памяти в Ваш файл редактора Word и снабжаются комментариями (см. рисунок 1.3).

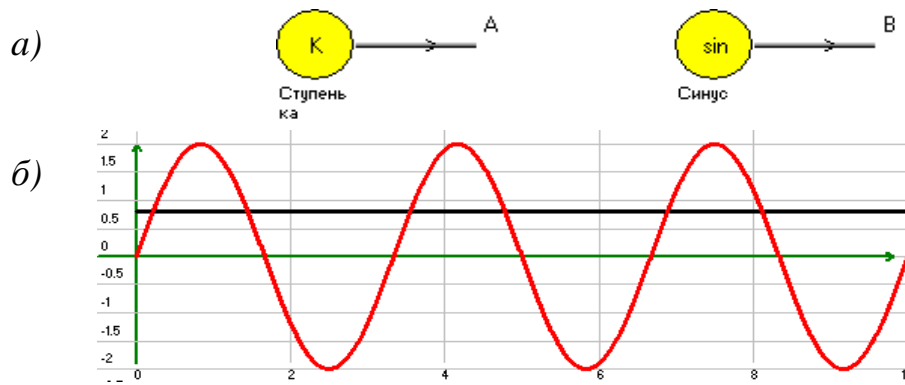


Рисунок 1.3 – Схемы (а) и графики (б) ступенчатого и гармонического воздействий

Полученные сигналы часто используются в качестве тестовых сигналов при исследовании систем управления. В качестве примера исследуйте переходные процессы колебательного звена при изменении его параметров: постоянной времени, коэффициента демпфирования и коэффициента усиления (см. рисунок 1.4). Описание результатов исследования включите в отчет.

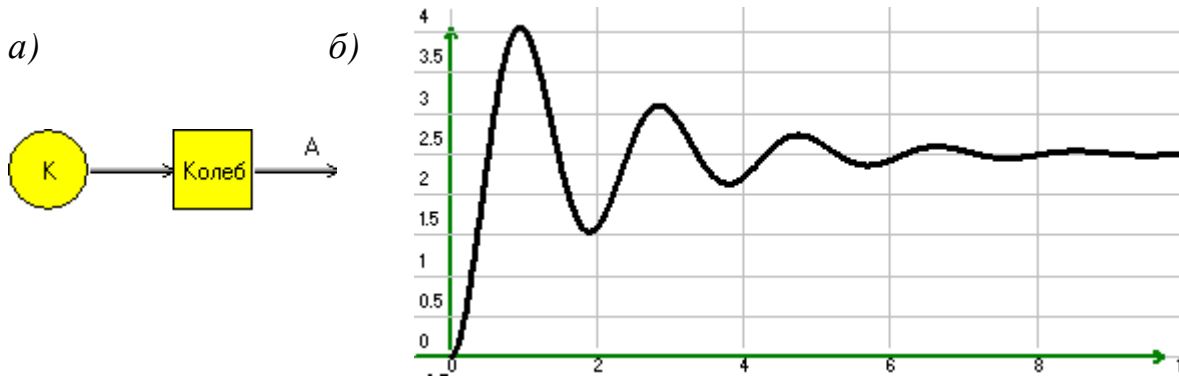


Рисунок 1.4 – Схема (а) и переходный процесс (б) колебательного звена

1.6.2. Постройте одноконтурную систему управления объектом с ПИД-регулятором (см. рисунок 1.5). Установите в блоках, реализующих объект управления, его параметры в соответствии с Вашим вариантом задания. ПИД-регулятор создайте в виде макровставки (см. п. 1.11. Приложения).

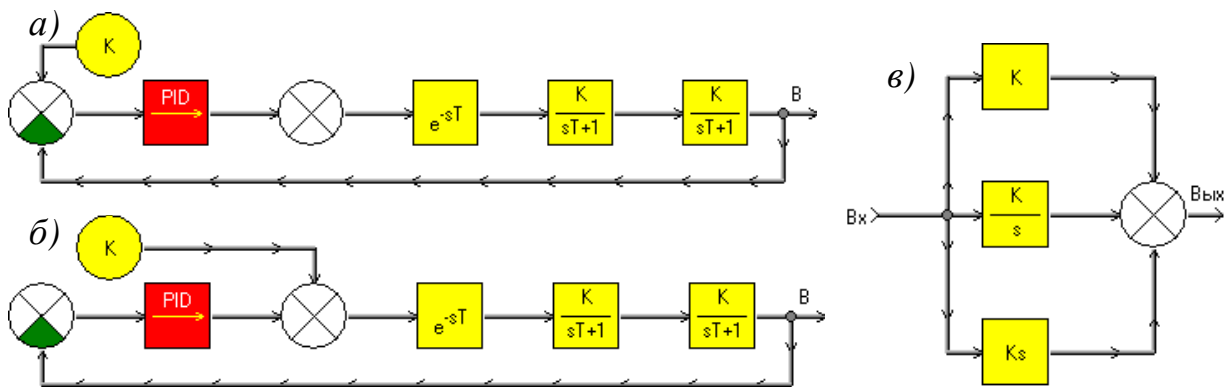


Рисунок 1.5 – Схемы одноконтурной системы управления объектом при ступенчатом задающем (а) и возмущающем (б) воздействиях и схема ПИД-регулятора, оформленного макровставкой (в)

Экспериментальным образом подберите такие настройки ПИД-регулятора, которые обеспечили бы переходный процесс малой колебательности и максимально возможного быстродействия. Настройка ПИД-регулятора проводится при подаче на вход системы ступенчатого задающего воздействия в следующей последовательности: сначала варьируется пропорциональная составляющая регулятора при нулевых значениях остальных составляющих, затем настраивается интегральная составляющая и в окончании дифференциальная. При подборе дифференциальной составляющей приходится изменять и другие настройки регулятора с целью получения более быстрого переходного процесса при сохранении величины перерегулирования. В качестве иллюстрации на рисунке 1.6 показаны переходные процессы в системе с правильно настроенным ПИ-регулятором (при нулевой дифференциальной составляющей) – красные кривые и в системе с ПИД-регулятором – черные кривые.

1.6.3. Рассчитайте настройки ПИД-регулятора методом незатухающих колебаний. Задачу определения критической частоты  $\omega^{кр}$  и критического коэффициента передачи П-регулятора  $K_1^{кр}$  из системы уравнений (1.1) можно решить численным поисковым методом в математическом пакете Mathcad с использованием решающего блока Given ... Find.

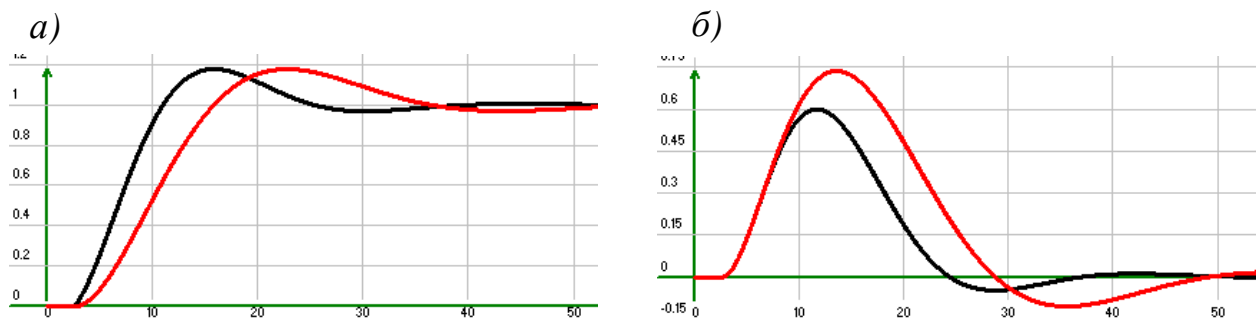


Рисунок 1.6 – Переходные процессы в системе при ступенчатом изменении задающего (а) и возмущающего (б) воздействий. Система с ПИ-регулятором – красные кривые, система с ПИД-регулятором – черные кривые

1.6.4. Сравните расчетные значения настроек с экспериментальными, полученными в предыдущем пункте. Установите рассчитанные настройки ПИД-регулятора и вновь повторить построение переходных процессов так, как это показано на рисунке 1.5.

1.6.5. Определите прямые показатели качества и используя их, сравните переходные процессы, полученные с экспериментально настроенным и рассчитанным регуляторами. Для сравнения найденных показателей качества каждой из систем их следует свести в таблицу.

## 1.7. Требования к оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется согласно требованиям и записывается в файл с именем: ЛР1\_Ф\_И\_гр.docx (Ф\_И – Фамилия и Имя

студента, гр – номер группы, .docx) и размещается на диске общего доступа. Файл с отчетом и **все файлы со схемами**, созданные в программе «Анализ систем» в результате выполнения лабораторной работы, должны быть сохранены в папке с Вашей фамилией внутри папки УЭМС на диске общего доступа.

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- описание цели и задач работы, задания и исходных данных;
- описание последовательности проведения исследований;
- все исследуемые схемы с комментариями;
- переходные процессы, построенные в исследуемых системах регулирования с комментариями;
- настройки регуляторов, полученные экспериментальным путем;
- расчет настроек ПИД-регулятора методом незатухающих колебаний;
- табличное сравнение (с использованием показателей качества регулирования) переходных процессов по задающему и возмущающему воздействиям в системах с экспериментально настроенным и рассчитанным регуляторами, и выводы о преимуществах и недостатках каждой системы;
- выводы по работе.

## **1.8. Вопросы для самопроверки**

1.8.1. Как П-составляющая регулятора влияет на вид переходного процесса в замкнутой САУ?

1.8.2. Как И-составляющая регулятора влияет на вид переходного процесса в замкнутой САУ?

1.8.3. Укажите последовательность действий при экспериментальной настройке ПИД-регулятора.

1.8.4. За счет изменения какой составляющей ПИД-регулятора можно ускорить протекание переходного процесса в замкнутой САУ?

1.8.5. За счет изменения какой составляющей ПИД-регулятора можно улучшить точность САУ? В чем будет проявление улучшения точности?

1.8.6. В чем сущность метода незатухающих колебаний?

1.8.7. Какой тип регулятора считается установленным в системе для расчета ее методом незатухающих колебаний?

1.8.8. Какой критерий устойчивости используется в методе незатухающих колебаний?

1.8.9. Какая особенность объекта является основанием для применения метода незатухающих колебаний?

## 2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 «Исследование каскадной системы регулирования»

### 2.1. Цель и задачи работы

Построение, исследование и расчет каскадной системы автоматического регулирования.

### 2.2. Теоретическая часть

*Каскадные САУ* – это многоконтурные системы управления, содержащие помимо главной обратной связи по основной регулируемой переменной  $y(t)$  одну или несколько дополнительных обратных связей по вспомогательным переменным  $x_i(t)$ . Дополнительные обратные связи являются внутренними, вложенными друг в друга, поэтому система называется *каскадной*.

Структурная схема двухконтурной каскадной САУ изображена на рисунке 2.1, где обозначено:  $g(t)$  – задающее воздействие;  $e(t)$  и  $e_1(t)$  – ошибки регулирования по основной регулируемой переменной  $y(t)$  и вспомогательной  $x(t)$ , соответственно;  $u(t)$  – управляющее воздействие на объект управления;  $R_0(p)$  и  $R_1(p)$  – соответственно основной (корректирующий) и вспомогательный (стабилизирующий) регуляторы. Передаточные функции объекта  $W_0(p)$  и  $W_1(p)$  по основной и вспомогательной регулируемым переменным находят аналитическим или экспериментальным путем.

Особенность каскадной САУ состоит в том, что регулирующим клапаном управляет вспомогательный регулятор, т. е. вспомогательный регулятор стабилизирует регулируемую переменную. Задание этому регулятору  $v(t)$  формирует основной регулятор, то есть основной регулятор корректирует работу вспомогательного.

При изменении положения регулирующего клапана одновременно изменяются обе переменные объекта основная  $y(t)$  и промежуточная  $x(t)$ , причем последняя изменяется быстрее. Это нужно учитывать при построении каскадной системы регулирования.

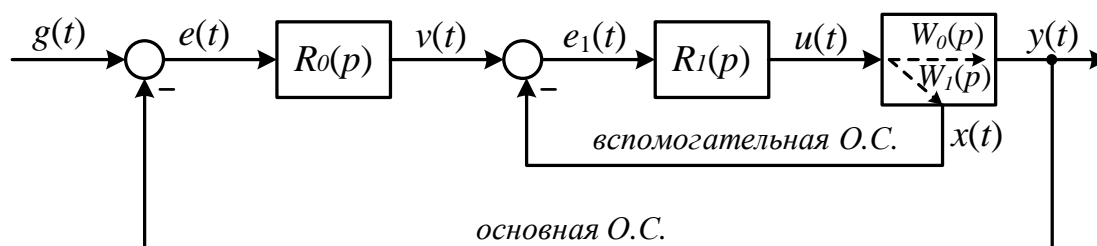


Рисунок 2.1 – Структурная схема каскадной САУ

В каскадной САУ за счет более высокого быстродействия внутреннего контура удастся обеспечить лучшее качество регулирования по сравнению с одноконтурной САУ, особенно при воздействии на объект внешнего возмущения.

Как видно из структурной схемы, изображенной на рисунке 2.1, в каскадной САУ имеется взаимное влияние контуров регулирования, поэтому ее расчет производится итерационным методом, путем последовательного расчета сначала одного, а затем другого регуляторов. Можно использовать любой метод расчета, например, метод незатухающих колебаний. Итерационный расчет завершается при условии сходимости настроек регуляторов с заданной точностью  $\Delta$ .

**Расчет каскадной САУ проводят по следующей методике [2]:**

1. Исходя из особенностей динамики объекта выбираются законы регулирования основного и вспомогательного регуляторов (как правило ПИД и ПИ соответственно).

2. На первом шаге итерации предполагается, что основной контур системы разомкнут и передаточная функция эквивалентного объекта относительно вспомогательного регулятора  $W_{\text{ЭКВ}}^1 = W_1$ .

3. Одним из известных методов (например, методом незатухающих колебаний) рассчитываются настройки вспомогательного регулятора  $R_1(p) = S_1 + S_0/p$ .

4. Найденная передаточная функция  $R_1(p)$  подставляется в выражение передаточной функции эквивалентного объекта относительно основного регулятора  $W_{\text{ЭКВ}}^0 = R_1 W_0 / (1 + R_1 W_1)$ .

5. Рассчитываются настройки основного регулятора  $R_0(p) = C_1 + C_0/p + C_2 p$ .

6. Найденная передаточная функция  $R_0(p)$  подставляется в выражение передаточной функции эквивалентного объекта относительно вспомогательного регулятора  $W_{\text{ЭКВ}}^1 = R_0 W_0 + W_1$ .

7. Затем итерационно повторяют цикл расчета, возвращаясь к пункту 3. Расчет заканчивается, когда относительная погрешность в расчете настроек на двух последовательных итерациях станет не больше 5 %, т. е.  $\Delta_S = |S_k^i - S_k^{i-1}| / S_k^i \leq 5\%$  и  $\Delta_C = |C_k^i - C_k^{i-1}| / C_k^i \leq 5\%$ , где  $k$  – номер настройки регулятора;  $i$  – номер итерации. Обычно достаточно 2–3 итераций.

8. После окончания расчета строятся переходные процессы в замкнутой системе, определяются показатели качества регулирования и делается вывод о целесообразности использования рассчитанной системы регулирования.

## 2.3. Описание объекта исследования

2.3.1. Исследованию подлежит объект управления, описываемый двумя апериодическими звеньями с запаздыванием и имеющий помимо выходной переменной одну промежуточную измеряемую координату.

## 2.4. Задание

2.4.1. Снять кривые разгона исследуемого объекта управления, как по промежуточной, так и по выходной переменным.



2.4.2. Построить одноконтурную систему с ПИД законом регулирования выходной переменной объекта. Экспериментально настроить ПИД-регулятор. Построить переходные процессы в одноконтурной системе регулирования при ступенчатом изменении задающего и возмущающего воздействий (раздельно) и определить показатели качества регулирования.

2.4.3. Построить каскадную систему с ПИД-регулятором в основном и ПИ-регулятором во вспомогательном контурах регулирования. Экспериментально настроить регуляторы (начиная со вспомогательного) и построить переходные процессы по выходной переменной системы при ступенчатом изменении задающего и возмущающего воздействий (раздельно), определить показатели качества регулирования.

2.4.4. Сравнить переходные процессы в одноконтурной и каскадной системах регулирования по задающему и возмущающему воздействиям, используя показатели качества (показатели свести в таблицу). Определить и сравнить интегральный квадратичный критерий качества регулирования в одноконтурной и каскадной системах регулирования. Сделать вывод о целесообразности использования каскадной системы регулирования.

2.4.5. Рассчитать настройки основного ПИД- и вспомогательного ПИ-регуляторов каскадной системы и сравнить расчетные значения настроек с экспериментальными, полученными в п. 2.4.3.

2.4.6. Выставить рассчитанные настройки регуляторов в модели каскадной системы управления, построить переходные процессы по выходной переменной системы при ступенчатом изменении задающего и возмущающего воздействий (раздельно), определить показатели качества регулирования. Сделать вывод о целесообразности использования рассчитанных настроек регуляторов в каскадной системе.

## **2.5. Указания по выполнению работы**

2.5.1. Лабораторная работа выполняется в программном комплексе «Анализ систем 3.1». Для загрузки комплекса следует загрузить файл Syan.exe. Инструкция пользователя находится в Приложении.

2.5.2. Варианты заданий приведены в таблице 2.1.

2.5.3. Построенные графики и схемы необходимо сохранять в созданном Вами файле текстового редактора Word. Все исследования и графики следует снабжать комментариями, значения настроек регулятора – записывать, показатели качества регулирования сводить в таблицу.

Таблица 2.1 – Варианты заданий

№ варианта / Параметры звена	Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Первое задержки	$K$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$T$	1,5	4	1,2	2,5	3,3	4,6	0,7	1,8	2	3,8
2. Первое апериодическое	$K$	0,6	1,3	2,8	3,2	4,7	1,9	0,4	1,4	0,8	2,5
	$T$	1,2	2,5	3,3	4,6	0,7	1,8	2	3	1,5	4,2
3. Второе задержки	$K$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$T$	3	1,5	4	1,2	2,5	3,3	4,6	0,7	1,8	2,7
4. Второе апериодическое	$K$	0,8	2,7	0,6	1,3	2,8	3,2	4,7	1,9	0,4	1,7
	$T$	4	1,2	2,5	3,3	4,6	0,7	1,8	2	3	2,9
№ варианта / Параметры звена	Параметр	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1. Первое задержки	$K$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$T$	2,6	3,5	1,4	3,2	4,5	2,3	3,6	2,7	0,8	3
2. Первое апериодическое	$K$	0,8	2,2	4,7	1,8	2,6	5,2	0,9	3	2,8	3
	$T$	1,5	2,5	1,2	2,5	1,9	3,6	0,7	1,8	2	4
3. Второе задержки	$K$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$T$	4,3	2,2	3,8	6	2,2	3,5	2,6	3,1	3,7	2,8
4. Второе апериодическое	$K$	1,3	3,7	4,8	8,3	1,4	2,5	6,3	5,2	7,7	3,4
	$T$	7,2	2,8	3,5	5,7	1,2	2,3	4,5	4,1	5,5	2,9

## 2.6. Порядок выполнения работы

2.6.1. Для снятия кривых разгона объекта управления соберите схему объекта управления, показанную на рисунке 2.2. Обозначьте промежуточную (А) и основную (В) переменные объекта щелчком правой кнопки мыши, как показано на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Объект управления

Установите параметры звеньев щелчком правой кнопки мыши на звене в соответствии с Вашим вариантом. Начальные условия апериодических звеньев нулевые. Сохраните схему с комментарием в Вашем текстовом файле редактора Word. Постройте графики переходных процессов (кривые разгона) по основной и вспомогательной переменным, установив время просмотра примерно 50 секунд, скопируйте их в Ваш текстовый файл и снабдите комментариями.

2.6.2. Исследование и настройка одноконтурной системы регулирования.

В поле редактора соберите схему, показанную на рисунке 2.3. Набранную ранее схему (рисунок 2.2) удалять не следует. Ее необходимо выделить левой кнопкой мыши, вырезать, а затем, переместив курсор мыши правее, вставить. В оставшееся слева пустое место вставить ПИД-регулятор.

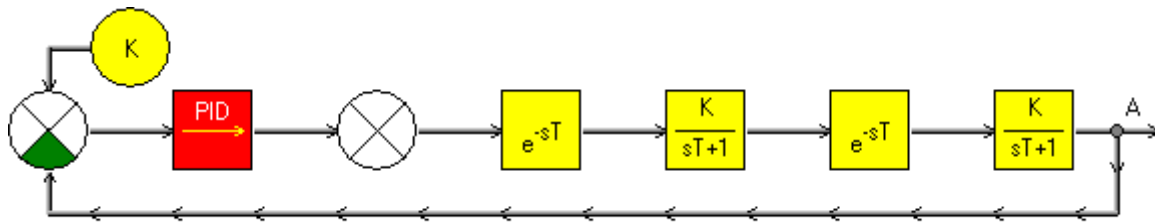


Рисунок 2.3 – Одноконтурная система регулирования

Настройте ПИД-регулятор. Получите переходные процессы при изменении задающего воздействия (см. рисунок 2.3), а затем при изменении возмущающего воздействия, переключив генератор на второй сумматор. Определите показатели качества и оцените качество регулирования. Сохраните схему и настроенные переходные процессы с комментариями в Вашем текстовом файле редактора Word. Запишите настройки регулятора.

### 2.6.3. Исследование и настройка каскадной системы регулирования.

Измените схему в соответствии с рисунком 2.4. Настройте вспомогательный ПИ-регулятор каскадной системы. Настройки запишите. Добавьте в систему основной ПИД-регулятор, как показано на рисунке 2.5.

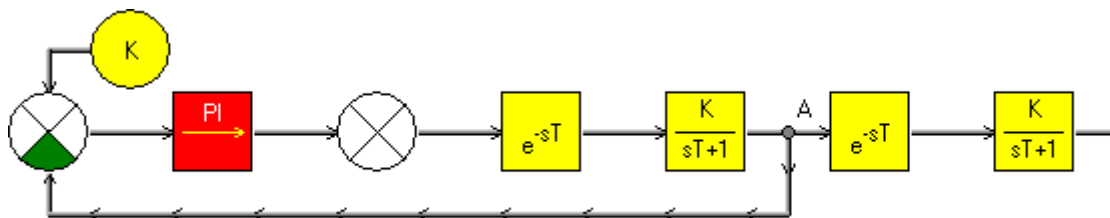


Рисунок 2.4 – Настройка вспомогательного регулятора каскадной системы

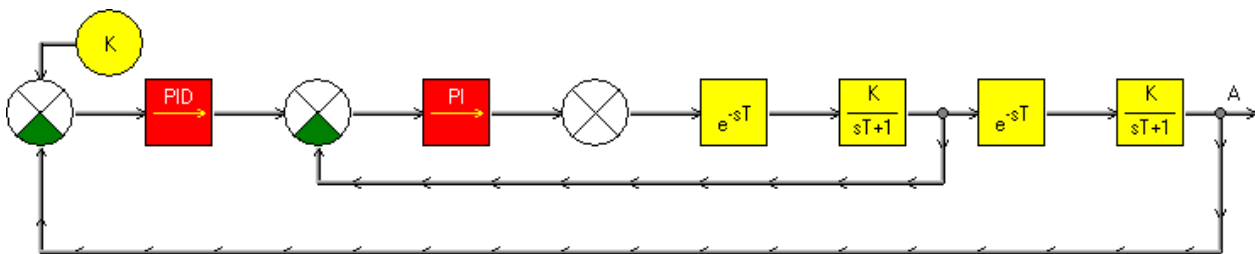


Рисунок 2.5 – Настройка основного регулятора каскадной системы

Настройте основной регулятор, получите переходные процессы при изменении задающего воздействия (см. рисунок 2.5), а затем при изменении возмущающего воздействия, переключив генератор на третий сумматор. Определите показатели качества и оцените качество регулирования. Сохраните

схему и настроенные переходные процессы с комментариями в Вашем текстовом файле редактора Word. Запишите настройки основного регулятора.

2.6.4. Сравните переходные процессы в одноконтурной (рисунок 2.3) и каскадной (рисунок 2.5) системах регулирования по задающему и возмущающему воздействиям, используя сведенные в таблицу показатели качества регулирования, в том числе интегральную квадратичную оценку качества. Сделайте вывод о целесообразности использования каскадной системы регулирования.

Интегральная квадратичная оценка качества вычисляется по выражению:  $Q_{\text{кв}} = \int_0^{\infty} e^2(t)dt$ , поэтому для ее определения в каскадной САУ можно использовать схему, изображенную на рисунке 2.6.

2.6.5. Рассчитайте настройки регуляторов каскадной системы, используя теоретические сведения к данной лабораторной работе, и сравните расчетные значения настроек с экспериментальными, полученными в п. 2.6.3.

2.6.6. Установите рассчитанные настройки в модель регуляторов каскадной системы, постройте переходные процессы по выходной переменной системы при ступенчатом изменении задающего и возмущающего воздействий (раздельно), определите показатели качества регулирования. Сделайте вывод о целесообразности использования рассчитанных настроек регуляторов в каскадной системе.

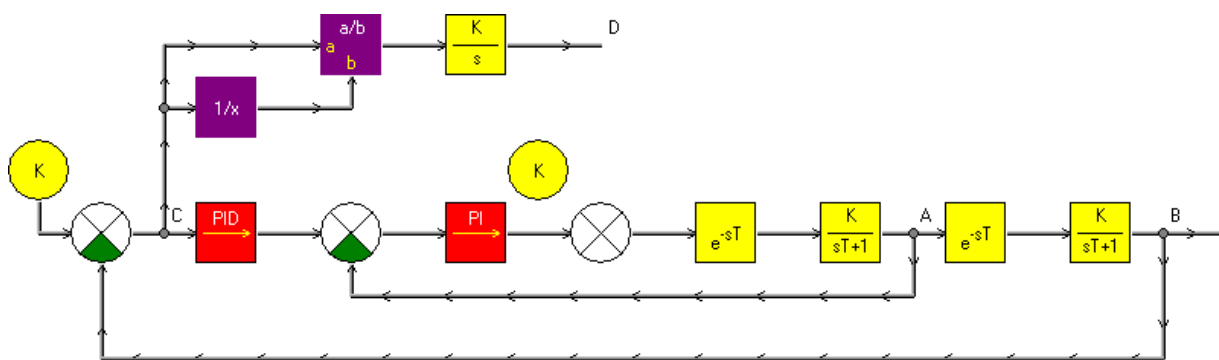


Рисунок 2.6 – Вычисление интегральной квадратичной оценки качества регулирования в каскадной САУ

## 2.7. Требования к оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе записывается в файл с именем: **ЛР2\_Ф\_И\_гр.docx** (Ф\_И – Фамилия и Имя студента, гр – номер группы, .docx) и размещается на диске общего доступа. Файл с отчетом и **все файлы со схемами**, созданные в программе «Анализ систем» в результате выполнения лабораторной работы должны быть сохранены в папке с Вашей фамилией внутри папки УЭМС на диске общего доступа.

Отчет должен содержать:

- все исследуемые схемы с комментариями;
- переходные процессы в одноконтурной и каскадной системах регулирования;

- настройки регуляторов, полученные экспериментальным путем;
- сравнение (с использованием показателей качества регулирования) переходных процессов одноконтурной и каскадной систем по задающему и возмущающему воздействиям, и выводы о преимуществах и недостатках каскадной системы;
- расчет настроек регуляторов каскадной системы;
- выводы по каждому этапу работы и по работе в целом.

## **2.8. Вопросы для самопроверки**

2.8.1. При каких особенностях объектов управления рекомендуется использовать каскадные САУ?

2.8.2. Почему расчет каскадной САУ производится итерационным путем?

2.8.3. Как формируется задания внешнего и внутреннего контуров каскадной САУ?

2.8.4. Какой контур регулирования каскадной САУ должен быть быстрее: внешний или внутренний, почему?

2.8.5. Приведите структурные схемы обычной и каскадной САУ и объясните назначение элементов, входящих в эти системы?

2.8.6. Приведите практический пример использования каскадной системы управления.

2.8.7. Постройте функциональную схему каскадной системы регулирования температуры на выходе теплообменника, уровня в барабане котла, температуры в химическом реакторе.

2.8.8. Какие сочетания законов регулирования рекомендуется использовать в регуляторах каскадных САУ?

2.8.9. Пояснить принципы экспериментальной настройки каскадных САУ.

2.8.10. Пояснить принципы расчета каскадных САУ.

### 3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 «Исследование комбинированной системы регулирования»

#### 3.1. Цель и задачи работы

Построение, исследование и расчет комбинированной системы автоматического регулирования.

#### 3.2. Теоретическая часть

*Комбинированные* – это одноконтурные САУ, в которых помимо обратной связи по основной регулируемой переменной  $y(t)$  построен компенсационный канал. В компенсационном канале комбинированной САУ устанавливается динамический компенсатор с передаточной функцией  $W_{\text{дк}}(p)$ , предназначенный для устранения влияния основного возмущающего воздействия  $f(t)$  на регулируемую переменную  $y(t)$ .

Структурная схема комбинированной САУ изображена на рисунке 3.1, где обозначено:  $g(t)$  – задающее воздействие;  $e(t)$  – ошибка регулирования;  $u(t)$  – управляющее воздействие на объект управления;  $R(p)$  – регулятор. Передаточные функции объекта по каналу управления  $W_0(p)$  и по каналу возмущения  $W_f(p)$  находят аналитическим или экспериментальным путем.

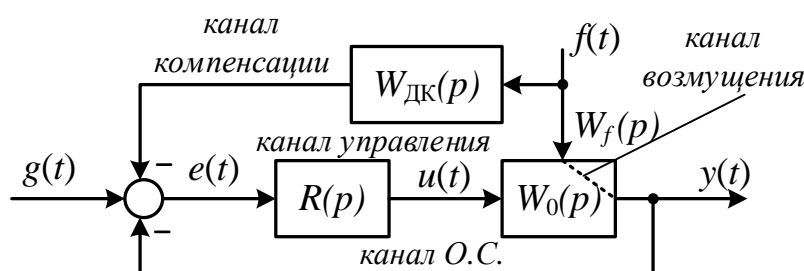


Рисунок 3.1 – Структурная схема комбинированной САУ

Запишем зависимость (по каналу возмущения) регулируемой переменной  $y(t)$  от возмущающего воздействия  $f(t)$ . В изображениях эта зависимость выглядит так:  $y(p) = f(p) \cdot W_f(p)$ . Теперь запишем ту же зависимость, но по каналам компенсации и управления:  $y(p) = f(p) \cdot W_{\text{дк}}(p) \cdot R(p) \cdot W_0(p)$ . Приравняв эти выражения, получим условие полной компенсации возмущения, т. е. условие полной инвариантности системы (независимости от возмущения):  $f(p) \cdot W_f(p) = f(p) \cdot W_{\text{дк}}(p) \cdot R(p) \cdot W_0(p)$ . Отсюда легко получить передаточную функцию идеального динамического компенсатора:

$$W_{\text{дк}}(p) = \frac{W_f(p)}{R(p) \cdot W_0(p)} \quad (3.1)$$

На практике часто сигнал с динамического компенсатора подают не на вход регулятора, а непосредственно на объект управления (на регулирующий клапан), тогда из передаточной функции (3.1) исключается регулятор, и она приобретает вид:

$$W_{\text{ДК}}(p) = \frac{W_f(p)}{W_0(p)}. \quad (3.2)$$

Следует учитывать, что динамический компенсатор может быть физически реализован, если инерционность и запаздывание объекта по каналу возмущения будут больше, чем по каналу управления.

Очевидно, что идеальный динамический компенсатор реализовать невозможно, из-за неопределенности и нестабильности параметров объекта и сложности передаточных функций (3.1) и (3.2). Поэтому на практике динамический компенсатор реализуют простой передаточной функцией без запаздывания в виде реального форсирующего звена:

$$W_{\text{РДК}}(p) = \frac{k \cdot (T_1 p + 1)}{T_2 p + 1}, \quad (3.3)$$

реализуя тем самым не полную, а частичную инвариантность системы. Динамический компенсатор (3.3) называют реальным.

Расчет параметров  $k$ ,  $T_1$  и  $T_2$  звена (3.3) проводится из условия максимальной близости АФХ идеального и реального компенсаторов в диапазоне рабочих частот  $\omega_p = [0 \dots \omega_{\text{кр}}]$ , где  $\omega_{\text{кр}}$  – частота незатухающих колебаний. Должно быть обеспечено точное совпадение амплитудно-фазовых частотных характеристик (АФХ) на границах рабочего диапазона частот (см. рисунок 3.2), а именно:  $W_{\text{РДК}}(0) = W_{\text{ДК}}(0)$  и  $W_{\text{РДК}}(j\omega_{\text{кр}}) = W_{\text{ДК}}(j\omega_{\text{кр}})$  [2].

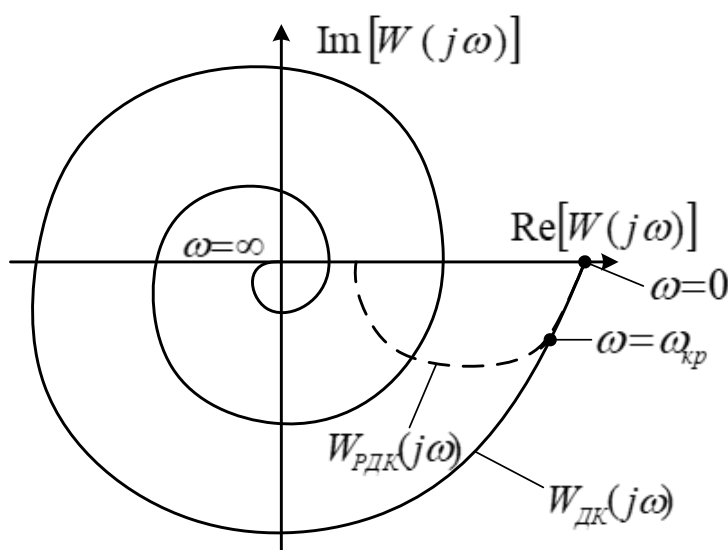


Рисунок 3.2 – АФХ идеального и реального динамических компенсаторов

Выражая АФХ через АЧХ и ФЧХ и учитывая, что  $A_{РДК}(\omega) = k\sqrt{T_1^2\omega^2 + 1}/\sqrt{T_2^2\omega^2 + 1}$  и  $\varphi_{РДК}(\omega) = \arctg(T_1\omega) - \arctg(T_2\omega)$ , последние уравнения можно переписать в виде:

$$\begin{cases} k = A_{ДК}(0) = |W_{ДК}(0)|; \\ \frac{k\sqrt{T_1^2\omega_{кр}^2 + 1}}{\sqrt{T_2^2\omega_{кр}^2 + 1}} = A_{ДК}(\omega_{кр}) = |W_{ДК}(j\omega_{кр})|; \\ \arctg(T_1\omega) - \arctg(T_2\omega) = \varphi_{ДК}(\omega_{кр}) = \arg[W_{ДК}(j\omega_{кр})]. \end{cases} \quad (3.4)$$

### Расчет комбинированной САУ проводят по следующей методике:

1. Исходя из особенностей динамики объекта выбирается закон регулирования.
2. Рассчитывается критическая частота и настройки выбранного регулятора одним из известных методов, например, методом незатухающих колебаний.
3. Определяется передаточная функция идеального динамического компенсатора по формулам (3.1) или (3.2). Определяются значения  $A_{ДК}(0)$ ,  $A_{ДК}(\omega_{кр})$ ,  $\varphi_{ДК}(\omega_{кр})$  амплитудной и фазовой частотных характеристик идеального динамического компенсатора на нулевой и критической частотах.
4. Из решения системы уравнений (3.4) определяются параметры реального динамического компенсатора.
5. Реальный динамический компенсатор реализуется в виде реального форсирующего звена (3.3). Экспериментально проверяется его эффективность.

## 3.3. Описание объекта исследования

3.3.1. Исследованию подлежит объект управления, описываемый апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием. На объект действует возмущающее воздействие.

## 3.4. Задание

3.4.1. Построить структурную схему одноконтурной системы регулирования. Экспериментально определить критические значения параметров системы.

3.4.2. Вычислить с помощью критерия устойчивости Найквиста критические значения коэффициента передачи П-регулятора  $k_{кр}$  и частоты  $\omega_{кр}$  незатухающих колебаний. Сравнить эти значения с экспериментальными, полученными в п. 3.4.1.

3.4.3. Записать передаточную функцию идеального динамического компенсатора и проверить условие его физической реализуемости. Выбрать в качестве реального динамического компенсатора реальное форсирующее звено



с передаточной функцией, равной  $W(s) = \frac{k \cdot (T_1 \cdot s + 1)}{T_2 \cdot s + 1}$ . Рассчитать его параметры из условия совпадения значений АФХ реального и идеального динамических компенсаторов на границах частотного диапазона от 0 до  $\omega_{кр}$ .

3.4.4. Построить комбинированную систему регулирования с рассчитанным реальным динамическим компенсатором, установить в обратной связи пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор. Настроить параметры ПИ-регулятора так, чтобы получить переходный процесс по заданию с небольшим (5–10 %) перерегулированием.

3.4.5. Получить переходные процессы в системе при ступенчатом изменении возмущающего воздействия в двух случаях:

- без динамического компенсатора;
- с динамическим компенсатором.

3.4.6. Определить прямые показатели качества и сравнить переходные процессы в одноконтурной (без динамического компенсатора) и комбинированной (с динамическим компенсатором) системах регулирования.

### 3.5. Указания по выполнению работы

3.5.1. Лабораторная работа выполняется в программном комплексе «Анализ систем 3.1». Для загрузки комплекса следует загрузить файл Suan.exe. Инструкция пользователя находится в Приложении.

3.5.2. Варианты заданий приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Варианты заданий

№ варианта / ПФ объекта	Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. По каналу управления $W_o(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau_o \cdot p}}{T_o s + 1}$	$K$	0,6	1,3	2,8	3,2	4,7	1,9	0,4	1,4	0,8	2,5
	$T$	1,2	4	3,3	4,6	0,7	1,8	2	3	1,5	4,2
	$\tau_o$	1,5	2,5	1,2	2,1	1,9	3,1	0,3	1,2	2	3,8
2. По каналу возмущения $W_f(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau_f \cdot p}}{T_f s + 1}$	$K$	0,8	2,7	0,6	1,3	2,8	3,2	4,7	2,2	0,4	1,7
	$T$	4	5,2	5,5	6,3	4,6	2,7	2,8	4	3	5,9
	$\tau_f$	1,8	2,9	1,7	2,6	2,3	4	0,9	1,9	2,3	5,3
№ варианта / ПФ объекта	Параметр	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1. По каналу управления $W_o(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau_o \cdot p}}{T_o s + 1}$	$K$	0,8	2,2	4,7	1,8	2,6	5,2	0,9	3	2,8	3
	$T$	1,5	2,5	1,2	2,5	1,9	3,6	0,7	1,8	2	4
	$\tau_o$	2,6	1,5	1,4	3,2	4,5	2,3	3,6	2,7	0,8	3
2. По каналу возмущения $W_f(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau_f \cdot p}}{T_f s + 1}$	$K$	1,3	3,7	4,8	8,3	1,4	2,5	6,3	5,2	7,7	3,4
	$T$	7,2	2,8	3,5	5,7	3,2	4,3	4,5	4,1	5,5	6,9
	$\tau_f$	4,3	2,2	3,8	6	7,2	3,5	4,6	3,1	3,7	4,8

3.5.3. Построенные графики и схемы необходимо сохранять в созданном Вами файле текстового редактора Word. Все исследования и графики следует снабжать комментариями, значения настроек регулятора – записывать, показатели качества регулирования сводить в таблицу. Расчеты целесообразно проводить в пакете Mathcad.

### 3.6. Порядок выполнения работы

3.6.1. Построение одноконтурной системы и определение критических значений ее параметров.

Загрузите программу Syan. Соберите схему одноконтурной системы управления с П-регулятором, показанную на рисунке 3.3. Установите параметры звеньев (канал управления) щелчком правой кнопки мыши на звене в соответствии с Вашим вариантом. Начальные условия звеньев нулевые. Выходной сигнал генератора установите равным 1.

Изменяя коэффициент передачи П-регулятора, добейтесь возникновения в системе незатухающих колебаний, скопируйте переходный процесс в Ваш текстовый файл и снабдите комментарием. Рекомендуемое время просмотра примерно 50 секунд, а шаг расчета не более 0,01 с.

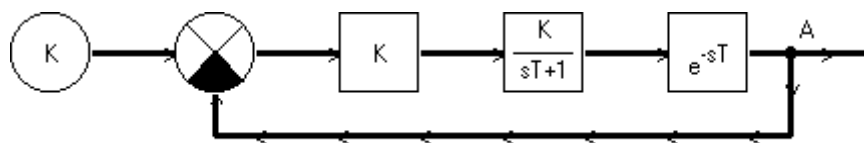


Рисунок 3.3 – Система управления с П-регулятором

Запишите критические значения коэффициента передачи регулятора  $k_{кр}$  и частоты незатухающих колебаний  $\omega_{кр}$ , которая находится по формуле  $\omega_{кр} = 2\pi/T$ , где  $T$  – период незатухающих колебаний. Период колебаний можно определить из переходного процесса как промежуток времени между максимальными значениями гармонического сигнала в установившемся режиме. Для этого в установившемся режиме навести курсор мыши в виде перекрестия на первый максимум сигнала и щелкнуть левой кнопкой мыши. В нижнем левом углу графического окна появится значение времени этого максимума. Затем курсор мыши необходимо навести на второй максимум графика и щелкнуть левой кнопкой мыши. В нижнем левом углу графического окна появится значение времени второго максимума. Разность этих времен и есть период колебаний.

3.6.2. Расчет критических значений параметров одноконтурной системы.

Вычислить критические значения параметров системы можно с помощью критерия Найквиста, из условия прохождения АФХ разомкнутого контура системы через точку с координатами  $(-1; j0)$ . Для этого необходимо решить систему уравнений (1.2). Вычисленные значения  $k_{кр}$  и  $\omega_{кр}$  должны примерно совпасть со значениями, полученными ранее экспериментально.

3.6.3. Расчет параметров реального динамического компенсатора.

В соответствии с выражением (3.2) получите передаточную функцию идеального динамического компенсатора и проверьте условие его физической реализуемости. Вычислите значения АЧХ  $A_{\text{ДК}}(\omega)$  и ФЧХ  $\varphi_{\text{ДК}}(\omega)$  идеального динамического компенсатора при значениях частоты, равных 0 и  $\omega_{\text{кр}}$ . Найдите параметры  $k$ ,  $T_1$  и  $T_2$  реального динамического компенсатора, имеющего передаточную функцию (3.3), решив систему уравнений (3.4). Постройте графики АФХ идеального и реального динамических компенсаторов в диапазоне частот от 0 до  $\omega_{\text{кр}}$  и убедитесь в их близости.

Все расчеты удобно проводить в пакете MathCad.

#### 3.6.4. Исследование комбинированной системы регулирования.

Измените схему, изображенную на рисунке 3.3, установив вместо П-регулятора, ПИ-регулятор (рисунок 3.4). Настройте ПИ-регулятор системы, записав схему, настройки и переходный процесс.

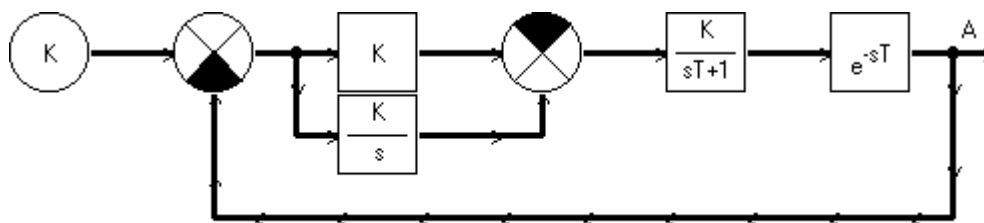


Рисунок 3.4 – Структурная схема системы с ПИ-регулятором

Подайте на систему с настроенным регулятором ступенчатое возмущающее воздействие (рисунок 3.5). Параметры звеньев, находящихся в канале возмущения, установите в соответствии с Вашим вариантом (см. табл. 3.1). Снимите и запишите переходный процесс в системе по возмущению.

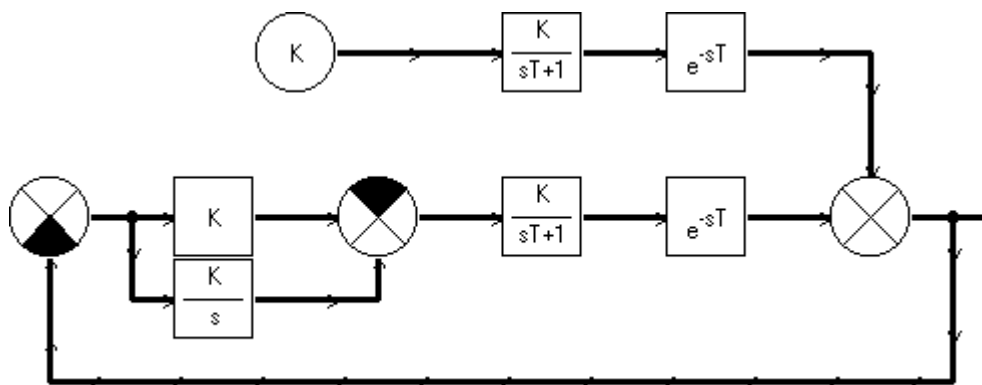


Рисунок 3.5 – Структурная схема системы при влиянии возмущающего воздействия

Постройте комбинированную систему регулирования, организовав компенсационный канал с реальным динамическим компенсатором (рисунок 3.6). Установите рассчитанные значения параметров реального

динамического компенсатора. Схему, изображенную на рисунке 3.5, изменять или удалять не следует. Снимите и запишите переходный процесс в комбинированной системе при ступенчатом изменении возмущающего воздействия.

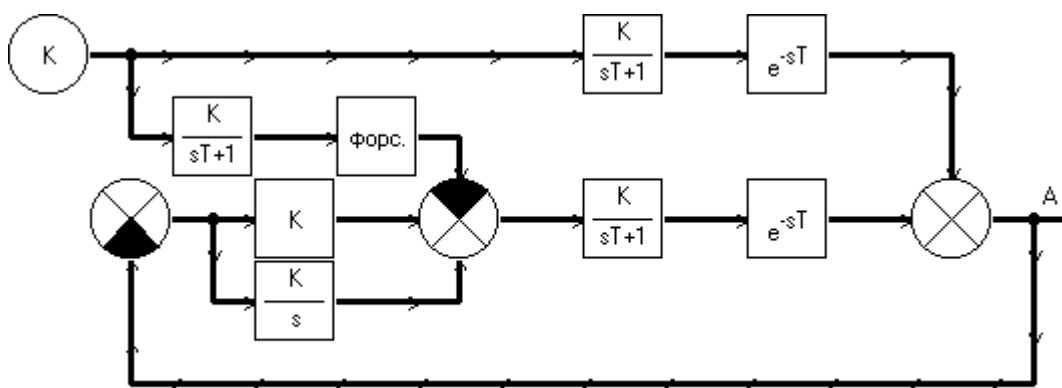


Рисунок 3.6 – Структурная схема комбинированной системы

Определите прямые показатели качества и сравните переходные процессы в одноконтурной (без динамического компенсатора) и комбинированной (с динамическим компенсатором) системах регулирования.

Разомкните обратные связи в исходной (рисунок 3.5) и комбинированной (рисунок 3.6) системах регулирования. Снимите и запишите переходные процессы в системах без обратных связей при ступенчатом изменении возмущающего воздействия. Сравните их.

Оцените эффективность работы динамического компенсатора в САУ при изменении задающего и возмущающего воздействий. Сделайте выводы по работе.

### 3.7. Требования к оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется согласно требованиям и записывается в файл с именем: ЛР3\_Ф\_И\_гр.docx (Ф\_И – Фамилия и Имя студента, гр – номер группы, .docx) и размещается на диске общего доступа. Файл с отчетом и **все файлы со схемами**, созданные в программе «Анализ систем» в результате выполнения лабораторной работы, должны быть сохранены в папке с Вашей фамилией внутри папки УЭМС на диске общего доступа.

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- описание цели и задач работы, задания и исходных данных;
- описание последовательности проведения исследований;
- все исследуемые схемы с комментариями;
- все полученные переходные процессы в одноконтурной и комбинированной системах регулирования;
- расчет параметров реального динамического компенсатора;
- настройки регуляторов, полученные экспериментальным путем;

- сравнение (с использованием показателей качества регулирования) переходных процессов одноконтурной и комбинированной систем, и выводы о преимуществах и недостатках комбинированной системы;
- выводы по работе.

### **3.8. Вопросы для самопроверки**

3.8.1. При каких особенностях объектов управления рекомендуется использовать комбинированные САР?

3.8.2. Как определить передаточную функцию идеального динамического компенсатора?

3.8.3. Каковы условия физической реализуемости динамических компенсаторов?

3.8.4. Из каких соображений осуществляется расчет параметров реального динамического компенсатора?

3.8.5. Какую передаточную функцию целесообразно выбирать в качестве реального динамического компенсатора? Почему?

3.8.6. Приведите структурные схемы обычной и комбинированной САР и объясните назначение элементов, входящих в эти системы?

3.8.7. Пояснить принципы настройки комбинированных САР.

3.8.8. Приведите практический пример использования комбинированной системы управления.

3.8.9. Постройте функциональную схему комбинированной системы регулирования температуры на выходе теплообменника, уровня в барабане котла, температуры в химическом реакторе.

3.8.10. Работает ли комбинированная САУ при разрыве обратной связи?

## 4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### «Исследование характеристик бесконтактного моментного двигателя постоянного тока»

#### 4.1. Цель и задачи работы

Изучение особенностей построения и принципа работы бесконтактного моментного двигателя постоянного тока (БМДПТ) с датчиком положения ротора, работающего в амплитудном режиме, а также исследование регулировочной и механической характеристик БМДПТ.

#### 4.2. Теоретическая часть

Моментным (или *высокомоментным*) называется электрический двигатель, сконструированный таким образом, чтобы обеспечить возможность длительной работы на низких скоростях или с заторможенным ротором. Моментный двигатель (МД) отличается от обычного только своей конструкцией и параметрами, в связи с чем он способен развивать большой вращающий момент.

Среди МД наибольшее распространение получили моментные двигатели постоянного тока (МДПТ). Принцип работы МДПТ основан на взаимодействии между постоянным током, протекающим в обмотке управления (ОУ), и полем постоянных магнитов (ПМ). Важным достоинством МДПТ является малое значение отношения потребляемой мощности к моменту вследствие отсутствия затрат энергии на создание рабочего магнитного потока.

Классический коллекторный МДПТ с ПМ на статоре и волновой якорной обмоткой на роторе, помимо ряда достоинств (линейность характеристик, простота управления, хорошие регулировочные свойства), обладает существенными недостатками: малая надежность щеточно-коллекторного узла и, следовательно, короткий срок службы; низкая устойчивость к механическим воздействиям; искро- и пожароопасность; шумность работы.

Наиболее перспективным МДПТ является *обращенный* (бесколлекторный) двигатель постоянного тока, в котором ПМ размещены на роторе, а ОУ – на статоре. Такие двигатели имеют значительно меньшие габаритные размеры и массу из-за улучшения условий охлаждения обмотки якоря. Коммутация токов в ОУ с целью обеспечения постоянства взаимной ориентации полей статора и ротора производится в функции углового положения ротора, информация о котором поступает от датчика положения ротора (ДПР), являющегося составным элементом двигателя. Частота тока в статоре при этом определяется скоростью вращения ротора, в силу чего такой способ управления двигателем называется *частотно-токовым управлением*. Двигатель, построенный по указанному принципу, называется *бесконтактным двигателем постоянного тока* (БДПТ, а в моментном исполнении – БМДПТ). БМДПТ питается от сети постоянного тока и аналогичен обычному коллекторному двигателю постоянного тока.

БМДПТ строится на основе синхронных двух- и трехфазных электродвигателей постоянного тока серии ДБМ или ДБМВ [3] плоской встраиваемой конструкции мощностью до 1кВт с ротором, на котором установлены постоянные магниты из редкоземельных сплавов (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Трехфазные двигатели серии ДБМВ

Двигатели серии ДБМ могут использоваться в режимах синхронного, шагового и вентильного двигателей с непрерывным и дискретным способами управления.

БМДПТ отличается большой перегрузочной способностью, большим сроком службы (20000–50000 ч), многофункциональностью (возможность работы в режимах синхронного, шагового и вентильного двигателей).

БМДПТ получил широкое распространение в следящих приводах антенн, станков с ЧПУ, медицинской технике.

#### *Особенности построения и принцип работы БМДПТ*

Рассмотрим бесконтактный моментный привод, построенный на основе синхронных электродвигателей серии ДБМ плоской встраиваемой конструкции.

На рисунке 4.2 показана функциональная схема БМДПТ, состоящего из трех основных частей:

- двухфазного синхронного электродвигателя (СД) с ПМ на роторе – на схеме для простоты представлен как двухполюсный;
- датчика положения ротора (ДПР), например, синусно-косинусного вращающегося трансформатора (СКВТ), работающего в амплитудном режиме;
- двухканального фазочувствительного усилительно-преобразовательного устройства (ФЧУП).

Как статорные обмотки СД, так и квадратурные обмотки ДПР сдвинуты относительно друг друга на 90 эл. град.

Работа двигателя происходит следующим образом: генератором опорного напряжения (ГОН) вырабатывается высокочастотный сигнал прямоугольной формы ( $f = 2 \text{ КГц}$ ), который подается на опорные входы модулятора М и ФЧУП. Управляющий сигнал постоянного тока  $U_y$ , проходя через модулятор М, преобразуется в сигнал переменного тока  $U_y' = U_y \cdot \sin(\Omega_H \cdot t)$ , поступающий на роторную обмотку ДПР. Здесь:  $\Omega_H$  – несущая частота, равная  $\Omega_H = 2 \cdot \pi \cdot f$ .

С синусной и косинусной обмоток ДПР снимаются сигналы соответственно  $U_{дс} = k_d \cdot U_y' \cdot \sin(p_{п} \cdot \varphi)$  и  $U_{дк} = k_d \cdot U_y' \cdot \cos(p_{п} \cdot \varphi)$ , где  $k_d$  – коэффициент трансформации ДПР,  $\varphi$  – угол поворота ротора ДПР или СД относительно одной из неподвижных осей (угол между осями  $a$  и  $b$  на векторной диаграмме рисунка 4.2),  $p_{п}$  – число пар полюсов СД и ДПР. Напряжения  $U_{дс}$  и

$U_{ДК}$  освобождаются от несущей частоты и усиливаются в ФЧУП, после чего подаются на соответствующие фазы статорной обмотки СД в виде напряжений постоянного тока  $U_C = k \cdot U_y \cdot \sin(p_{П} \cdot \varphi)$  и  $U_K = k \cdot U_y \cdot \cos(p_{П} \cdot \varphi)$ , где  $k = k_{Д} \cdot k_{ФЧУП}$ ,  $k_{ФЧУП}$  – коэффициент передачи ФЧУП.

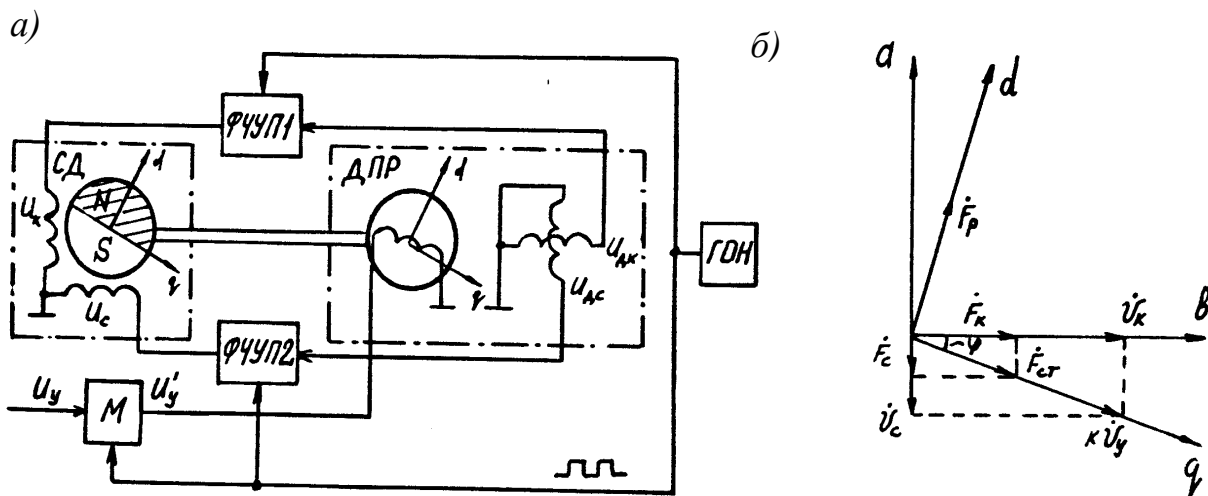


Рисунок 4.2 – Функциональная схема (а) и векторная диаграмма (б) БМДПТ

В статоре СД формируется круговое магнитное поле, в результате чего вектор м.д.с. статора  $\dot{F}_{СТ}$ , равный векторной сумме м.д.с. фаз  $\dot{F}_C$  и  $\dot{F}_K$ , пропорциональных напряжениям  $U_C$  и  $U_K$ , будет ориентирован вдоль оси  $q$ , в то время как вектор м.д.с. ПМ  $\dot{F}_P$  будет направлен вдоль оси  $d$ . Взаимодействие м.д.с. ротора и статора создает вращающий электромагнитный момент, пропорциональный  $F_{СТ} \cdot F_P \sin \Theta$ , где  $\Theta$  – угол между векторами  $\dot{F}_C$  и  $\dot{F}_K$ , устанавливаемый равным 90 эл. град. При вращении ротора СД и вектора  $\dot{F}_P$  будет одновременно поворачиваться и ротор ДПР, что будет приводить к изменению угла  $\varphi$ , а значит к повороту вектора  $\dot{F}_{СТ}$ . Таким образом, угол  $\Theta$  при вращении двигателя не меняется, и, следовательно, электромагнитный момент БМДПТ постоянен и не зависит от угла  $\varphi$  и от момента нагрузки, как и в обычном коллекторном двигателе постоянного тока.

### 4.3. Описание объекта исследования

Лабораторная работа выполняется на стенде электромеханической системы с БМДПТ. Стенд имитирует работу реальной антенной установки. Кинематическая схема стенда изображена на рисунке 4.3 и включает:

1. Имитатор объекта управления – сменные диски различных размеров, предназначенные для имитации изменения момента инерции установки в процессе ее работы.
2. Упругую вставку между двигателем и имитатором объекта управления – набор стальных пластин различной жесткости, имитирующих упругость валов реальной установки и зеркала антенны.



3. Имитатор зазора в редукторе привода – диск с отверстиями различных размеров.

4. и 5. Тахогенераторы ТГ1 и ТГ2, типа ТПП-5 – датчики скорости, расположенные соответственно на валах электродвигателя и объекта управления.

6. Датчик положения ротора – вращающийся трансформатор ВТ, типа ВТ40-12-0,2-0,16-8.

7. Двигатель бесконтактный моментный, типа ДБМ70-0.16-3-2.

8. Датчик положения ДП2, типа СПН-8В – датчик, измеряющий угловое перемещение объекта управления.

9. Нагрузочную муфту НМ, типа БПМ-6В – муфта, имитирующая изменение момента нагрузки на валу объекта управления, например, наличие ветра.

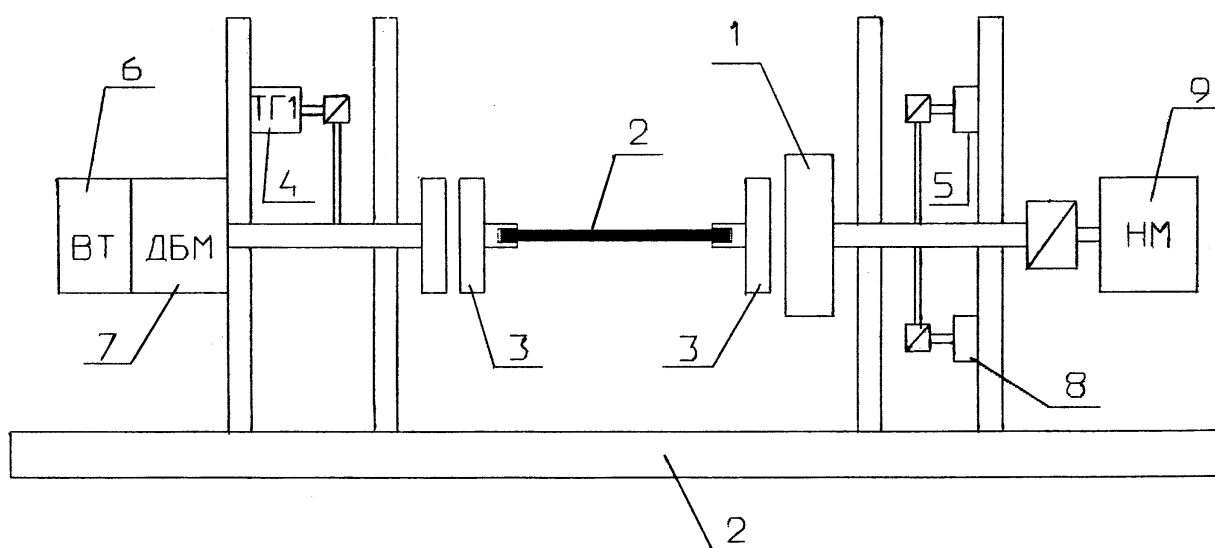


Рисунок 4.3 – Кинематическая схема механической части стенда

Управление стендом осуществляется от отдельного блока управления, в состав которого входят:

- Электронные блоки управления двигателем – ГОН, модулятор и фазочувствительное усилительно-преобразовательное устройство, осуществляющее демодуляцию и усиление по мощности сигналов, снимаемых с вторичных (квадратурных) обмоток ДПР. Питание перечисленных блоков осуществляется от отдельно расположенного источника постоянного тока +27 В.
- Блок (плата) типовой системы регулирования (БТСР) электроприводом, реализующая подчиненную (каскадную) систему регулирования и включающая два пропорциональных регулятора – скорости и положения.
- Набор плат адаптивных регуляторов различных структур, предназначенных для улучшения показателей качества системы электропривода.

- Двухполярный стабилизированный источник питания постоянного тока  $\pm 15$  В для питания потенциометрического датчика положения ДП2, БТСР и адаптивных регуляторов.

Все элементы управления стендом вынесены на переднюю панель блока управления, изображение которой показано на рисунке 4.4.

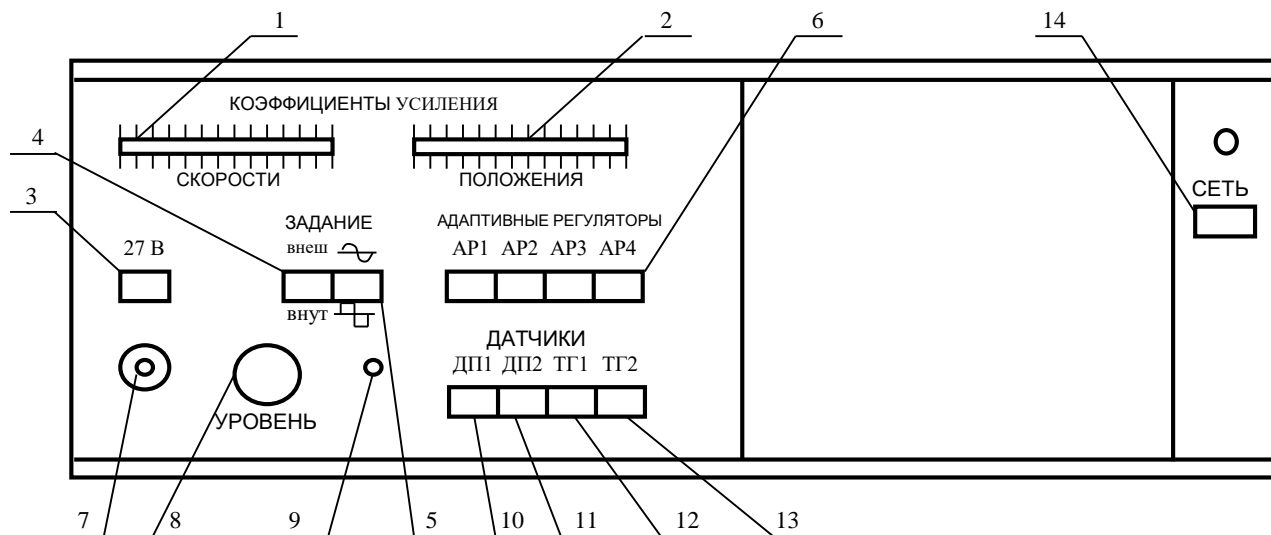


Рисунок 4.4 – Передняя панель блока управления стендом

На передней панели блока управления (см. рисунок 4.4) расположены: кнопки включения питающих напряжений  $+27$  В (3) и  $\cong 220$  В (14); потенциометры для регулирования коэффициентов усиления регуляторов положения (1) и скорости (2); кнопка (4) переключения задающего воздействия либо от внутреннего блока (утоплена), либо от генератора внешних сигналов (отпущена); кнопка преобразования синусоидального сигнала в прямоугольный (5); кнопки включения адаптивных регуляторов (6); штекер подключения задающего сигнала (7); регулятор уровня задающего сигнала (8); кнопка подачи задающего ступенчатого воздействия (9); кнопки подключения обратных связей от датчиков положения, расположенных на валах двигателя (10) и механизма (11), и от тахогенераторов (12) и (13).

На задней панели блока управления, изображенной на рисунке 4.5, размещены разъемы X1 (39) и X2 (25) для подключения блока управления к стенду, шнуры ввода питания (26 и 27) и штекеры для контроля сигналов.

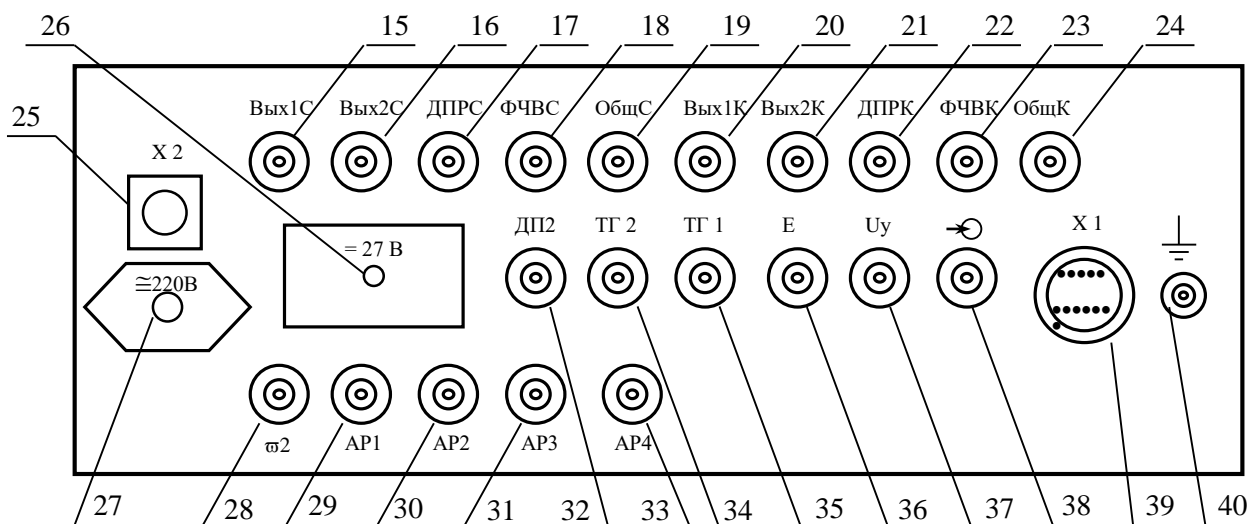


Рисунок 4.5 – Задняя панель блока управления стендом

#### 4.4. Задание

4.4.1. Получить и провести анализ осциллограмм напряжений УДС и УДК, снимаемых со статорных обмоток ДПР, выходных напряжений фазочувствительного выпрямителя (ФЧВ), фазных напряжений двигателя УС и УК.

4.4.2. Экспериментальным путем получить и построить графики регулировочных характеристик БМДПТ при разомкнутой и замкнутой обратной связи по скорости двигателя.

4.4.3. Экспериментальным путем получить и построить графики механических характеристик БМДПТ при разомкнутой и замкнутой обратной связи по скорости двигателя.

4.4.4. Сравнить полученные характеристики БМДПТ с соответствующими характеристиками коллекторного двигателя постоянного тока и сделать вывод по результатам работы.

#### 4.5. Указания по выполнению работы

4.5.1. Исследование работы отдельных узлов БМДПТ.

1. Отсоединить вал двигателя на стенде от вала механизма (отвернуть винты в имитаторе зазора 3 на рисунке 4.3). Убедиться, что на передней панели блока управления стендом отключены все датчики и адаптивные регуляторы (кнопки 6, 10–13 – отжаты), а потенциометры регуляторов скорости и положения (1 и 2) находятся в крайнем левом положении. Включить питание блока управления 220 В переменного тока и 27 В постоянного тока (кнопки 14 и 3 на рисунке 4.4).

2. Подключить вход осциллографа к клеммам 37, 40 и установить регулятором уровня 8 значение управляющего напряжения двигателя  $U_y = 0,3$  В, при нажатой кнопке 9.

3. Подключить первый вход осциллографа к клеммам 17, 19 (общий вход), а второй вход к клемме 22, наблюдать и зарисовать диаграммы напряжений  $U_{ДС}$  и  $U_{ДК}$ , снимаемых со статорных обмоток ДПР. Определить по осциллографу масштаб времени и значение частоты напряжений  $U_{ДС}$  и  $U_{ДК}$ .

4. Изменить значение напряжения  $U_Y$  (в пределах 0,1–2 В) и выяснить, как влияет изменение значения управляющего напряжения двигателя на характер кривых  $U_{ДС}$  и  $U_{ДК}$ , сравнивая диаграммы с полученными в п. 3.

5. Аналогично п. 3 и 4 наблюдать и зарисовать диаграммы выходных напряжений фазочувствительного выпрямителя (ФЧВ) при различных значениях  $U_Y$  (подключить первый вход осциллографа к клеммам 18 и 19 – общий, а второй к клемме 23).

6. Аналогично п. 5 наблюдать и зарисовать диаграммы фазных напряжений двигателя  $U_C$  и  $U_K$  при различных значениях  $U_Y$  (подключить сначала первый вход осциллографа к клеммам 15 и 16, а второй к клемме 20).

#### 4.5.2. Определение регулировочной характеристики БМДПТ.

1. Подключить первый вход осциллографа к клеммам 37, 40 (общий), а второй к клемме 35. Установить регулятором уровня 8 значение управляющего напряжения двигателя  $U_Y$ , обеспечивающее вращение двигателя с минимально возможной скоростью. Измерить значения напряжения  $U_Y$  и напряжения тахогенератора, расположенного на валу двигателя.

2. Увеличивая малыми порциями значение управляющего напряжения двигателя до максимального значения (примерно 1 В), заполнить таблицу, сняв 8–10 точек:

$U_Y, В$									$\approx 1$
$U_{ТГ}, В$									

3. По данным таблицы построить график зависимости скорости вращения двигателя  $\omega_1$  от  $U_Y$ . При построении графика учесть, что значение напряжения тахогенератора, равное 4 В, соответствует скорости вращения двигателя, равной 1000 об/мин.

#### 4.5.3. Определение механической характеристики БМДПТ

1. Соединить вал двигателя с валом механизма жесткой вставкой.

2. Задать  $U_Y = 0,3 В$ . Установить значение напряжения источника питания тормозной муфты  $U_{ИП} = 0$ . Подключить вход осциллографа к клеммам 35, 40, измерить значение напряжения тахогенератора на холостом ходу.

3. Увеличивая с помощью тормозной муфты (меняя  $U_{ИП}$ ) момент нагрузки до максимального значения (примерно 2 Нм, что соответствует  $U_{ИП} = 0,5 В$ ), заполнить таблицу сняв 4–5 точек:

$M, Нм$	$M_{ХХ}$								$\approx 2$
$U_{ТГ}, В$									0,5

4.5.4. Определение механической характеристики БМДПТ в замкнутом контуре регулирования скорости

1. Замкнуть контур скорости, нажав кнопку 12.

2. Повторить п. 2 и 3 предыдущего параграфа. В отчете обе механические характеристики (в разомкнутой и замкнутой системе) должны быть построены на одном графике в координатных осях  $\omega_1$  и  $M$ .

## 4.6. Требования к оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется согласно требованиям и записывается в файл с именем: **ЛР4\_Ф\_И\_гр.docx** (Ф\_И – Фамилия и Имя студента, гр – номер группы, .docx) и размещается на диске общего доступа.

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- описание цели и задач работы, задания и исходных данных;
- описание последовательности проведения исследований;
- все исследуемые схемы с комментариями;
- функциональную схему БМДПТ;
- результаты осциллографирования сигналов на обмотках ДПР и СД в виде временных диаграмм с указанием масштаба времени;
- таблицы с результатами измерений;
- графики регулировочной и механических характеристик двигателя при разомкнутом и замкнутом контуре скорости;
- выводы по каждому пункту программы работы;
- сравнение характеристики БМДПТ с соответствующими характеристиками коллекторного двигателя постоянного тока;
- выводы по работе.

## 4.7. Вопросы для самопроверки

4.7.1. Объясните принцип работы БМДПТ.

4.7.2. Как влияет изменение входного напряжения двигателя на характер напряжений на фазах статора двигателя? Поясните это явление.

4.7.3. Чем отличаются регулировочная и механическая характеристики БМДПТ от соответствующих характеристик обычного двигателя постоянного тока?

4.7.4. Каково влияние замкнутого контура скорости на механическую характеристику двигателя?

## 5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### «Исследование динамики и синтез системы управления следящим бесконтактным моментным приводом»

#### 5.1. Цель и задачи работы

Построение математической модели бесконтактного моментного двигателя постоянного тока (БМДПТ), синтез системы управления следящим бесконтактным моментным приводом (БМП) с жесткой кинематической связью и исследование динамики БМП

#### 5.2. Теоретическая часть

БМП, построенный на базе двигателей серии ДБМ (см. лабораторную работу № 4), успешно применяется в различных отраслях оборонной и гражданской промышленности России [3]. По сравнению с обычным коллекторным приводом постоянного тока БМП обладает гораздо большей надежностью и сроком службы. В качестве перспективных областей применения БМП можно выделить следующие:

- быстродействующие программные или следящие системы угловой стабилизации высокой точности с динамической ошибкой 1...3 угловых мин. и менее (как правило, в безредукторном исполнении);
- работающие в особо тяжелых условиях эксплуатации системы автоматического управления авиационной, космической и морской техники в редукторном и безредукторном исполнении с повышенными показателями надежности и срока службы (с наработкой на отказ 20...50 тыс. ч и более);
- исполнительные системы роботов и манипуляторов;
- товары бытового назначения (стиральные машины, кухонные комбайны и т. п.), медицинские приборы (аппараты «искусственная почка» и принудительного кровообращения, где предъявляются повышенные требования к уровню шума, пульсаций вращающего момента и т. п.);
- приводы мотор-колес электрифицированных транспортных средств, генераторы в ветросиловых установках.

Хотя двигатели серии ДБМ проектировались преимущественно для безредукторных систем, практика показала, что они стали применяться большей частью в редукторных или, по крайней мере, «малоредукторных» приводах, например, с одной парой в зубчатой передаче.

Ввиду малости значений постоянных времени фазы обмотки статора  $T_\phi$  и усилительно-преобразовательного устройства  $T_y = 0,15-0,2$  мс, а также невысокой номинальной скоростью бесконтактного привода, математическая модель БМДПТ полностью совпадает с известной моделью коллекторного двигателя постоянного тока, питаемого от тиристорного преобразователя. В структурном виде упрощенная математическая модель БМП с жесткой кинематической связью между двигателем и механизмом представлена на рисунке 5.1.

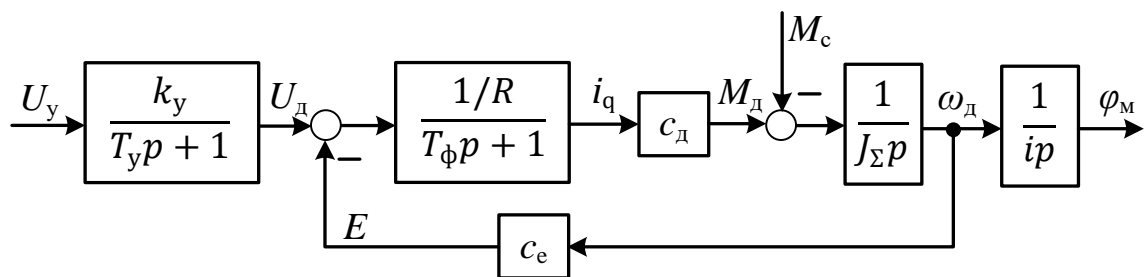


Рисунок 5.1 – Структурная математическая модель БМП

Параметры математической модели могут быть найдены из следующих соотношений:

- $U_y = 10$  В – номинальное напряжение на входе усилительно-преобразовательного устройства;
- $U_d = 27$  В – номинальное питающее напряжение двигателя;
- $\varphi_M = 120$  град – номинальный угол поворота механизма;
- сопротивление фазы  $R = U_d / I_{\Pi}$ ;
- конструктивная постоянная двигателя  $c_e = c_d = M_{\Pi} / I_{\Pi}$ ;
- коэффициент усилительно-преобразовательного устройства  $k_y = U_d / U_y$ ;
- суммарный момент инерции ротора двигателя и механизма  $J_{\Sigma} = J_d + J_M / i^2 = \gamma \cdot J_d$ .

Для автоматического поддержания переменных электропривода на требуемых значениях реализуют контуры регулирования каждой из переменных. Для объекта, изображенного на рисунке 5.1, можно построить три контура регулирования: контуры тока и скорости двигателя, а также контур положения механизма. Контуры удобно выстраивать каскадом, т. е. строить подчиненную систему регулирования.

Выбор типа регуляторов и настройку их параметров проводят, обеспечивая оптимизацию работы автоматической системы и требования технического задания на выполнение проекта.

Один из известных критериев модульного (технического) оптимума обеспечивает выбор параметров регулятора так, чтобы АЧХ замкнутой системы имела форму, близкую к прямоугольной. Наиболее близкую по форме к прямоугольной АЧХ имеет фильтр Баттерворта, передаточная функция которого для 2-го порядка имеет вид:

$$W_{zc}(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + \sqrt{2} T p + 1} = \frac{1}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1},$$

где обозначено  $T = \sqrt{2} T_{\mu}$ .

Из последней записи передаточной функции замкнутой системы с единичной обратной связью легко получить передаточную функцию оптимизированной разомкнутой системы:

$$W_{pc}^{opt}(p) = \frac{1}{2T_{\mu} p \cdot (T_{\mu} p + 1)}, \quad (5.1)$$

здесь  $T_\mu$  – некомпенсируемая (малая) постоянная времени системы. Следовательно, оптимальный выбор регулятора должен обеспечить эту передаточную функцию в разомкнутой системе.

Возвращаясь к структурной схеме БМП, запишем передаточную функцию разомкнутого контура регулирования тока (см. рисунок 5.2) и упростим ее, обозначив за  $T$  – наибольшую постоянную времени контура тока, а за  $T_\mu$  – сумму малых постоянных времени:

$$W_{\text{КТ}}(p) = R_{\text{РТ}}(p) \cdot \frac{k_y}{T_y p + 1} \cdot \frac{1/R}{T_\phi p + 1} \cdot \frac{k_{\text{ДТ}}}{T_{\text{ДТ}} p + 1} \approx R_{\text{РТ}}(p) \cdot \frac{k_y \cdot k_{\text{ДТ}}/R}{(T p + 1)(T_\mu p + 1)}.$$

Приравняв последнее выражение к выражению (5.1), получим передаточную функцию оптимального регулятора тока:

$$R_{\text{РТ}}(p) = \frac{(T p + 1)}{2 T_\mu p \cdot k_y \cdot k_{\text{ДТ}}/R}.$$

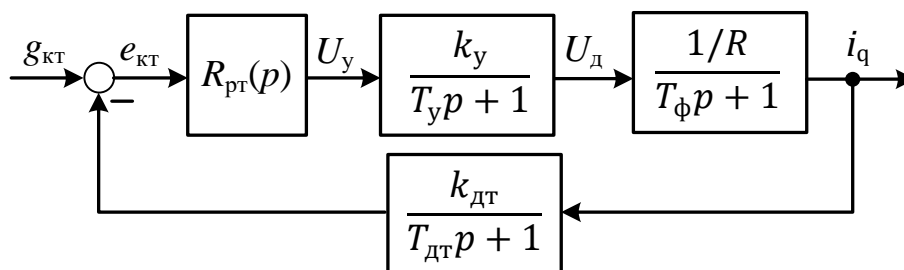


Рисунок 5.2 – Контур тока БМП

Очевидно, что регулятор тока, настроенный на модульный оптимум, имеет ПИ-закон с коэффициентом передачи, равным  $k_{\text{РТ}} = \frac{T}{2 T_\mu \cdot k_y \cdot k_{\text{ДТ}}/R}$  и постоянной интегрирования, равной  $T_{\text{РТ}} = T$ .

Внешний контур подчиненной системы регулирования целесообразно настраивать на симметричный оптимум с целью уменьшения установившейся ошибки. В этом случае передаточная функция оптимизированной разомкнутой системы принимает вид:

$$W_{\text{РС}}^{\text{ОПТ}}(p) = \frac{4 T_\mu p + 1}{8 T_\mu^2 p^2 (T_\mu p + 1)}. \quad (5.2)$$

Расчет системы регулирования значительно упрощается, моделирование становится более наглядным при использовании системы относительных единиц и направленном нормировании структурных схем. Обучающимся предлагается самостоятельно воспользоваться этой методикой [4].

### 5.3. Описание объекта исследования

Объектом исследования является БМДПТ серии ДБМ и система управления этим электродвигателем, соединенным с механизмом жестким валом через редуктор.



## 5.4. Задание

5.4.1. В относительных единицах построить математическую модель БМДПТ, связанного с механизмом жесткой кинематической связью через редуктор. Реализовать модель в программе «Анализ систем» и исследовать ЭМС при изменении напряжения управления  $U_y$  и момента сопротивления нагрузки  $M_c$ . Полученные осциллограммы тока, скорости, положения двигателя и механизма снабдить комментариями.

5.4.2. Построить и рассчитать систему подчиненного регулирования ЭМС при настройке контура тока и скорости на модульный оптимум, а контура положения механизма на симметричный оптимум.

5.4.3. Исследовать построенную ЭМС. Оценить качество регулирования. Сопоставить полученные показатели качества регулирования с теоретическими.

5.4.4. Исследовать работу системы ЭМС при изменении задающего и возмущающего воздействий, изменении момента инерции механизма. Полученные осциллограммы снабдить комментариями.

5.4.5. Повторить исследования предыдущего пункта при условии ограничения тока и скорости электропривода.

## 5.5. Указания по выполнению работы

5.5.1. Все исследования и графики следует снабжать комментариями, значения настроек регулятора – записывать, показатели качества регулирования сводить в таблицу.

5.5.2. Параметры электродвигателя и механизма указаны в таблице 5.1 и выбираются в соответствии с номером варианта.

Таблица 5.1 – Варианты заданий

№ варианта	Тип двигателя	Пусковой ток, А	Пусковой момент, Нм	Частота вращения при холостом ходе, мин <sup>-1</sup>	Максимальная механическая мощность, Вт	Электромагнитная постоянная времени, мс	Момент инерции ротора, кгм <sup>2</sup> · 10 <sup>-4</sup>	Передаточное число редуктора	Коэффициент соотношения масс двигателя и механизма
		$I_{\text{п}}$	$M_{\text{п}}$	$n_0$	$P$	$T_{\text{ф}}$	$J_{\text{д}}$	$i$	$\gamma$
<b>0</b>	<b>ДБМ105-0,6-1-2</b>	<b>6,27</b>	<b>1,66</b>	<b>975</b>	<b>42</b>	<b>0,14</b>	<b>15</b>	<b>34</b>	<b>1,3</b>
1	ДБМ50-0,04-3-2	1,1	0,084	3400	7,5	0,3	0,06	6	1,4
2	ДБМ50-0,04-6-2	4,5	0,171	6800	30	0,3	0,06	14	5,2
3	ДБМ70-0,16-1,5-2	2,29	0,41	1435	15	0,3	0,7	20	3,8
4	ДБМ70-0,16-3-2	9,1	0,82	2870	62	0,3	0,7	8	4,4
5	ДБМ100-0,4-0,75-2	2,94	0,88	860	20	0,6	2,3	9	2,5
6	ДБМ100-0,4-1,5-2	11,7	1,75	1720	79,0	0,6	2,3	6,5	6,2
7	ДБМ120-1-0,2-2	1,25	1,25	260	7,8	0,6	10	3,2	3,6
8	ДБМ120-1-0,4-2	5,0	2,5	520	34	0,6	10	2,8	5
9	ДБМ120-1-0,8-2	18,0	4,5	1030	121	0,6	15	5,5	2,2
10	ДБМ120-1,6-0,5-3	8,1	4,2	490	54	0,4	30	6,3	1,8
11	ДБМ150-4-0,3-2	11,7	8,8	345	79	1,5	30	5	5,8
12	ДБМ150-4-0,6-2	43,5	16,3	690	294	1,5	30	7	4,8
13	ДБМ150-4-1,5-3	310	52,4	1520	2080	1,2	30	15	3
14	ДБМ185-6-0,2-2	10,6	12,7	215	71	2,0	90	3	7,2
15	ДБМ185-6-0,4-2	42	25,2	430	284	2,0	90	4	6,6
16	ДБМ185-10-0,04-2	1,29	8,7	38	9	2,5	150	1,7	9,4
17	ДБМ185-10-0,04-3	3,27	14,7	57	22	2,5	150	2	1,6

Окончание табл. 5.1

№ варианта	Тип двигателя	Пусковой ток, А	Пусковой момент, Нм	Частота вращения при холостом ходе, мин <sup>-1</sup>	Максимальная механическая мощность, Вт	Электромагнитная постоянная времени, мс	Момент инерции ротора, кгм <sup>2</sup> ·10 <sup>-4</sup>	Передаточное число редуктора	Коэффициент соотношения масс двигателя и механизма
		$I_n$	$M_n$	$n_0$	$P$	$T_\phi$	$J_d$	$i$	$\gamma$
18	ДБМ185-16-0,15-2	18,2	29,2	160	122	3,0	150	2,5	8,5
19	ДБМ185-16-0,3-2	71,0	56,8	320	476	3,0	150	3,5	3,4
20	ДБМ40-0,01-2,5-3	0,47	0,027	4530	3	0,03	0,06	1,5	15,3
21	ДБМ40-0,01-5-3	1,9	0,054	9060	13	0,03	0,06	2	9
22	ДБМ40-0,025-4-3	3,6	0,14	6600	24	0,04	0,11	5	1,1
23	ДБМ63-0,06-3-2	1,63	0,139	3040	11	0,05	0,7	6	8,3
24	ДБМ85-0,16-2-2	2,7	0,324	2150	18	0,07	2,3	1,5	3,7
25	ДБМ85-0,16-2-3	2,76	0,33	2150	18	0,06	2,3	4,8	5,2
26	ДБМ105-0,4-0,75-3	3,6	0,97	955	24	0,09	10	8,2	7,9
27	ДБМ105-0,6-0,5-3	2,76	1,2	590	18	0,1	15	5,3	10,5
28	ДБМ130-1,6-0,5-2	3,37	1,85	470	23	0,24	30	7,1	4,7

## 5.6. Порядок выполнения работы

5.6.1. Осуществите переход к относительным единицам в структурной математической модели БМП, изображенной на рисунке 5.1, и изобразите эту схему в нормированном виде. В качестве базовых значений переменных БМП выберете номинальные или пусковые значения согласно варианту задания. В качестве базового значения скорости удобно выбрать скорость идеального холостого хода, рассчитываемое по формуле:  $\omega_0 = U_d / c_d$ . Рассчитайте значения относительных коэффициентов передач всех звеньев структурной схемы.

5.6.2. Реализуйте нормированную модель БМП в программе «Анализ систем». Пример этой модели показан на рисунке 5.3. Исследуйте изменение всех переменных БМП при пуске двигателя, изменении напряжения управления  $U_y$  и момента сопротивления нагрузки  $M_c$ . Значение момента сопротивления нагрузки установите не более 0,7 от пускового. Сохраните и вставьте в отчет осциллограммы, снабдив их комментариями. В выводе сопоставьте установившиеся значения переменных БМП в нормированной структуре с их реальными значениями.

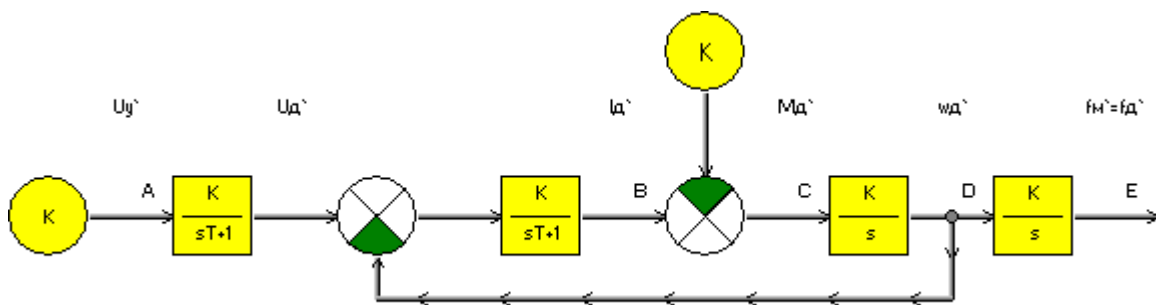


Рисунок 5.3 – Реализация нормированной структурной модели БМП

5.6.3. Рассчитайте регулятор тока двигателя при настройке его на модульный оптимум. Убедитесь, что использование нормированной структуры значительно упрощает расчет. Постройте расчетную (упрощенную) и полную модели контура тока так, как показано на рисунках 5.4а и 5.4в. Получите переходные процессы тока двигателя в обеих структурах, сопоставив и сравнив их между собой (пример см. на рисунке 5.6а).

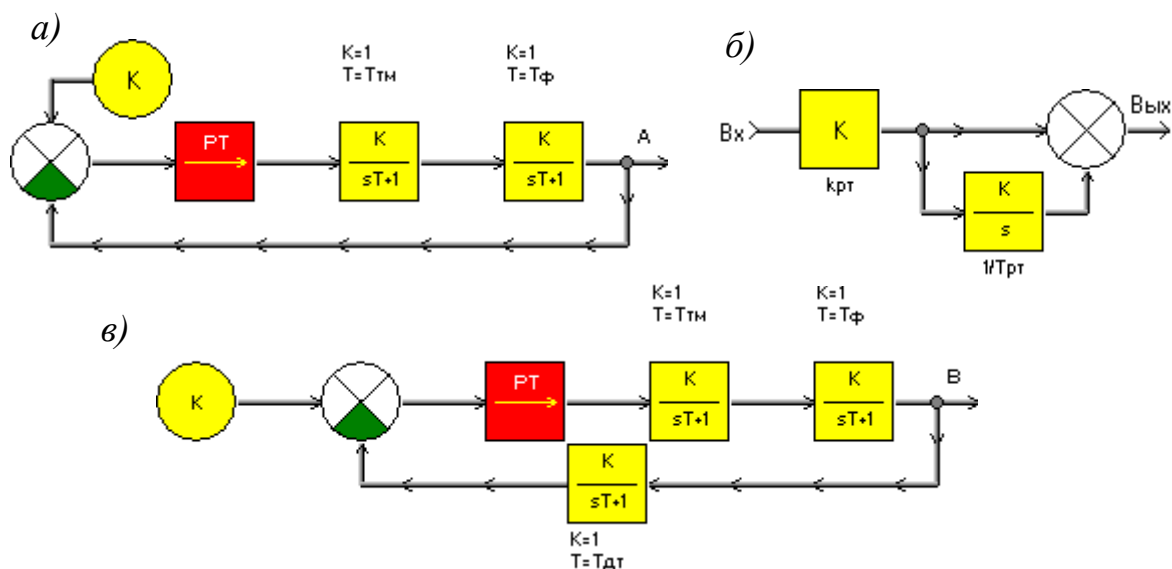


Рисунок 5.4 – Моделирование контура БМП:

а) расчетная схема; б) ПИ-регулятор тока в виде «тела» макровставки;  
 в) полная схема контура тока

5.6.4. Рассчитайте регуляторы скорости при настройке его на модульный оптимум и положения двигателя при настройке его на симметричный оптимум. Постройте модели контуров скорости и положения. Пример полной модели контура скорости показан на рисунке 5.5.

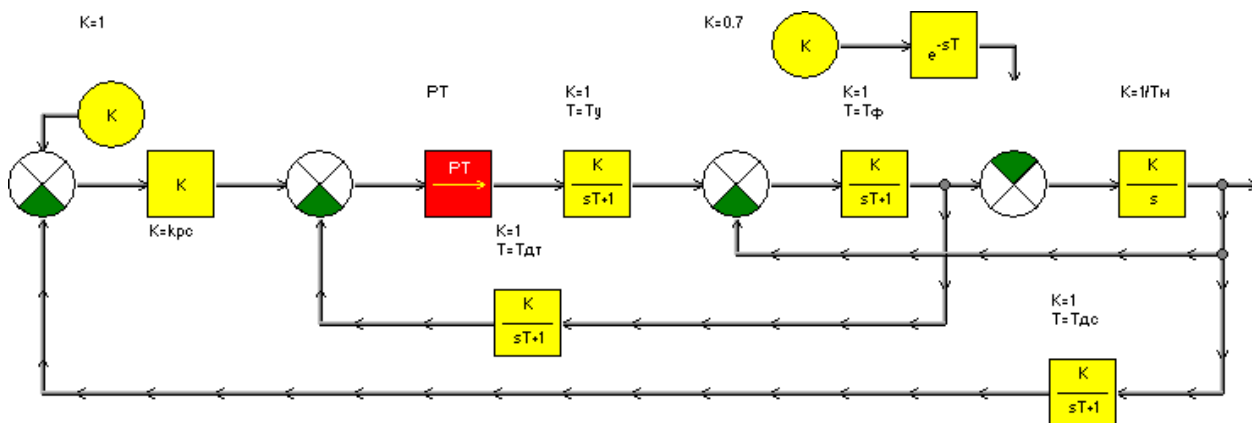


Рисунок 5.5 – Полная модель контура скорости БМП

В качестве примера на рисунке 5.6а показаны переходные процессы по току двигателя. Черная кривая соответствует току в расчетном контуре тока, изображенном на рисунке 5.4а. Красная кривая – току в полном контуре тока, изображенном на рисунке 5.4б. На рисунке 5.6б показаны переходные процессы по скорости двигателя, снятые в расчетном контуре скорости – черная кривая, и в полном контуре скорости, изображенном на рисунке 5.5 – красная кривая.

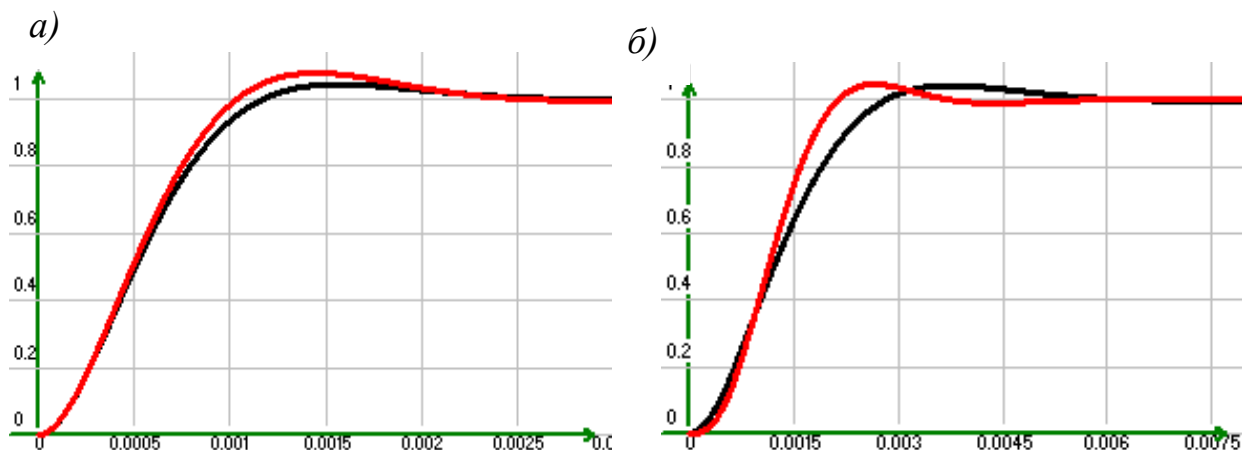


Рисунок 5.6 – Переходные процессы:

а) тока; б) скорости

(черная кривая – расчетный контур; красная кривая – полный контур)

5.6.5. Исследуйте работу контуров скорости и положения. Получите переходные процессы всех переменных БМП при изменении задающего воздействия и момента сопротивления нагрузки  $M_c$ , изменении момента инерции механизма. Сохраните и вставьте в отчет осциллограммы, снабдив их комментариями. Оценить качество регулирования. В выводе сопоставьте полученные показатели качества регулирования с теоретическими, сопоставьте значения максимального тока и момента БМП с пусковыми, проанализируйте причины увиденного.

5.6.6. Повторите исследования по п. 5.6.5 при условии ограничения тока и скорости электропривода. Блок ограничения переменной следует устанавливать на входе контура регулирования этой переменной. Например, чтобы ограничить ток, в системе регулирования скорости БПМ, пусковым, блок ограничения следует установить после регулятора скорости (см. рисунок 5.4).

## 5.7. Требования к оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе записывается в файл с именем: **ЛР5\_Ф\_И\_гр.docx** (Ф\_И – Фамилия и Имя студента, гр – номер группы, .docx) и размещается на диске общего доступа. Файл с отчетом и **все файлы со схемами**, созданные в программе «Анализ систем» в результате выполнения лабораторной работы должны быть сохранены в папке с Вашей фамилией внутри папки УЭМС на диске общего доступа.

Отчет должен содержать:

- все исследуемые схемы с комментариями;
- расчет настроек регуляторов тока, скорости и положения БМП;
- переходные процессы в контурах регулирования тока, скорости и положения БМП, сопоставление (с использованием показателей качества регулирования) теоретических и фактических переходных процессов;

- исследование работы контуров тока, скорости и положения БМП (с использованием показателей качества регулирования) по задающему и возмущающему воздействиям, изменении момента инерции механизма;
- исследование работы БМП при ограничении его координат;
- выводы по каждому этапу работы и по работе в целом.

## 5.8. Вопросы для самопроверки

5.8.1. Доказать, что  $J$  суммарное  $= J_{дв} + J_{м/2}$  (структурные преобразования и закон сохранения).

5.8.2. Почему скорость идеального х.х. равна  $\omega_0 = U_d/c_d$ ?

5.8.3. Докажите, что в относительных единицах углы поворота двигателя и механизма равны между собой

5.8.4. Почему сопротивление фазы  $R = U_d/I_n$ ?

5.8.5. Изобразите структурную схему БМП в относительных единицах.

5.8.6. Изобразите контур тока в относительных единицах.

5.8.7. Изобразите контур скорости БМП в относительных единицах.

5.8.8. Изобразите контур положения БМП в относительных единицах.

5.8.9. Из передаточной функции фильтра Баттерворта  $W_{зс}(p) = 1/(2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1)$  получите передаточную функцию разомкнутой системы, оптимизированной на модульный оптимум:

$$W_{рс}^{опт}(p) = 1/(2T_\mu p \cdot (T_\mu p + 1)).$$

5.8.10. Почему показатели качества регулирования синтезированного электропривода отличаются от теоретических?

5.8.11. Почему следует ограничивать координаты электропривода? Как выполнить ограничение?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Благодарный, Н. С. Теория автоматического управления. Анализ систем автоматического управления в примерах и задачах. Часть 1: практикум / Н. С. Благодарный. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. – 66 с. – Текст: непосредственный.
2. Дудников, Е. Г. Автоматическое управление в химической промышленности: учебник для вузов / Е. Г. Дудников, А. В. Казаков, Ю. Н. Софиева [и др.]; под ред. д-ра технических наук Е. Г. Дудникова. – М.: Химия, 1987. – 368 с. – Текст: непосредственный.
3. Микеров, А. Г. Появление отечественных бесконтактных моментных двигателей / А. Г. Микеров. – Текст: непосредственный // Control Engineering Россия. – 2019. – № 4(82). – С. 76–79.
4. Борцов, Ю. А., Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с. – Текст: непосредственный.



## ПРИЛОЖЕНИЕ

### НАЗНАЧЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Программный комплекс (ПК) «Анализ систем» предназначен для моделирования и анализа систем автоматического управления (САУ). САУ реализуется в виде структурной схемы состоящей из блоков, входящих в библиотеку ПК.

Все блоки классифицированы и представлены в ПК в виде нескольких вкладок библиотеки. Перечислим эти вкладки:

- генераторы входных воздействий (генератор постоянного сигнала, генераторы сигналов различной формы, генератор шума, генератор сигнала, заданного пользователем в виде графика);
- сумматоры;
- линейные звенья ( типовые линейные звенья);
- нелинейные звенья ( типовые нелинейные элементы, а также нелинейность, задаваемая пользователем в виде графика);
- импульсные модуляторы (АИМ, ШИМ, ЧИМ);
- математические блоки (блоки, производящие с входным сигналом одну из математических функций);
- макросы (блоки, для формирования вложенных схем);
- прочие (нечеткий регулятор, нейронная сеть, блок пользователя, блоки для формирования схем с переменной структурой).

Программный комплекс «Анализ систем» обладает следующими возможностями:

- построение переходного процесса в любой точке системы;
- построение фазового портрета в любой точке системы;
- построение ЛАЧХ/ФЧХ любого контура, как замкнутого, так и разомкнутого;
- построение годографа линейной части любого контура, как замкнутого, так и разомкнутого;
- построение обратного инверсного ЭККУ нелинейной части системы;
- исследование устойчивости контура с помощью критерия Найквиста и методом гармонического баланса;
- исследование устойчивости нелинейного контур с помощью критерия В. М. Попова;
- определение передаточной функции любого контура системы;
- упрощение структурных схем;
- синтез структуры по введенной передаточной функции;
- синтез структуры регулятора для заданного объекта управления (методом обратных задач динамики);
- параметрическая оптимизация (подстройка коэффициентов корректирующих звеньев для наилучшего переходного процесса);
- генерация текста программы на различных языках программирования, рассчитывающей прохождение сигнала через заданный контур;
- возможность экспорта рисунков и графиков через буфер обмена Windows, совместимость с пакетами WinFact, MathCad, MathLib.

## 1. ИНСТРУКЦИЯ ПО РАБОТЕ С ПРОГРАММОЙ

Пакет является приложением Windows. На главном окне находится меню и панель инструментов. Команды меню и панели инструментов работают с активным окном.


Исследуемую систему следует собрать в окне редактора (на наборной панели). Собирается схема из элементов, представленных в библиотеке блоков.

Для исследования временных характеристик системы на вход системы следует поставить требуемый генератор сигнала, например генератор постоянного сигнала.

Собрав схему, требуется отметить точки просмотра (контрольные точки).

Собранную схему можно сохранить в файл или прочитать из файла. Для исследования системы следует выбрать соответствующий пункт меню «Расчет» или «Синтез» (см. возможности пакета «Анализ систем»).

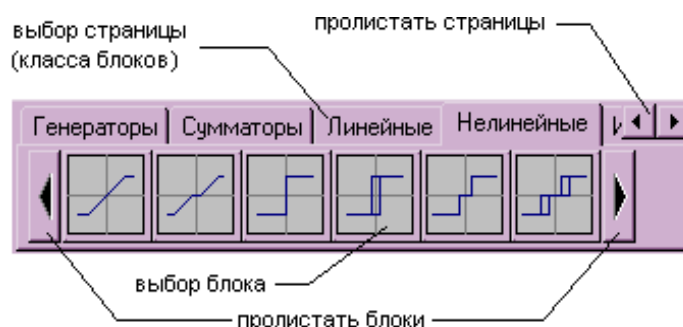
### 1.1. Открытие нового окна редактора

При запуске пакета «Анализ систем» новое окно (наборная панель) открывается автоматически. Чтобы открыть новое окно редактора выберите пункт меню «Файл | Новый» или нажмите кнопку «» на панели инструментов.

Если окно редактора уже не нужно, то вы можете закрыть его, нажав крестик в углу окна или закрыть сочетанием клавиш Ctrl-F4.

### 1.2. Выбор и установка блока на наборную панель

Чтобы выбрать блок, следует нажать кнопку с изображением этого блока на нужной вкладке панели инструментов.



Чтобы установить выбранный блок, сделайте двойной щелчок мыши по пустой ячейке наборной панели. Двойной щелчок по занятой ячейке удалит ее содержимое.

При подводе мыши к блоку всплывает подсказка о том, что это за блок. Более подробную помощь по блоку можно получить, нажав F1, когда указатель мыши указывает на блок.

### **1.3. Удаление содержимого ячейки редактора**

Удалить содержимое ячейки можно несколькими способами:

- Двойным щелчком мыши по занятой ячейке.
- Нажатием Del, когда фокусное выделение находится на удаляемом элементе.
- С помощью удаления фрагмента схемы.

### **1.4. Соединительные линии между блоками**

Чтобы проложить соединительные линии (связи) между блоками следует:

1. Подвести указатель мыши к блоку, от которого следует положить соединительную линию.
2. Нажать и удерживать правую кнопку мыши.
3. Отвести указатель мыши по прямой к точке конца линии.
4. Отпустить правую кнопку мыши. При этом проложится соединительная линия, если это возможно.
5. Если цель с первого раза не достигнута, то вы можете повторить операцию из конца проложенной линии.

### **1.5. Установка параметров блока**

Для того чтобы выставить параметры блока, щелкните правой клавишей мыши по блоку, параметры которого Вы хотите установить.

В большинстве случаев откроется окно «Свойства блока». Однако ряд специальных блоков (как, например, нечеткий регулятор) имеют собственные окна настроек.

### **1.6. Отметка контрольных точек**

Для того чтобы отметить контрольные точки (точки просмотра), нужно:

1. Щелкнуть правой клавишей мыши по ячейке окна редактора с соединительной линией, на которой необходимо отметить точку.
2. На экране появится всплывающее меню, в котором следует выбрать имя точки от «А» до «L». Уже установленные точки в этом меню будут недоступны.

Чтобы удалить точку, следует проделать следующее:

Щелкнуть правой клавишей мыши по ячейке окна редактора с помеченной точкой.

### **1.7. Копирование, перемещение и удаление фрагментов схемы**

*Как копировать фрагмент в буфер обмена:*

1. Выделите фрагмент схемы.

2. Выберите пункт меню «Редактор | Копировать». Этот пункт меню также есть во всплывающем меню редактора. Для вызова этого меню необходимо кликнуть правой клавишей мыши в выделение.

*Как вырезать фрагмент в буфер обмена:*

1. Выделите фрагмент схемы.
2. Выберите пункт меню «Редактор | Вырезать». Этот пункт меню также есть во всплывающем меню редактора. Для вызова этого меню необходимо кликнуть правой клавишей мыши в выделение.

*Как вставить фрагмент из буфера обмена:*

1. Щелкните правой клавишей мыши в свободную ячейку редактора или нажмите Ctrl-Enter, когда фокусное выделение указывает на свободную ячейку.
2. В появившемся всплывающем меню выберите пункт меню «Вставить». Этот пункт меню также есть в меню «Редактор». Перед его использованием следует повести фокусное выделение к нужной ячейке редактора. Это можно сделать как клавишами управления курсора, так и щелчком левой клавиши мыши.

*Как удалить фрагмент схемы:*

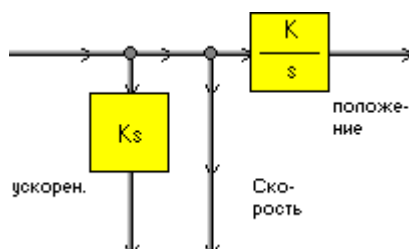
1. Выделите фрагмент схемы.
2. Выберите пункт меню «Редактор | Удалить». Этот пункт меню также есть во всплывающем меню редактора. Для его вызова необходимо кликнуть правой клавишей мыши в выделение.

*Как переместить фрагмент схемы:*

1. Выделите фрагмент схемы.
2. Подведите указатель мыши, так, чтобы он находился внутри выделения.
3. Удерживая левую кнопку мыши, перетащите фрагмент в новые координаты любого окна редактора.

## 1.8. Вставка комментария

Свободная ячейка схемы может использоваться для комментария. Например, составляя сложную схему, Вы хотите подписать название сигналов.




Для того чтобы вставить комментарий, щелкните правой кнопкой мыши по свободной ячейке схемы или, подведя клавишами управления курсором фокусное выделение к свободной ячейке, нажмите **Ctrl-Enter**. Появится всплывающее меню, в котором следует выбрать пункт «Вставить комментарий».

В появившемся окне запроса следует ввести текст комментария. Для переноса слов используйте символ «-».

Для изменения текста комментария щелкните правой клавишей мыши по комментарию или, подведя клавишами управления курсором фокусное выделение, нажмите **Ctrl-Enter**.

### 1.9. Сохранение схемы системы в файл


Для того чтобы сохранить схему в файл, следует выбрать пункт меню «Файл | Сохранить» или нажать на кнопку  на панели инструментов. При этом, если схема не была ни разу сохранена, появится запрос имени файла.

Если необходимо сохранить схему под другим именем, то выберите пункт меню «Файл | Сохранить как...». При этом запрос имени файла будет появляться в любом случае.

*Примечание:*

При правильной инсталляции пакета «Анализ систем» на Ваш компьютер системе Windows становятся доступны файлы пакета «Анализ систем». Последние сохраняемые файлы добавляются в меню «Документы» операционной системы Windows, а также регистрируется расширение файлов «\*.sa».

### 1.10. Загрузка схемы из файла

Для того чтобы загрузить сохраненную схему из файла, следует выбрать пункт меню «Файл | Открыть» или нажать на кнопку  на панели инструментов. При этом появится запрос имени файла.

После подтверждения, открывается новое окно редактора, куда загружается выбранный файл.

Для удобства пользователя список четырех последних открытых или сохраненных файлов находится внизу меню «Файл». Выбор одного из этих пунктов меню открывает соответствующий файл.

### 1.11. Работа с макровставками

Пакет «Анализ систем» позволяет работать с макровставками.

Откройте новое окно редактора и наберите в нем тело макровставки. Тело макровставки должно иметь элементы сопряжения с основной схемой, называемые входом и выходом макровставки. Тело макровставки должно иметь один выход, а также от нуля до трех входов.


Подключение макровставки в основную схему осуществляется через блок «макровставка». На схеме может быть несколько этих блоков с одинаковыми телами макровставки.

## 2. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММЫ

### 2.1. Построение переходного процесса

Под переходным процессом понимаются графики зависимости сигналов в контрольных точках от времени.

Перед построением переходного процесса следует отметить все контрольные точки, в которых следует построить переходный процесс.


Для построения переходного процесса выберите пункт меню «Расчет | Переходной процесс» или нажмите F9 или нажмите кнопку  на панели инструментов. При этом собранная структурная схема проверится на наличие ошибок. Если ошибок нет, откроется окно «Настройка переходного процесса», в котором Вам следует ввести параметры расчета и вывода переходного процесса.

В частности, выставить, в каких точках будет наблюдаться переходный процесс. Выставить флажок автомасштаба, если необходимо автоматически определять масштабы графиков, или ввести максимальное и минимальное значение амплитуды по каждому из графиков. Также следует выставить флаг «Единый масштаб», если необходимо все графики переходных процессов рисовать в едином масштабе по оси ординат, или снять этот флаг, если необходимо все графики рисовать в разных масштабах. В последнем случае по оси ординат мгновенное значение сигналов будет откладываться в процентах, от введенной или автоопределенной в процессе автомасштабирования амплитуды.

### 2.2. Построение фазового портрета

Под фазовым портретом понимается график зависимости сигнала в одной точке от сигнала в другой точке или зависимость производной сигнала по времени от самого сигнала в течение времени.

Перед построением фазового портрета следует отметить все контрольные точки, в которые будут участвовать в построении фазового портрета.

Для построения фазового портрета выберите пункт меню «Расчет | Фазовый портрет» или нажмите Shift-F9 или нажмите кнопку  на панели инструментов. При этом собранная структурная схема проверится на наличие ошибок. Если ошибок нет, откроется окно «Настройка фазового портрета», в котором Вам следует ввести параметры расчета и вывода фазового портрета.


В частности, выставить точку, сигнал которой будет откладываться по оси абсцисс, и точку, значение сигнала в которой будет откладываться по оси ординат, или  $dx/dt$ , если по оси ординат следует откладывать производную по времени от сигнала, откладываемого по оси абсцисс.

## 2.3. Построение ЛАЧХ/ФЧХ

Под ЛАЧХ понимается логарифмическая амплитудно-частотная характеристика линейной части контура системы.

ФЧХ – это фазово-частотная характеристика линейной части контура системы.

Перед построением ЛАЧХ и ФЧХ следует отметить контрольными точками исследуемый контур системы. В зависимости от расположения контрольных точек контур будет считаться замкнутым или разомкнутым (см. Замкнутые и разомкнутые контуры).

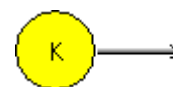
Для построения ЛАЧХ и ФЧХ следует выбрать пункт меню «Расчет | ЛАЧХ/ФЧХ» или нажать Ctrl-L или нажать на кнопку  на панели инструментов. При этом собранная схема проверится на наличие ошибок. Если ошибок нет, то откроется окно «Настройка ЛАЧХ/ФЧХ», в котором следует выбрать параметры вывода ЛАЧХ/ФЧХ, а также необходимость вывода ЛАЧХ или ФЧХ.

## 3. БИБЛИОТЕКА БЛОКОВ

Структурная схема системы собирается из элементов, входящих в библиотеку блоков. Все блоки классифицированы и представлены в программном комплексе в виде многостраничной палитры. Далее перечислены блоки, которые будут использоваться при выполнении лабораторных работ.

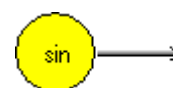
### 3.1. Генераторы

– Генератор постоянного сигнала предназначен для выдачи ступенчатого воздействия. Ставится на вход системы, чтобы увидеть переходный процесс в ней.



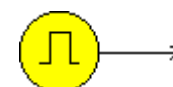
*Параметры:* величина воздействия  $K$  – выходное значение сигнала.

– Генератор гармонического сигнала. Выходной сигнал блока определяется по формуле:  $U_{\text{вых}}(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi)$ .



*Параметры:* амплитуда выхода – значение амплитуды  $A$ ; частота  $f$  (Гц) – частота синусоиды, измеряемая в герцах; фаза – начальная фаза сигнала, измеряемая в угловых градусах.

– Генератор импульса от  $t_1$  до  $t_2$ . Выходной сигнал блока в каждый момент времени представляет собой импульс, который начинается в момент времени  $t_1$  и заканчивается в момент времени  $t_2$ .

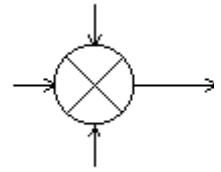


*Параметры:* амплитуда выхода – значение амплитуды  $A$ ; время начала  $t_1$  (с) – значение времени  $t_1$  в секундах; время конца  $t_2$  (с) – значение времени  $t_2$  в секундах ( $t_1 < t_2$ ).

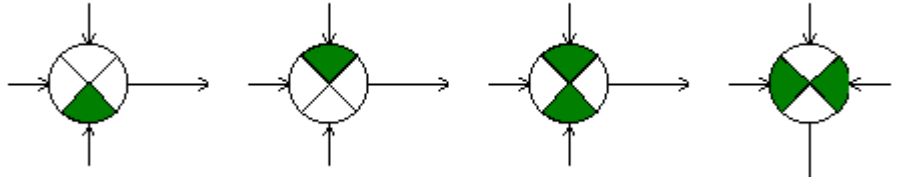
### 3.2. Сумматоры

– Положительный сумматор. Служит для алгебраического сложения сигналов, поданных на его входы. На  $n$  входах может быть от 1 до 3 входных сигналов. На единственном выходе (его можно вывести с любой стороны) – сумма входных сигналов.

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = \sum_{i=1}^n U_{\text{ВХ},i}(t)$$



– Отрицательные сумматоры. Служит для алгебраического сложения (вычитания) входных сигналов, поданных на его входы. Вход, закрашенный цветом, является инверсным входом. Сигнал, поданный на этот вход, будет входить в сумму со знаком «минус».



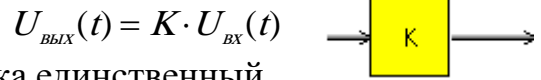
На  $n$  входах может быть от 1 до 3 входных сигналов. На единственном выходе (его можно вывести с любой стороны) – сумма входных сигналов.

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = \sum_{i=1}^n b_i \cdot U_{\text{ВХ},i}(t) \quad b_i = \begin{cases} 1, & \text{положительный\_вход} \\ -1, & \text{отрицательный\_вход} \end{cases}$$

### 3.3. Линейные звенья

– **Пропорциональное звено.**

Выходное значение этого блока равняется входному, помноженному на константу. У блока единственный вход и единственный выход. Они могут располагаться с любой стороны.  $W(s) = K$

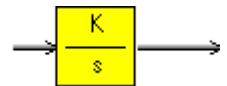


Параметры передаточной функции: коэф. усиления  $K$ .

– **Интегральное звено.**

Блок предназначен для интегрирования входного сигнала по времени. Результат умножается на константу  $K$ . У блока единственный вход и единственный выход. Они могут располагаться с любой стороны.  $W(s) = \frac{K}{s}$

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = \int_0^t k \cdot U_{\text{ВХ}}(\tau) d\tau + C$$



Параметры передаточной функции: коэф. усиления  $K$ ; нач. усл. – начальные условия интегрирования, обычно это значение равно 0.

– **Дифференциальное звено.**

Выходное значение этого блока дифференцируется по времени и умножается на константу  $K$ . У блока единственный вход и единственный выход. Они могут располагаться с любой стороны.  $W(s) = Ks$

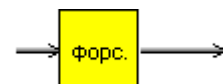
$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = K \frac{dU_{\text{ВХ}}(t)}{dt}$$



Параметры передаточной функции: коэф. усиления  $K$ .

– **Форсирующее звено.** Блок реализует следующую формулу:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = K \left( T \frac{dU_{\text{ВХ}}(t)}{dt} + U_{\text{ВХ}}(t) \right)$$



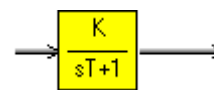


У блока единственный вход и единственный выход. Они могут располагаться с любой стороны.

$$W(s) = K(sT+1)$$

*Параметры передаточной функции:* постоянн. времени Т, коэф. усиления К.

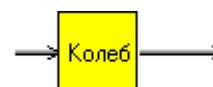
– **Апериодическое звено.** Блок реализует апериодическое (инерционное) звено. У блока единственный вход и единственный выход. Они могут располагаться с любой стороны.



*Параметры передаточной функции:* постоянн. времени Т, коэф. усиления К; начал. усл. – начальные условия интегрирования, обычно это значение равно 0.

$$W(s) = \frac{K}{sT+1}$$

– **Колебательное звено.** Блок реализует колебательное звено. У блока единственный вход и единственный выход. Они могут располагаться с любой стороны.

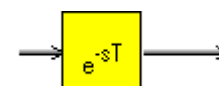


*Параметры передаточной функции:* постоянн. времени Т, коэф. демпфирования  $\xi$  или коэффициент затухания; коэф. усиления К; начал. усл. – начальные условия интегрирования, обычно это значение равно 0.

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

– **Звено задержки.** Блок реализует задержку сигнала во времени. У блока единственный вход и единственный выход. Они могут располагаться с любой стороны.

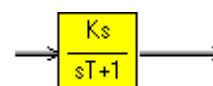
$$U_{\text{вых}}(t) = K \cdot U_{\text{вх}}(t - T)$$



$$W(s) = e^{-sT}$$

*Параметры передаточной функции:* постоянн. времени Т, коэф. усиления К.

– **Реальное дифференцирующее звено.** На практике сделать идеальное дифференцирующее звено на аналоговой технике не получается. У блока единственный вход и единственный выход. Они могут располагаться с любой стороны.



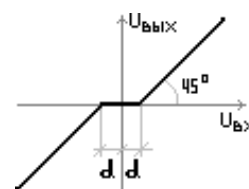
$$W(s) = K \frac{s}{sT+1}$$

*Параметры передаточной функции:* постоянн. времени Т, коэф. усиления К.

### 3.4. Нелинейные звенья

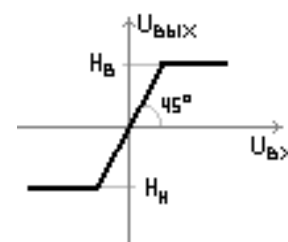
– **Зона нечувствительности.** Нелинейный элемент. Зависимость выхода от входа изображено на рисунке.

*Параметры:* величина зоны нечувствительности d.



– **Нелинейность типа «ограничение».** Нелинейный элемент. Зависимость выхода от входа изображено на рисунке.

*Параметры:* Ограничение сверху  $H_B > 0$  – верхнее ограничение на входной сигнал. Это значение может быть как положительным, так и отрицательным.



Ограничение снизу  $H_n < 0$  – нижнее ограничение на сигнал. Это значение может быть как положительным, так и отрицательным, но  $H_v > H_n$ .

– **Зона нечувствительности и ограничение.**

Нелинейный элемент. Зависимость выхода от входа изображено на рисунке.

*Параметры:* величина зоны нечувствительности  $d$ .

Ограничение сверху  $H_v > 0$  – верхнее ограничение на входной сигнал. Это значение может быть как положительным, так и отрицательным.

Ограничение снизу  $H_n < 0$  – нижнее ограничение на сигнал.

Это значение может быть как положительным, так и отрицательным, но  $H_v > H_n$ .

– **Двухпозиционное реле.** Нелинейный элемент.

Зависимость выхода от входа изображено на рисунке.

*Параметры:* Вых. сигнал при  $X > X_{пор}$  – значение  $U_1$ .

Вых. сигнал при  $X < X_{пор}$  – значение  $U_0$ .

Порог срабатывания  $X_{пор}$  – значение  $X_{пор}$ .

В общем случае не исключена ситуация  $U_1 < U_0$ .

В ТАУ обычно рассматривается этот элемент при  $X_{пор} = 0$ .

– **Двухпозиционное реле с гистерезисом.**

Нелинейный элемент. Зависимость выхода от входа изображено на рисунке.

*Параметры:* Вых. сигнал при  $X > X_{сраб}$  – значение  $U_1$ .

Т. е. выходной сигнал при срабатывании.

Вых. сигнал при  $X < X_{отпуск}$  – значение  $U_0$ . Т. е. выходной сигнал при отпуске.

Порог срабатывания  $X_{сраб}$  – значение  $X_{сраб}$ .

Порог отпуская  $X_{отпуск}$  – значение  $X_{отпуск}$ .

В общем случае не исключена ситуация  $U_1 < U_0$ .

– **Трехпозиционное реле.** Нелинейный элемент.

Зависимость выхода от входа изображено на рисунке.

Значение  $U_{вых}$  при  $X_{сраб2} < X_{вх} < X_{сраб1}$  равно нулю.

*Параметры:* Вых. сигнал при  $X > X_{сраб1}$  – значение  $U_1$ .

Вых. сигнал при  $X < X_{сраб2}$  – значение  $U_0$ .

Правый порог срабатывания  $X_{сраб1}$  – значение  $X_{сраб1}$ .

Левый порог срабатывания  $X_{сраб2}$  – значение  $X_{сраб2}$ .

В общем случае не исключена ситуация  $U_1 < U_0$ .

– **Трехпозиционное реле с гистерезисом.**

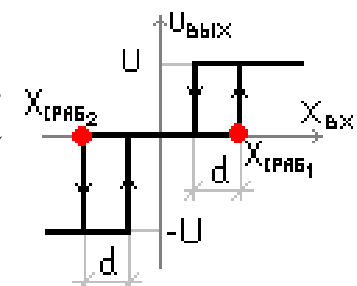
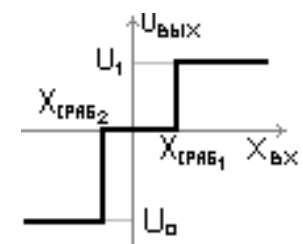
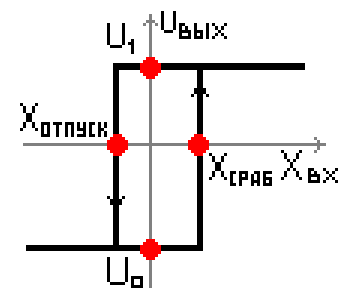
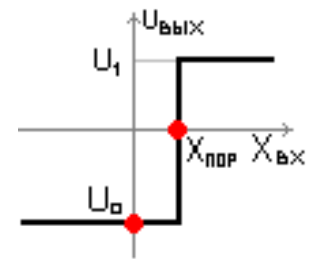
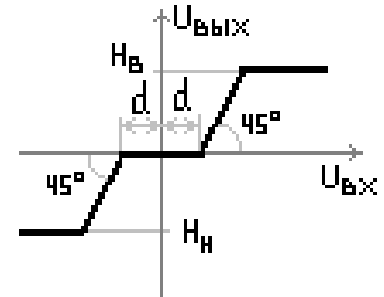
Нелинейный элемент. Зависимость выхода от входа изображено на рисунке.

Значение  $U_{вых}$  при  $X_{сраб2} + d < X_{вх} < X_{сраб2} - d$  равно нулю.

*Параметры:* Амплитуда выхода – значение  $U$ .

Ширина гистерезиса – значение  $d$ .

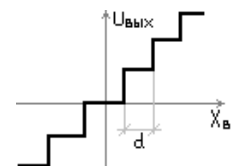
Правый порог срабатывания  $X_{сраб1}$  – значение  $X_{сраб1}$ .



Левый порог срабатывания  $X_{сраб2}$  – значение  $X_{сраб2}$ .

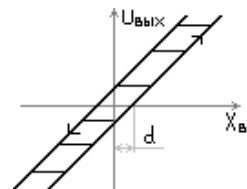
В общем случае не исключена ситуация  $U_1 < U_0$ .

– **Квантователь (по уровню).** Нелинейный элемент. Переводит непрерывный входной сигнал в дискретный сигнал выхода. Зависимость выхода от входа изображено на рисунке.



*Параметры:* Шаг квантователя – значение  $d$ .

– **Люфт.** Нелинейный элемент. Имитирует наличие люфта в системе. Зависимость выхода от входа изображено на рисунке.



*Параметры:* Половина ширины люфта – значение  $d$ .

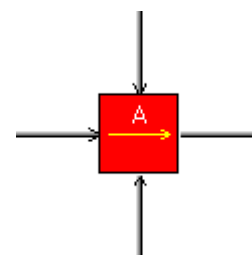
– **Нелинейность пользователя.** Блок имеет один вход и один выход. Они могут быть расположены с любой стороны блока.



Данный блок представляет собой нелинейность, форму которой пользователь может задать сам. Для этого нужно вызвать параметры блока. Появится окно «редактор нелинейности», в котором есть возможность задать любую нелинейность.

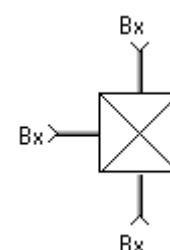
### 3.5. Макросы

– **Макровставка.** Блок предназначен для организации связи между телом макровставки и основной схемой. Под телом макровставки понимается содержимое файла вставки.



Блок имеет от 0 до 3 входов и один выход, расположенный справа. Каждый вход блока соединяется с соответствующим входом в теле макровставки. При установке параметров этого блока открывается окно «Макровставка», в котором можно выбрать текст, который будет отображаться в блоке, а также сам файл вставки.

*Входы макровставки.* Данные блоки используются только в теле макровставки. Они являются связующим звеном с основной схемой. Соединительные линии, подведенные с соответствующей стороны к блоку макровставка, находящемуся в основной схеме, соединяется с одним из этих блоков, находящимся на схеме тела макровставки. Тело макровставки может содержать только один вход с данной ориентации. Т. е. на схеме не может быть, например, два входа сверху.



*Выход макровставки.* Данный блок используется только в теле макровставки. Он является связующим звеном с основной схемой. Соединительная линия, выведенная с правой стороны от блока макровставка, находящегося в основной схеме, соединяется с этим блоком, находящимся на схеме тела макровставки. Тело макровставки может содержать только один выход.



Окно «макровставка» открывается при установке параметров для блока «Макровставка». В данном окне в строке «Имя» следует установить имя

макровставки. Это имя будет записано на изображение блока «Макровставка». В строке «Имя файла», следует записать имя файла тела макровставки. Для удобства пользователя существует кнопка «Обзор», которая позволяет открыть проводник, с помощью которого можно поискать этот файл.

*Внимание:* Если файл находится в рабочей директории «Анализа систем», то пути к нему не прописывается. Если рабочая директория по каким-либо причинам будет изменена, то связь с файлом тела макровставки разорвется, и к файлу нужно будет снова прописать путь.

Учебное издание

**Благодарный Николай Семенович**

# **Управление электромеханическими системами**

## **Часть 1**

*Практикум*

Редактор и корректор А. А. Чернышева  
Техн. редактор Д. А. Романова

Темплан 2022 г., поз. 5039/22

---

Подписано к печати 29.08.2024.

Формат 60x84/16.

Бумага тип № 1.

Печать офсетная.

Печ.л. 3,8.

Уч.-изд. л. 3,8.

Тираж 30 экз.

Изд. № 5039/22.

Цена «С».

Заказ №

---

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,

198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.