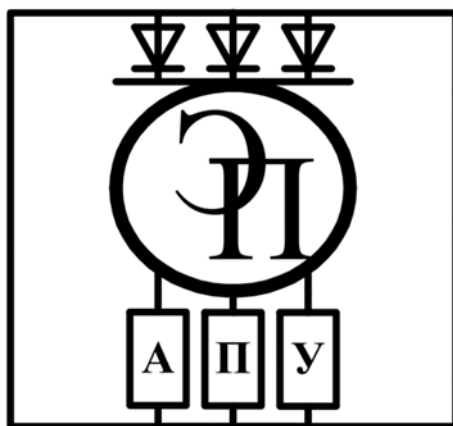


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

# СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

*Методические рекомендации к курсовому проектированию  
для студентов специальности  
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»  
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2021

УДК 658.012.011.56  
ББК 32.965  
С40

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «06» января 2021 г., протокол № 6

Составитель ст. преподаватель И. С. Стасенко

Рецензент Ю. С. Романович

В методических рекомендациях приводятся основные методы расчета автоматических систем управления.

Учебно-методическое издание

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Ответственный за выпуск	Г. С. Ленеvский
Корректор	А. А. Подошеvко
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изделий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2021

## Содержание

Введение.....	4
1 Цель и задачи курсового проекта.....	5
2 Индивидуальное задание к курсовому проекту.....	6
3 Содержание курсового проекта.....	8
4 Требования к оформлению курсового проекта.....	9
5 Общетеоретические сведения.....	10
5.1 Этапы проектирования САР.....	10
5.2 Определение системы автоматического регулирования.....	13
5.3 Цель управления и алгоритм управления.....	14
5.4 Переменные и параметры САР.....	15
5.5 Функциональный анализ САР.....	15
5.6 Составление структурной схемы.....	19
5.7 Определение устойчивости САР.....	20
5.8 Исследование установившегося режима САР.....	20
5.9 Исследования САР в переходных режимах.....	21
Список литературы.....	21

## **Введение**

Проектирование систем автоматического управления – многоэтапный процесс, эффективность которого во многом определяется правильным применением основных принципов построения сложных систем.

Курсовое проектирование является завершающим этапом изучения курса «Системы автоматического регулирования» (САР). При выполнении курсового проекта по САР выполняется эскизный проект.

## 1 Цель и задачи курсового проекта

Целью курсового проекта по дисциплине «Системы автоматического регулирования» является закрепление знаний, полученных на лекциях, практических занятиях, лабораторном практикуме, а также приобретение студентами навыков эскизного проектирования и расчета современных систем автоматического управления и регулирования, и практических навыков самостоятельного решения задач, возникающих при разработке современных систем автоматического управления (САУ).

Перед выполнением курсового проекта студенту необходимо знать:

- основные положения теории автоматического управления;
- принципы работы основных элементов САУ;
- высшую математику, основы электротехники, теоретической механики, теорию дифференциальных уравнений, теорию функции комплексной переменной, численные методы интегрирования;
- основные положения ЕСКД.

После выполнения курсового проекта студент должен уметь:

- выполнять типовые расчеты САУ и ее элементов: находить передаточные функции, строить частотные характеристики, анализировать САУ на устойчивость;
- преобразовывать структурные схемы моделей САУ и ее элементов;
- рассчитывать переходные процессы.

После выполнения курсовой работы студент должен освоить:

- основные принципы проектирования САУ;
- в условиях разработки конкретной САУ правильно формулировать исходную цель проектирования и выделить задачи, которые следует решить для достижения этой цели;
- проводить функциональный анализ проектируемой системы в соответствии с заданной целью управления и физическими принципами работы объекта управления;
- по результатам функционального анализа рассматривать основные известные решения, применяемые в системах данного класса, и, учитывая заданные требования, выбрать для последующей проработки наиболее перспективную структуру;
- основные методы решения задач анализа и синтеза, применяемые в современной теории автоматического управления;
- составлять дифференциальные уравнения протекающих в САУ переходных процессов и на этой основе получить математическую модель в форме структурной схемы;
- выбирать наиболее эффективные для конкретного случая методы синтеза;
- для проверки разработанного алгоритма выбирать и применять наиболее эффективный метод анализа;
- формулировать технические предложения по реализации разработанного алгоритма, в том числе при использовании в САУ управляющей ЭВМ, грамотно поставить задачу программной реализации алгоритма;

– знать основные способы реализации разработанных алгоритмов управления;

– использовать при проектировании вычислительную технику, в том числе элементы систем автоматизированного проектирования;

– оформлять расчетно-пояснительную записку и графическую часть проекта в соответствии с требованиями ЕСКД;

– кратко, технически грамотно и последовательно докладывать о процессе и результатах проектирования САР.

В целом курсовой проект по САР должен дать студенту базовую практическую подготовку по эскизному проектированию современных САУ, которая в дальнейшем потребуется ему при выполнении проекта по курсу «Системы управления электроприводами» и дипломного проекта.

## 2 Индивидуальное задание к курсовому проекту

Для исследования предлагается разработка системы управления для объекта, представленного в виде системы дифференциальных уравнений шестого порядка.

Например, система уравнений (2.1)–(2.5):

$$\frac{T_7 \cdot dx_3(t)}{dt} + k_7 \cdot x_3(t) + \frac{T_7 \cdot dx_4(t)}{dt} + k_7 \cdot x_4(t) = \frac{T_1 \cdot dy(t)}{dt} + k_1 \cdot y(t); \quad (2.1)$$

$$x_2(t) = \frac{T_2 \cdot dx_3(t)}{dt} + k_2 \cdot x_3(t); \quad (2.2)$$

$$g(t) = \frac{T_6 \cdot dx_1(t)}{dt} + k_6 \cdot x_1(t) + k_5 \cdot x_3(t); \quad (2.3)$$

$$\frac{T_3 \cdot dx_2(t)}{dt} + k_3 \cdot x_2(t) = x_1(t) - \frac{T_3 \cdot df(t)}{dt} - k_3 \cdot f(t); \quad (2.4)$$

$$x_1(t) = \frac{T_{41} \cdot d^2x_4(t)}{dt^2} + \frac{T_{42} \cdot dx_4(t)}{dt} + k_4 \cdot x_4(t), \quad (2.5)$$

где  $g(t)$  – задающий сигнал;

$f(t)$  – возмущающий сигнал;

$y(t)$  – выходной сигнал;

$x_i(t)$  – промежуточный сигнал.

Каждому студенту предлагается уникальная система, которой присваивается вариант.

Параметры объекта управления представлены в таблице 2.1 и выбираются на основании первой цифры варианта задания (например, для варианта 5 необходимо выбрать 0-й набор данных, для варианта 46 – 4-й набор данных).

Таблица 2.1 – Исходные данные

Параметр структурной схемы	Набор исходных данных									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$T_1$	0,204	0,296	0,711	0,248	0,323	0,45	0,602	0,387	0,092	0,749
$T_2$	0,084	0,035	0,018	0,031	0,057	0,092	0,076	0,02	0,026	0,003
$T_3$	0,044	0,517	0,758	0,842	0,154	0,536	0,547	0,721	0,883	0,584
$T_{41}$	0,089	0,057	0,013	0,052	0,042	0,055	0,08	0,002	0,025	0,002
$T_{42}$	0,276	0,712	0,911	0,055	0,785	0,358	0,217	0,231	0,542	0,909
$T_6$	0,474	0,569	0,062	0,702	0,441	0,142	0,711	0,087	0,456	0,986
$T_7$	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
$k_1$	0,6	8,3	7,8	0,4	8,3	0,1	7,5	6,5	3,5	9,6
$k_2$	0,7	1	0,9	0,7	0,6	1	0,9	0,9	0,1	0,3
$k_3$	4,8	7,6	8,7	8,7	1	6,2	4,6	0,7	3,1	5,2
$k_4$	0,3	0,9	0,1	0,3	0,8	0,5	0,1	0,2	0,2	0,5
$k_5$	0,072	0,018	0,077	0,032	0,039	0,064	0,019	0,007	0,046	0,007
$k_6$	0,9	0,2	0,4	0,5	0,7	0,5	0,4	0,3	0,4	0,6
$k_7$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Кроме этого, при построении регулятора для объекта управления система должна обеспечить показатели качества не меньше, чем величины, указанные в таблице 2.2. Набор исходных данных также выбирается по первой цифре варианта задания.

Таблица 2.2 – Требуемые показатели качества системы управления

Параметр структурной схемы	Набор исходных данных									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$T_{рег,отн}$	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55
$\sigma, \%$	30	25	20	15	10	30	25	20	15	10
$s, \%$	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
$D$	3	8	7	6	8	2	4	9	4	5

В таблице 2.2 приняты обозначения:

$T_{рег,отн}$  – относительное время регулирования характеризует отношение времён регулирования скорректированной системы управления и исходной

системы. В случае если исходная система неуправляемая, время регулирования исходной системы считать равным 10 с;

$\sigma$  – величина перерегулирования, %;

$D$  – диапазон регулирования;

$s$  – статизм при заданном диапазоне регулирования, %.

При определении устойчивости исходного объекта управления необходимо пользоваться критериями устойчивости, представленными в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Критерии определения устойчивости исходного объекта

Номер критерия	Критерий определения устойчивости
0	Критерий Гурвица
1	Критерий Найквиста
2	Критерий Михайлова
3	Логарифмический критерий

Номер критерия определяется как остаток от деления на 4 варианта заданий (например, для варианта 32 – номер критерия 0, т. к. 32 делится нацело на 4; для варианта 45 – номер критерия 1, т. к. 45 делится нацело на 4 с остатком 1).

### 3 Содержание курсового проекта

В ходе разработки курсового проекта студент должен рассмотреть следующие задачи.

Введение.

1 Описание объекта управления.

2 Показатели качества разомкнутой системы управления.

2.1 Составление структурной схемы объекта управления.

2.2 Определение динамических показателей качества.

2.2.1 Определение устойчивости системы.

2.2.2 Определение основных динамических свойств системы по переходной характеристике.

2.2.3 Определение основных динамических свойств системы по распределению корней характеристического уравнения.

2.3 Определение статических свойств объекта управления.

2.3.1 Определение статических характеристик объекта управления.

2.3.2 Определение основных статических свойств системы.

2.4 Построение логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) объекта управления асимптотическим методом.

3 Синтез системы автоматического управления.

3.1 Определение желаемого распределения корней системы управления.

3.2 Синтез желаемого регулятора.

3.2.1 Определение параметров ПИД-регулятора.



3.2.2 Реализация регулятора.

3.3 Определение динамических показателей качества скорректированной САУ.

3.3.1 Определение запасов устойчивости скорректированной САУ.

3.3.2 Определение основных динамических свойств скорректированной САУ по переходной характеристике.

3.4 Определение статических свойств скорректированной САУ.

3.4.1 Определение статических характеристик скорректированной САУ.

3.4.2 Определение основных статических свойств скорректированной САУ.

Заключение.

### **Графическая документация.**

Первый лист А1. Структурная схема нескорректированной САУ, переходная характеристика нескорректированной САУ, карта нулей и полюсов нескорректированной САУ, логарифмическая частотная характеристика (ЛЧХ) нескорректированной САУ.

Второй лист А1. Структурная схема скорректированной САУ, переходная характеристика скорректированной САУ, карта нулей и полюсов скорректированной САУ, схема принципиальная регулятора.

## **4 Требования к оформлению курсового проекта**

Пояснительная записка печатается с использованием компьютера и принтера на одной стороне листа белой бумаги формата А4 (210 × 297 мм). Допускается представлять таблицы и иллюстрации на листах формата А3 (297 × 420 мм) в приложениях к курсовому проекту.

Набор текста осуществляется с использованием текстового редактора Word или его аналогов. При этом необходимо использовать шрифты типа Times New Roman размером 14 пунктов. Количество знаков в строке текста, кроме последней строки абзаца, должно составлять 60–70, межстрочный интервал – 18 пунктов, количество текстовых строк на странице – 39–40. В случае вставки в строку формул допускается увеличение межстрочного интервала.

Абзацный отступ составляет 1,25 см. Устанавливаются следующие размеры полей: верхнего и нижнего – 20 мм, левого – 30 мм, правого – 10 мм. Выравнивание основного текста – по ширине.

Графический материал необходимо выполнять на основании стандартов и ЕСКД.

## 5 Общетеоретические сведения

### 5.1 Этапы проектирования САР

Типовой инженерный алгоритм проектирования САР следующий.

*Первый этап проектирования* – составление математической модели системы регулирования.

Следует отметить, что в курсовом проекте этот этап проектирования упрощен и студенту предлагается уже формализованная система дифференциальных уравнений, описывающих объект управления.

Зная физические процессы, происходящие в объекте, возможно при определенных допущениях описать его поведение аналитически, обычно с помощью дифференциальных, интегро-дифференциальных или разностных уравнений. При этом проектировщик должен знать диапазоны изменения входных и выходных переменных. В результате можно составить структурную схему объекта регулирования с помощью передаточных функций. Если расчеты проводятся на ЭВМ, то по структурным схемам составляются уравнения состояния в канонической или нормальной формах.

Структурные схемы с передаточными функциями элементов являются удобным средством описания систем, по ним можно не только выявить все внутренние связи, но и определить возможные места включения различных устройств компенсации. Данный способ представления объектов особенно часто применяют при частотных методах исследования систем регулирования.

По снятым в процессе экспериментов амплитудным и фазовым частотным характеристикам реальных объектов при различных частотах и амплитудах входных сигналов можно построить упрощенную передаточную функцию объекта. Данный способ дает хорошие результаты лишь для объектов простой структуры, состоящих из набора последовательно соединенных элементов, когда возможно получение промежуточных значений амплитудных и фазовых характеристик после каждого из элементов. Часто исходные данные об объектах задают в виде графиков, числовых таблиц, логарифмических амплитудных и фазовых частотных характеристик. Поскольку математическую модель составляют на основании графических, табличных или экспериментальных данных, то коэффициенты уравнений представляются в виде чисел. Так как графики практически всегда являются нелинейными, то для получения линейных моделей объектов необходимо использовать линеаризацию в приращениях относительно опорной траектории движения или метод наименьших квадратов.

В некоторых случаях экспериментально определяется семейство переходных процессов на выходе объекта при подаче на его вход случайных сигналов. Как известно, такие переходные процессы описываются интегральными уравнениями с импульсной переходной функцией, которая характеризует динамику объекта. Зная импульсную переходную функцию, можно построить вещественную и мнимую частотные характеристики и по ним определять логарифмические (амплитудную и фазовую) характеристики, после чего нетрудно найти математическую модель объекта.

Полученные модели являются математической формализацией процессов в реальных объектах, причем один и тот же объект в зависимости от принятых допущений может быть описан в различной форме. В связи с этим возникло направление, в рамках которого разрабатываются методы определения математической модели, наилучшей в отношении приближения данных наблюдения за входными и выходными переменными нормально функционирующего объекта. Это направление было названо идентификацией. В настоящее время достаточно полно разработаны лишь методы идентификации линейных объектов. Для применения этих методов проектировщик должен найти математические модели замкнутых и разомкнутых систем управления. Последние обычно являются сложными и представляют собой последовательно и параллельно соединенные группы элементов с внутренними и внешними обратными связями. Для них необходимо научиться находить передаточные функции.

*Второй этап проектирования* – выбор устройств неизменяемой и изменяемой частей системы.

К неизменяемой части принято относить исполнительные органы, усилители мощности и измерительные средства. Их обычно выбирают не только с учетом требований к точности и качеству процессов регулирования, но в основном по надежности действия, массогабаритным характеристикам, стоимости, стойкости к влиянию агрессивной среды, взрывобезопасности и т. п.

На втором этапе проектирования составляются математические модели устройств управления, входящих в неизменяемую часть системы. Это обеспечивает основу для построения структуры всей САР.

К изменяемой части системы относят устройства коррекции – динамических характеристик, а также электронные усилители, преобразователи, микропроцессоры и различные дополнительные устройства компенсации сигналов.

*Третий этап проектирования* – решение задачи анализа или синтеза.

Если принято решение о месте включения устройств изменяемой части (т. е. полностью определена структура всей системы), дальнейшее проектирование сводится к решению задачи анализа и задачи синтеза. Обе задачи относятся к классу задач, решаемых для систем с заданной структурой. Но это справедливо лишь, когда действительно структура системы полностью установлена и в процессе проектирования выбирают только типы и параметры устройств изменяемой части. Иначе структуру изменяемой части находят в процессе решения задачи синтеза и одновременно с ее определением выбирают наиболее рациональные параметры исследуемых устройств управления.

Рассмотрим методику решения первой из них – задачи анализа. В данном случае проектировщик располагает полной структурой системы, что намного упрощает проектирование. При этом процесс проектирования сводится к расчетно-теоретической работе, которая выполняется вручную с помощью номограмм и таблиц или автоматически на вычислительных устройствах.

Для упрощения указанных выше ручных и программных операций широко используют методы структурных преобразований, позволяющие представить многоконтурные системы в виде одноконтурных. Следует учесть, что такие преобразования существенно отличаются для линейных и нелинейных систем.

Это связано с невозможностью применения принципа суперпозиции и необходимостью сохранения амплитуды сигнала на входе нелинейной части неизменной независимо от выполняемых преобразований. Поэтому нельзя перемещать линейные передаточные функции за нелинейный элемент. Преобразование линейных передаточных функций, расположенных до нелинейного элемента или за ним, выполняют обычными способами. В результате таких преобразований в большинстве случаев удается отделить нелинейную и линейную части системы друг от друга, что упрощает заполнение расчетов.

Принятый порядок анализа САР состоит в последовательном выполнении следующих действий: исследование устойчивости, точности, качества.

Анализ устойчивости при ручных методах проектирования определяется типом системы: линейная или нелинейная, дискретная или непрерывная.

Устойчивость непрерывных линейных систем может исследоваться с помощью первого метода Ляпунова, а также алгебраических критериев Гурвица, Михайлова и Найквиста. Основным недостатком применения данных критериев следует считать невозможность при этом оценок качества и точности.

Частотные критерии устойчивости предполагают использование передаточных функций для описания системы регулирования и справедливы при ее полной управляемости и наблюдаемости. Тогда критерий устойчивости по Ляпунову аналогичен критериям Михайлова, Найквиста и  $D$ -разбиения Неймарка. Эти критерии применимы к анализу как непрерывных, так и дискретных систем. Однако в первом случае они базируются на методах  $D$ -преобразований, во втором  $z$ -преобразований. Положив  $p = j\omega$ , строятся частотные характеристики, по которым определяют запасы устойчивости систем регулирования по фазам и модулям, и с помощью специальных функций определяются показатели качества и характеристики точности. Большим преимуществом частотных критериев устойчивости является возможность их распространения и на многие типы нелинейных систем.

Исследовать качество непрерывных и дискретных линейных систем можно, анализируя расположение нулей и полюсов передаточной функции замкнутой системы, а также по корневому годографу, интегральным оценкам, вещественным и мнимым частотным характеристикам замкнутой системы. Частотный метод обладает значительными преимуществами, т. к. позволяет по свойствам вещественной частотной характеристики не только находить основные показатели качества, но и строить переходные процессы. При этом используют набор графиков и номограмм. Построение переходных процессов в нелинейных непрерывных системах ведут с помощью методов припасовывания или численных процедур интегрирования уравнений. Оба эти способа реализуются в виде программ для вычислительных устройств.

Нелинейности в замкнутых системах часто приводят к режимам автоколебаний, которые большей частью недопустимы на выходе систем регулирования.

Проблема повышения динамической точности является основной, т. к. без ее решения невозможно обеспечить выполнение возложенных на систему регулирования задач. Иначе говоря, системы автоматической стабилизации не

смогут поддерживать режимы регулирования с заданной техническими условиями точностью, системы программного управления выведут объект на недопустимые рабочие режимы, следящие системы будут воспроизводить входные сигналы с большими искажениями.

На характеристики точности значительное влияние оказывают не только сигналы управления и возмущения, но и помехи, поступающие извне или образующиеся внутри системы. Поэтому при анализе точности САР учитывают два типа ошибок: регулярные и случайные.

Для уменьшения регулярных ошибок необходимо увеличивать коэффициенты усиления устройств управления. Но при этом следует всегда помнить, что одновременно возрастает нежелательное влияние нелинейностей на поведение системы, с ростом коэффициентов усиления увеличивается полоса пропускания системы, что приводит к возрастанию ошибки от действия шумов. Проектировщик может, например, выбрать параметры системы таким образом, чтобы обеспечивалась минимальная сумма квадратов динамической и случайной ошибок.

Задачи синтеза в самом простом случае сводятся к выбору типа и параметров последовательных, параллельных и последовательно-параллельных корректирующих устройств, обеспечивающих наиболее точное воспроизведение регулярных сигналов управления. Возможна и более сложная постановка задачи, когда требуется определить тип и параметры корректирующего устройства, обеспечивающего минимальную квадратическую ошибку помех при заданных динамической ошибке и времени протекания переходного процесса. В результате решения задачи синтеза в обоих случаях в систему вводятся линейные корректирующие устройства. Они реализуются в виде фильтров или программ для микропроцессоров.

## ***5.2 Определение системы автоматического регулирования***

Система, состоящая из объекта управления (ОУ) и управляющего устройства (УУ), взаимодействующих между собой без непосредственного участия человека в соответствии с алгоритмом управления, называется системой автоматического регулирования (САР). Объектом управления является техническое устройство, состояние которого можно изменять при помощи входных сигналов по так называемым каналам управления.

Управляющим устройством называется элемент САР, который в соответствии с заложенным в него алгоритмом управления осуществляет воздействие на ОУ, приводящее к достижению цели управления. Под алгоритмом управления понимается совокупность предписаний, реализация которых в УУ приводит к достижению цели управления.

Алгоритм управления может быть реализован как при помощи корректирующих устройств (непрерывных и дискретных), так и программно в управляющей микроЭВМ или в специализированной микропроцессорной системе.

При рассмотрении и описании работы предложенной САР следует выделить устройства, составляющие ОУ и УУ.

Входные переменные системы или ее отдельных элементов называются обычно воздействиями, которые могут быть внешними или внутренними, задающими или возмущающими. Так как ОУ функционирует в определенной внешней среде, возможно влияние возмущающих воздействий по каналам возмущения, среди которых следует выделять основные возмущающие воздействия, действующие как на ОУ, так и на САР в целом, и второстепенные.

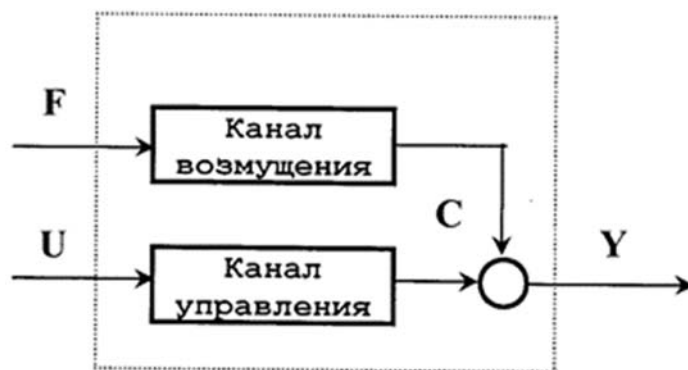


Рисунок 5.1 – Схема объекта управления

В современных условиях часто встречается иерархический принцип построения САР, который выражается в том, что САР более низкого уровня может являться объектом управления системы более высокого уровня.

### 5.3 Цель управления и алгоритм управления

При анализе предложенной схемы САР следует в первую очередь четко определить цель управления. Цель управления определяется разработчиком САУ по требованиям технологического процесса, в котором участвует САР.

Задача управления рассматривается в теории как математическая задача, однако в отличие от многих других имеет ту особенность, что допускает не одно решение, а несколько различных решений. Отсюда вытекает необходимость строгой математической формулировки цели управления. Другими словами, управление представляет собой такую организацию того или иного процесса, которая обеспечивает достижение определенной цели.

В теории автоматического управления сформулированы следующие основные цели управления:

- 1) стабилизация (поддержание постоянства выходных переменных на определенном уровне);
- 2) программное управление (изменение выходных переменных производится по заранее заданной программе);
- 3) слежение за входными задающими сигналами;
- 4) оптимизация (формирование задающим устройством (ЗУ) управляющих воздействий, удовлетворяющих некоторому функционалу качества).

Кроме того, иногда в качестве цели управления рассматривается адаптация (приспособление), однако она не является основной и служит только для реализации вышеперечисленных целей в условиях нестационарности системы. Поэтому следует четко сформулировать цель управления как в общем виде, так и в виде требуемых показателей качества. Затем сформулировать те задачи, которые следует решить при проектировании для достижения этой цели.

Цель управления может быть количественно оценена математическим выражением, называемым критерием качества. Таким выражением может быть функционал, функция или число.

В простейшем случае критериями качества могут быть показатели качества процесса регулирования, которые подразделяются на показатели качества в статическом и динамическом режимах работы САР. Наиболее распространенными показателями качества в статическом режиме: диапазон регулирования  $D$ , статизм  $s$ , в динамическом режиме: время регулирования  $t_{рег}$ , перерегулирование  $\sigma$  % и динамическая ошибка.

Для получения показателей качества САР или ее отдельных элементов обычно используют типовые входные воздействия: ступенчатые, линейно-возрастающие, гармонические или импульсные.

#### ***5.4 Переменные и параметры САР***

Изменяющиеся во времени состояние и свойства системы характеризуются переменными и параметрами. Под переменными понимают величины, характеризующие состояние системы (например, ток, скорость, температуру, магнитный поток и т. п.), а под параметрами – величины, отражающие количественные свойства элементов системы (индуктивности, активные сопротивления, массы, теплоемкости и т. п.). При этом параметры могут быть как реальными (приведенные выше примеры), так и параметрами математических моделей систем и их элементов (например, постоянные времени, коэффициенты передачи, коэффициенты дифференциальных уравнений и т. п.). Так как алгоритм управления не что иное, как математическая модель работы устройства управления, то можно говорить о параметрах алгоритма управления.

Целенаправленное изменение части из переменных объекта управления по некоторой закономерности приводит (или должно привести) к достижению цели управления, поэтому такие переменные называются управляемыми переменными.

#### ***5.5 Функциональный анализ САР***

Автоматические системы применяются для управления самыми различными физическими процессами во всех областях техники, могут использоваться весьма разнообразные по конструкции механические, гидравлические, электрические и другие устройства. При изображении систем управления применяются два принципа – функциональный и структурный.

Функциональной схемой называется такая схема, в которой каждому функциональному элементу системы соответствует определенное звено. Назначение отдельных звеньев автоматической системы наиболее полно отображается ее функциональной схемой. Названия элементов и блоков указывают на выполняемые функции, например: чувствительный элемент, преобразующий элемент, датчик, управляющий блок, исполнительный блок, электродвигатель и т. д.

Для составления функциональной схемы следует произвести функциональный анализ проектируемой системы. Для этого вся система разбивается на отдельные функциональные блоки, для которых определяются входные и выходные переменные. Функциональные блоки представляют собой конструктивно обособленные части, элементы или устройства, которые участвуют в управлении, выполняют определенные функции и обладают направленностью действия. Направленность действия означает, что изменение входной переменной приводит к изменению выходной, а обратного влияния нет. Это позволяет связи между элементами изображать в виде направленных стрелок. Сами элементы на функциональных схемах изображаются в виде прямоугольников.

При расчетах систему автоматического управления целесообразно представить в виде структурной схемы, абстрагируясь от конструктивных особенностей ее составных элементов.

Структурной схемой называется такая схема, в которой каждой математической операции преобразования сигнала соответствует определенное звено. В зависимости от полноты математического описания и от математических операций, выполняемых различными звеньями, для объектов могут быть составлены различные структурные схемы.

Части структурной схемы называют звеньями, каждое из которых отображает алгоритм преобразования сигнала – математическую или логическую операцию.

На структурных схемах звенья изображают прямоугольниками, внутри которых записывают соответствующие операторы преобразования сигналов. Прямоугольники соединяют линиями, отображающими информационные сигналы взаимодействия звеньев, с указанием направлений этих сигналов.

Пример функциональной схемы САР одной величины показан на рисунке 5.2.

Требуемое значение управляемой величины системы  $Y_{mp}$  определяется задающим воздействием  $G$ , поступающим от ЗУ. В частном случае может быть  $G = Y_{mp}$ . Алгоритм управления формируется в зависимости от отклонения управляемой величины  $Y$  относительно заданного ее значения  $Y_{mp}$ . Управляющее воздействие формируется только при условии  $\Delta Y = Y_{mp} - Y$ , т. е. при возникновении отклонения  $\Delta Y$ . В этом случае  $U = \varphi[Y_{mp} - Y]$ .

Отклонение управляемой величины  $Y$  от требуемого значения может быть вызвано как влиянием различного рода возмущающих воздействий (на рисунке 5.2 показано одно воздействие  $F$ ), так и изменением задающего воздействия  $G$ . Чтобы уменьшить или устранить это отклонение, нужно, как отмечалось,



выработать соответствующее управляющее воздействие и подать его на вход объекта управления ОУ. Управляющее воздействие при использовании принципа управления по отклонению вырабатывается на основе преобразования отклонения  $X$  управляемой величины от требуемого значения.

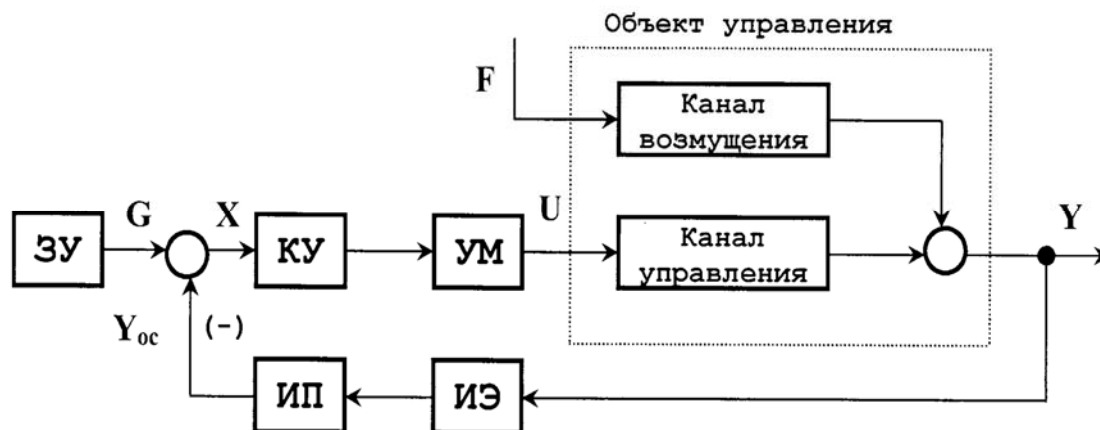


Рисунок 5.2 – Функциональная схема системы автоматического регулирования

Автоматические системы выполняются, как правило, с обратной связью и содержат в соответствии с рисунком 5.2 следующие функционально необходимые элементы:

- задающее устройство;
- элемент сравнения (сумматор);
- измерительный элемент;
- измерительный преобразователь;
- корректирующее устройство;
- усилитель мощности;
- исполнительное устройство (объект управления).

Задающее устройство задает алгоритм функционирования объекта управления. Оно предназначено для формирования задающего воздействия и преобразования его в однозначно соответствующую величину, удобную для сравнения с  $Y_{oc}(t)$ . В качестве носителя программы или заданной функциональной зависимости в ЗУ используются кулачковые механизмы, функциональные потенциометры, перфокарты, магнитные пленки и кинопленки. Часто ЗУ конструктивно объединяется в одно целое с измерительным и сравнивающим устройствами. ЗУ не имеет входа, а имеет только выход.

В системах стабилизации задающим воздействием является постоянная величина  $G$ , которая используется как эталонная для сравнения с ней значения управляемой величины. В системах программного управления ЗУ формирует программу, а в следящих системах – некоторую наперед неизвестную функцию  $g(t)$ .

Элемент сравнения (ЭС) в наиболее распространенном случае сравнивает задающее воздействие  $G$  с измеренным значением управляемой величины  $Y_{oc}$  и определяет отклонение  $X$  (сигнал рассогласования) между ними:  $X = G - Y_{oc}$ .

(см. рисунок 5.2). Разность между задающим воздействием и сигналом главной обратной связи называется сигналом ошибки:  $X = G - Y_{oc}$ .

В отличие от других элементов, имеющих один вход и один выход, элемент сравнения содержит два входа, на которые поступают входные сигналы  $G$  и  $Y_{oc}$  и один выход  $X$ . Вычитаемый сигнал обозначают знаком  $(-)$ . Выходной сигнал ЭС представляет собой разность  $(G - Y_{oc})$ . Следовательно,  $g(t)$  и  $y_{oc}(t)$  должны быть одинаковой физической природы. ЭС используется в системах управления по отклонению для определения отклонения управляемой величины от заданного значения. На рисунке 5.2 элемент сравнения изображается кругом.

Измерительный элемент (ИЭ) подключается к выходу объекта управления ОУ и измеряет управляемую величину  $Y$ . Затем ИЭ преобразует результат измерения в другую величину  $y_{oc}(t)$ , удобную для дальнейшего использования в управляющем устройстве (чаще всего в электрическую величину: ток или напряжение). Измеренное значение выходной величины  $Y_{oc}$  подается на элемент сравнения. Измерительный элемент обеспечивает получение информации о фактическом значении управляемой величины объекта и вместе с измерительным преобразователем (ИП) предназначен для преобразования физической величины  $Y$ , поступающей на его вход, в величину  $Y_{oc}$  другой физической природы. Например, измерительный элемент центробежного регулятора двигателя измеряет угловую скорость коленчатого вала. Но чтобы использовать результат измерения, угловую скорость необходимо преобразовать в усилие на муфте регулятора. Чувствительным элементом центробежного регулятора являются грузы, они же одновременно выполняют и функцию преобразования измеряемой величины. Таким образом, конструктивное исполнение элементов устройства автоматической системы не адекватно представлению его в виде функциональных элементов. Если использовать для измерения угловой скорости тахогенератор, то измеряемая величина будет преобразована в величину другой физической природы – электрическое напряжение.

Совокупность измерительного элемента и измерительного преобразователя иногда называют датчиком.

Измерительный элемент, который фиксирует значение управляемой величины на выходе объекта и подает ее на элемент сравнения (вход системы), образует главную обратную связь системы. Сигнал  $Y_{oc}$ , поступающий с выхода главной обратной связи на вход (элемент сравнения) системы, называется сигналом главной обратной связи.

Корректирующее устройство (КУ) предназначено для улучшения динамических свойств автоматической системы в процессе ее функционирования. Оно преобразует сигнал ошибки  $x(t)$  в управляющее воздействие  $u(t)$  согласно принятому алгоритму управления с учетом характеристик объекта и элементов системы, поэтому фактически является регулятором. В простейшем случае управляющее воздействие может быть величиной, пропорциональной отклонению. В общем случае алгоритм управления является более сложной функцией, предусматривающей введение в управляющее как производных, так и интегралов от отклонения. В зависимости от степени сложности необходимого преобразования сигнала рассогласования корректирующее устройство может

быть либо электрической цепью, либо сравнительно сложным электронным вычислительным устройством. В качестве КУ используют аналоговые усилители, логические элементы, микропроцессоры.

Усилитель мощности (УМ) (усилительный элемент) осуществляет форсировку сигнала, поступающего на его вход, не изменяя его физической природы до значения, достаточного для поддержания требуемого режима работы объекта управления. Выходной сигнал при этом получается большей мощности, чем входной. Для увеличения мощности усилительный элемент снабжается источником энергии. УМ позволяет усилить управляющие сигналы, поступающие на исполнительные элементы, обеспечивая необходимую мощность для приведения их в действие. УМ могут также использоваться в измерительных преобразователях. В САУ чаще всего используются полупроводниковые, электронные, магнитные, тиристорные, пневматические и релейные усилители.

Объект управления, в котором происходит процесс, подлежащий управлению, иногда называют исполнитель автоматической системы.

Измерительный элемент (ИЭ), элемент сравнения (ЭС), корректирующее устройство (КУ) и усилитель (УМ) образуют автоматическое управляющее устройство (АУУ).

Как следует из изложенного выше, АУУ, измеряя отклонение  $x(t)$  соответствующим образом, преобразуя его, вырабатывает управляющее воздействие  $U$ . Последнее, будучи приложено к управляемому объекту, изменяет управляемую величину таким образом, чтобы уменьшить отклонение  $X$ .

Алгоритмом управления САР с принципом управления по отклонению является соотношение, в соответствии с которым отклонение преобразуется в управляющее воздействие:  $U = \varphi[Y_{mp} - Y]$ .

Как видно, в отличие от САР с принципом управления по возмущению, здесь управляющее воздействие является функцией не возмущающего или задающего воздействия, а отклонения ДУ управляемой величины, вызванного этими воздействиями.

## 5.6 Составление структурной схемы

При исследовании и расчете систем автоматического управления исходят из математического описания физических процессов, происходящих в них.

Структурные схемы показывают взаимосвязь составных частей САР и характеризуют их динамические свойства, т. е. являются графическим изображением математического описания элементов системы в динамике.

При составлении структурных схем отвлекаются от конкретной физической природы регулируемых величин и используемой аппаратуры, а на схеме изображают лишь математическую модель процесса. Как и на функциональных схемах, элементы здесь изображаются в виде прямоугольников (звеньев), причем какое-либо устройство может быть представлено несколькими звеньями и наоборот, несколько устройств могут составлять одно звено.

Разделение САР по звеньям производится в соответствии с функциональной схемой в зависимости от вида дифференциального уравнения, связывающего

выходную величину с входной каждого звена.

Для каждого звена (прямоугольника) записывается передаточная функция, как отношение изображений выходной величины звена к входной, а связь между звеньями изображается в виде стрелок, указывающих направление и точки приложения воздействий.

### 5.7 Определение устойчивости САР

Для того чтобы САР могла нормально функционировать, она должна, прежде всего удовлетворять требованиям устойчивости. Система является устойчивой, если она возвращается к установившемуся состоянию после прекращения изменения задающего или возмущающего воздействий. Для оценки устойчивости системы наиболее широко применяются из аналитических методов – метод Ляпунова и критерий устойчивости Гурвица, из частотных – критерий Михайлова, критерий Найквиста и критерий устойчивости, использующий логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ).

Для оценки устойчивости по Ляпунову необходимо для характеристического полинома замкнутой системы определить корни. Для устойчивой системы корни должны иметь отрицательные вещественные части.

### 5.8 Исследование установившегося режима САР

По структурной схеме можно исследовать поведение системы в установившемся режиме. Установившийся режим системы характеризуется статическими характеристиками и ошибками как от задающего, так и возмущающего воздействий.

Используя структурные преобразования, любую систему можно привести к виду, представленному на рисунке 5.3.

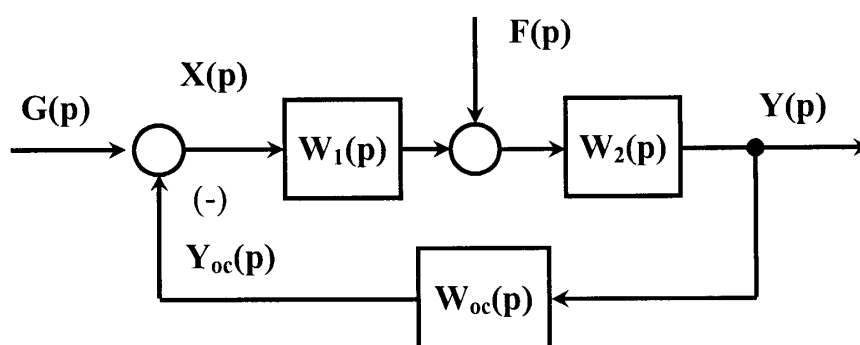


Рисунок 5.3 – SISO-система

Статические характеристики и ошибки можно определить по передаточным функциям САР, если в них оператор Лапласа приравнять к нулю.

### 5.9 Исследования САР в переходных режимах

Исследования динамических свойств САР выполняются путем ее моделирования на ЭВМ. Для этого необходимо по структурной схеме САР составить структурно-алгоритмическую модель. Уравнения модели решаются на ЭВМ с помощью программы MATLAB. При этом определяют реакцию каждого контура регулирования на скачок задающей величины и полученные показатели переходного процесса сравнивают с табличными.

Довольно часто возникает необходимость при исследовании динамических свойств САУ смоделировать нелинейность типа насыщения. Так, при моделировании пропорционального регулятора, реализованного на операционном усилителе, ограничивается значение его выходного напряжения.

При моделировании ПИД-регулятора имеются свои особенности. Здесь необходимо предусмотреть приостановку процесса интегрирования в момент насыщения регулятора. Один из способов программной реализации ПИ-регулятора – подача на вход интегральной части регулятора нулевого сигнала в момент, когда модуль напряжения на выходе регулятора превысил значение  $U_{\max}$ . Напряжение с выхода пропорциональной части регулятора при этом ограничивается нелинейностью типа насыщения.

### Список литературы

1 **Ким, Д. П.** Теория автоматического управления. Линейные системы: учебник и практикум для академического бакалавриата / Д. П. Ким. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2018. – 309 с.

2 **Юревич, Е. И.** Теория автоматического управления / Е. И. Юревич. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2007. – 560 с.

3 **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Санкт-Петербург: Профессия, 2004. – 752 с.

4 Теория автоматического управления: учебник для вузов / Под ред. А. В. Нетушила. – 2-е изд. – Москва: Высшая школа, 1976. – 400 с.

5 **Топчеев, Ю. И.** Атлас для проектирования систем автоматического регулирования / Ю. И. Топчеев. – Москва: Машиностроение, 1989. – 752 с.

6 **Певзнер, Л. Д.** Практикум по теории автоматического управления / Л. Д. Певзнер. – Москва: Высшая школа, 2006. – 590 с.

7 Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления / Под ред. В. А. Бесекерского. – Москва: Наука, 1978. – 512 с.

8 **Васильев, Д. В.** Системы автоматического управления. Примеры расчета / Д. В. Васильев, В. Г. Чуич. – Москва: Высшая школа, 1967. – 419 с.