

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра электроэнергетики и электромеханики

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 13.03.02*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019

УДК 681.5.011.622 (073)

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ: Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *О.М. Большунова, А.М. Камышьян*. СПб, 2019. 22 с.

Методические указания содержат описание практических занятий по дисциплине «Теория автоматического управления».

Основной целью практических занятий является закрепление теоретических знаний, полученных студентами при изучении лекционного материала, и получение практических навыков.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиля подготовки «Электропривод и автоматика».

Научный редактор проф. *В.А. Шпенст*

Рецензент канд. техн. наук *А.П. Шевчук* (ООО «ПО «Энергосистема»)

ВВЕДЕНИЕ

Цель изучения дисциплины «Теория автоматического управления» – формирование у студентов базовых знаний в области общих принципов построения и функционирования, основных методов анализа и синтеза систем автоматического управления.

Основными задачами дисциплины являются:

- изучение основных принципов построения систем автоматического управления; общих закономерностей функционирования, присущих системам автоматического управления различной физической природы; информационных процессов, протекающих в системах автоматического управления, основных методов анализа и синтеза систем автоматического управления;
- овладение методами идентификации объектов автоматического управления, методами анализа и расчета систем автоматического управления;
- формирование:
- представлений об адаптивных и интеллектуальных системах автоматического управления;
- навыков практического применения методов синтеза систем автоматического управления, удовлетворяющих требованиям к качественным показателям, в том числе с использованием интеллектуальных технологий;
- мотивации к самостоятельному повышению уровня профессиональных навыков в области автоматического управления техническими системами.

Знания, полученные по освоению дисциплины, необходимы при изучении дисциплин «Системы управления электроприводов», «Математические модели и расчет систем управления технологических комплексов», «Управление техническими системами», «Проектирование систем автоматики», «Эксплуатация систем автоматики», «Энергосбережение и энергоэффективность средствами управления технических объектов» и выполнении бакалаврской выпускной квалификационной работы.

Практические занятия необходимы для облегчения усвоения теоретического материала и обучения практическим исследованиям в области расчета, анализа и синтеза систем автоматического управления.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 1. ЛИНЕАРИЗАЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель занятия: сформировать практические навыки линеаризации статических характеристик элементов системы автоматического регулирования с применением метода касательной и метода секущей.

Краткие теоретические сведения

Установившееся состояние элемента системы автоматического регулирования может быть выражено уравнением статики

$$x_{\text{вых}} = \varphi(x_{\text{вх}}).$$

Графическое изображение этого уравнения – статическая характеристика элемента системы автоматического регулирования.

Уравнение статики отдельных элементов и всей системы в целом обычно представляют собой алгебраические уравнения, т.к. производные от действующих в элементах и всей системе величин по времени в установившемся состоянии равны нулю. Практически приходится иметь дело с системами, состоящими из нелинейных элементов, уравнения которых могут быть заданы графически или аналитически и носят нелинейный характер. Анализ такой системы сложен. Однако в процессе регулирования статическая характеристика используется только на очень небольшом участке.

По самому смыслу задачи автоматического регулирования отклонения регулируемой величины от требуемого значения должны быть малы, поэтому рассматривать систему можно только в окрестности равновесного (заданного) значения регулируемой величины и, следовательно, нелинейную статическую характеристику на

малом отрезке можно заменить прямой, например, касательной к ней в точке равновесия, т. е. осуществить линеаризацию характеристики. В результате уравнения системы приводятся к линейному виду:

$$x_{\text{ВЫХ}} = k \cdot x_{\text{ВХ}} + b ,$$

где k и b – постоянные коэффициенты.

Приняв точку заданного равновесия за начало координат, можно нужный участок статической характеристики рассматривать в виде прямой, уравнение которой имеет вид:

$$\Delta x_{\text{ВЫХ}} = k \Delta x_{\text{ВХ}} ,$$

т.е. рассматривать уравнение относительно отклонений основных координат, в такой форме удобнее пользоваться уравнением, т.к. исчезает свободный член.

При известном уравнении статики передаточный коэффициент k находят как значение производной в рабочей точке.

Линеаризация по методу секущей осуществляется на графике проведением прямой линии таким образом, чтобы в некотором заданном диапазоне изменения $x_{\text{ВЫХ}}$ спрямленная характеристика была как можно ближе к исходной характеристике. При такой линеаризации чаще всего используется метод наименьших квадратов.

Линеаризация по методу касательной дает хорошее совпадение вблизи рабочей точки, а аппроксимирующая прямая, полученная по методу секущей, имеет меньшее среднее расхождение с исходной характеристикой.

Индивидуальное задание

Выдается для достижения цели занятия, т.е. формирования у студента практических навыков линеаризации статических характеристик элементов системы автоматического регулирования с применением метода касательной и метода секущей.

Исходные данные: нелинейная статическая характеристика элемента системы автоматического регулирования (график и формула) с указанием рабочей точки.

Необходимо осуществить:

1. Линеаризацию вблизи рабочей точки исходной нелинейной статической характеристики элемента системы автоматического регулирования с применением метода касательной (графически и аналитически).

2. Линеаризацию исходной нелинейной статической характеристики элемента системы автоматического регулирования с применением метода секущей.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 2. РАСЧЕТ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Цель занятия: сформировать практические навыки расчета передаточных и переходных функций элементов системы автоматического управления.

Краткие теоретические сведения

Наибольший интерес при анализе системы автоматического управления представляют динамические характеристики элементов, раскрывающие закон преобразования сигнала в этих элементах. Другими словами, необходимо установить, как реагирует выходная величина элемента на произвольный входной сигнал. Такого рода информация для линейных элементов содержится в их дифференциальных уравнениях.

В теории автоматического управления наряду с классическим способом математического описания в форме интегро-дифференциальных уравнений широкое применение получили способы математического описания, основанные на введении понятий передаточных и переходных функций.

Передаточной функцией $W(p)$ называют отношение изображения по Лапласу выходной величины к изображению по Лапласу входной величины при нулевых начальных условиях. Передаточная функция $W(p)$ может быть получена путем применения к дифференциальному уравнению элемента системы прямого преобразования Лапласа.

Передаточные функции $W(p)$ являются функциями комплексного аргумента p и не допускают наглядного изображения в виде кривых на графиках, а поэтому не могут быть непосредственно использованы для графоаналитических инженерных расчетов. Для проведения последних используются переходные характеристики.

Переходной характеристикой (временной характеристикой) элемента или системы называют закон изменения во времени выходной величины при подаче на вход единичного ступенчатого сигнала:

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ 1 & \text{при } t \geq 0 \end{cases}.$$

Изображение функции единичного скачка по Лапласу:

$$L[1(t)] = \frac{1}{p}.$$

По определению передаточной функции:

$$X_{\text{вых}}(p) = W(p)X_{\text{вх}}(p) = W(p)\frac{1}{p}.$$

Отсюда выражение для переходной функции:

$$X_{\text{вых}}(t) = h(t) = L^{-1}\left[W(p)\frac{1}{p}\right].$$

Последнее выражение определяет переходную функцию $h(t)$ и устанавливает однозначную связь между $h(t)$ и $W(p)$.

Индивидуальное задание

Выдается для достижения цели занятия, т.е. формирования у студента практических навыков расчета передаточных и переходных функций элементов системы автоматического управления.

Исходные данные: дифференциальное уравнение линейного элемента системы автоматического управления.

Необходимо осуществить:

1. Расчет передаточной функции элемента системы автоматического управления.
2. Расчет переходной функции элемента системы автоматического управления.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3. РАСЧЕТ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО СТРУКТУРНОЙ СХЕМЕ

Цель занятия: сформировать практические навыки расчета передаточной функции системы автоматического управления (САУ) по структурной алгоритмической схеме.

Краткие теоретические сведения

Графическое изображение математической модели системы автоматического управления с указанием звеньев и видов связей между ними называется структурной алгоритмической схемой системы. Звено на структурной схеме условно обозначают в виде прямоугольника с указанием входа и выхода, внутри которого записывается передаточная функция. Звенья могут быть пронумерованы.

Структурную схему широко используют на практике при исследовании и проектировании систем, т.к. она даёт наглядное представление о связях между звеньями, о прохождении и преобразовании сигналов в системе.

Методика расчета передаточной функции системы автоматического управления по структурной алгоритмической схеме заключается в следующем:

1. Изучая работу отдельных узлов и всей системы в целом, САУ, разбивают на типовые звенья.
2. Звенья соединяют между собой таким образом, чтобы воздействия через них проходили так же, как они проходят в реальной системе.
3. Зная передаточные функции звеньев и вид связи между ними, используя правило преобразования структур, получают передаточную функцию замкнутой САУ.

Правила преобразования структур:

1. Последовательным соединением звеньев называется такое, при котором выходная величина предшествующего звена является входной для последующего.

Передаточная функция последовательного соединения звеньев равна произведению передаточных функций отдельных звеньев:

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p). \quad (3.1)$$

2. Параллельным соединением звеньев называется такое, при котором одна и та же величина является входной для всех звеньев, а выходные величины суммируются.

Передаточная функция системы параллельно соединённых звеньев равна сумме передаточных функций отдельных звеньев:

$$W(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p). \quad (3.2)$$

В САУ для улучшения качества процесса регулирования в регулятор вводят дополнительные обратные связи (ОС), создающие внутри него дополнительные замкнутые контуры. Дополнительной обратной связью называется устройство, передающее сигнал с выхода последующего звена на вход одного из предыдущих. По методу присоединения различают положительные (ПОС) и отрицательные (ООС) обратные связи.

3. Встречнопараллельное соединение или соединение звеньев с ОС.

Передаточная функция встречнопараллельного соединения звеньев имеет вид

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}}{x_{\text{вх}}} = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p)W_{\text{ос}}(p)}, \quad (3.3)$$

где $W_1(p)$ – передаточная функция звена, охваченного ОС; $W_{\text{ос}}(p)$ – передаточная функция звена в цепи ОС.

Индивидуальное задание

Выдается для достижения цели занятия, т.е. формирования у студента практических навыков расчета передаточной функции системы автоматического управления по структурной алгоритмической схеме.

Исходные данные: структурная алгоритмическая схема САУ с указанием передаточных функций звеньев.

Необходимо осуществить:

1. Анализ структурной алгоритмической схемы САУ.
2. Расчет передаточной функции САУ при условии, что на систему действует несколько входных сигналов.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 4. РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Цель занятия: сформировать практические навыки использования алгебраических критериев устойчивости системы автоматического управления.

Краткие теоретические сведения

Критерий устойчивости Рауса

Пусть характеристическое уравнение замкнутой системы автоматического управления имеет вид

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n = 0.$$

Для выяснения устойчивости заданной системы согласно критерию Рауса необходимо составить следующую таблицу:

	$c = a_0$	$c_{21} = a_2$	$c_{31} = a_4$	$c_{41} = a_6$
	$c_{12} = a_1$	$c_{22} = a_3$	$c_{32} = a_5$	$c_{42} = a_7$
$\lambda_3 = \frac{a_0}{a_1}$	$c_{13} = a_2 - \lambda_3 a_3$	$c_{23} = a_4 - \lambda_3 a_5$	$c_{33} = a_6 - \lambda_3 a_7$	$c_{43} = a_8 - \lambda_3 a_9$
$\lambda_4 = \frac{a_1}{c_{13}}$	$c_{14} = a_3 - \lambda_4 c_{23}$	$c_{24} = a_5 - \lambda_4 c_{33}$	$c_{34} = a_7 - \lambda_4 c_{43}$	$c_{44} = a_9 - \lambda_4 c_{53}$
$\lambda_5 = \frac{c_{13}}{c_{14}}$	$c_{15} = c_{23} - \lambda_5 c_{24}$	$c_{25} = c_{33} - \lambda_5 c_{34}$	$c_{35} = c_{43} - \lambda_5 c_{44}$	$c_{45} = c_{53} - \lambda_5 c_{54}$

Любой из коэффициентов таблицы c_{ki} ($i \geq 3$), где k – номер столбца; i – номер строки, находятся по формуле:

$$c_{ki} = c_{k+1;i-2} - \lambda_i c_{k+1;i-1},$$

где $\lambda_i = \frac{c_{1;i-2}}{c_{1;i-2}}$ для $i \geq 3$.

Число строк таблицы Рауса равно $n+1$, где n – степень характеристического уравнения системы.

Для устойчивости линейной системы необходимо и достаточно, чтобы все коэффициенты первого столбца таблицы Рауса были положительны:

$$a_0 > 0; a_1 > 0; c_{13} > 0; \dots, c_{1;n+1} > 0.$$

Если не все коэффициенты первого столбца таблицы положительны, т.е. система неустойчива, то число корней уравнения, лежащих в правой полуплоскости, равно числу перемен знаков в первом столбце таблицы.

Критерий устойчивости Гурвица

Пусть характеристическое уравнение замкнутой АСР имеет вид

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n = 0.$$

Для устойчивости замкнутой АСР необходимо и достаточно, чтобы все определители Гурвица были больше нуля.

Названные определители берутся как диагональные миноры квадратной матрицы, составленной из коэффициентов характеристического уравнения замкнутой системы по следующему правилу.

В первой строке матрицы записываются все нечетные коэффициенты, начиная с a_1 , и далее строка дописывается нулями до полного числа членов, равного n . Во второй строке записываются все четные коэффициенты, начиная с a_0 . Третья и четвертые строки – это первые две, сдвинутые на один элемент вправо, пятая и шестая строки – это те же две строки, сдвинутые еще на один элемент вправо и т.д. до полного числа строк, равного n . Пустые места заполняются нулями.

В результате матрица имеет вид:

$$\begin{array}{ccccccc}
 a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & a_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 - & - & - & - & - & - & - \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & a_{n-1} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-4} & a_{n-2} & a_n
 \end{array}$$

Определители Гурвица k -того порядка Δ_k составляются отчеркиванием в матрице k строк и k столбцов.

Условия устойчивости: $\Delta_1 > 0$, $\Delta_2 > 0$, $\Delta_n = a_n \Delta_{n-1} > 0$.

Уравнение границы устойчивости:

$$a_n \Delta_{n-1} = 0.$$

Индивидуальное задание

Выдается для достижения цели занятия, т.е. формирования у студента практических навыков использования алгебраических критериев устойчивости системы автоматического управления.

Исходные данные: структурная алгоритмическая схема системы автоматического управления с указанием передаточных функций звеньев.

Необходимо осуществить:

1. Анализ структурной алгоритмической схемы системы автоматического управления.

2. Расчет передаточной функции системы автоматического управления.

3. Оценка устойчивости системы автоматического управления с использованием алгебраических критериев.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 5.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И РАСЧЕТ НАСТРОЕЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТИПОВОГО РЕГУЛЯТОРА

Цель занятия: сформировать практические навыки идентификации объекта управления по экспериментальной переходной характеристике и расчета оптимальных значений настроечных параметров типовых регуляторов.

Краткие теоретические сведения

Простейшим входным сигналом, используемым при активной идентификации, является ступенчатый сигнал. Идентификация с помощью переходной характеристики проводится вне процесса управления, применима только к стационарным процессам. Однако, поскольку ступенчатые возмущения воздействуют на систему при включении, то переходные характеристики можно записать, не нарушая нормального режима работы.

Промышленные объекты управления (ОУ) представляют собой сложные агрегаты со многими входными и выходными величинами, характеризующими технологический процесс. Зависимости выходных величин от входных, как правило, нелинейные, и изменение одной из них приводит к изменению других. Таким образом, создается сложная система взаимозависимостей, которую трудно, а подчас и невозможно строго математически описать.

Задачу можно существенно упростить, если считать зависимости выходных величин от входных линейными или линеаризуемыми в окрестностях малых отклонений от рабочих режимов объекта. Поскольку при устойчивой работе системы автоматического регулирования (САР) отклонения параметров в системе малы, такая линеаризация почти всегда оказывается допустимой. Кроме того, сложные объекты часто можно разбить на отдельные каналы, взаимным влиянием отдельных каналов друг на друга можно пренебречь и рассматривать их как самостоятельные.

Характеристики объекта, необходимые для синтеза структуры и параметров САР, могут быть найдены из математического описания объекта, получаемого аналитически, или определены экспе-

риментально. Ввиду недостаточной изученности объектов и необходимости при их математическом описании принимать целый ряд существенных упрощений, динамические и статические характеристики объектов, полученные экспериментально, часто оказываются предпочтительнее.

Переходные характеристики большинства реальных объектов относительно регулирующего воздействия обычно представляют собой функции времени двух видов (рис. 5.1,а,б).

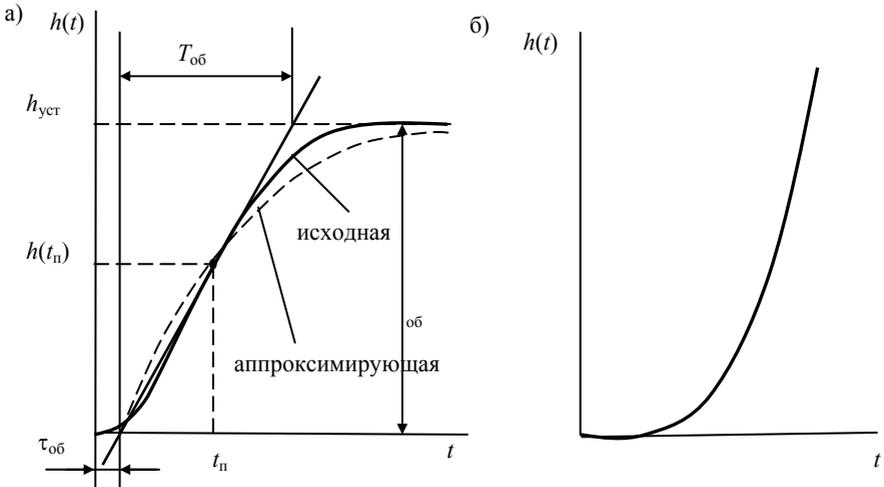


Рис. 5.1. Переходные характеристики типовых промышленных объектов управления: а) для объектов с самовыравниванием; б) для объектов без самовыравнивания

В первом случае (рис. 5.1,а) отклонение регулируемой величины с течением времени стремится к некоторому установившемуся значению. Такого вида характеристики имеют объекты с самовыравниванием (статические объекты). Во втором случае (рис. 5.1,б) представлен объект без самовыравнивания (астатический объект). В начальной части переходной характеристики промышленных объектов часто наблюдается чистое (или транспортное) запаздывание.

Указанные особенности характеристик промышленных объектов позволяют аппроксимировать их дробно-рациональными пе-

редаточными функциями с введением звена запаздывания. Для объектов с самовывравниванием:

$$W(p) = \frac{k_{об} e^{-p\tau_{об}}}{\prod_{i=1}^n (1 + pT_{об i})}, \quad (5.1)$$

для объектов без самовывравнивания:

$$W(p) = \frac{k_{об} e^{-p\tau_{об}}}{p \prod_{i=1}^n (1 + pT_{об i})}, \quad (5.2)$$

где $k_{об}$ – статический коэффициент передачи объекта; $T_{об}$ - постоянная времени объекта; $\tau_{об}$ - запаздывание объекта.

Для определения численных значений коэффициентов аппроксимирующих функций необходимо задаться некоторым критерием приближения.

Для первоначальных расчетов часто используется критерий приближения, основанный на совпадении исходной и аппроксимирующей переходных характеристик (рис. 5.1, а) и их первых производных по времени при $t=0$, в точке перегиба аппроксимируемой (исходной) характеристики, а также при $t \rightarrow \infty$.

В качестве примера осуществим идентификацию объекта с самовывравниванием по экспериментальной переходной характеристике простейшим способом.

Простейшим частным случаем оператора (5.1), имеющим в инженерной практике наибольшее применение, является передаточная функция вида:

$$W(p) = \frac{k_{об} e^{-p\tau_{об}}}{1 + pT_{об}}. \quad (5.3)$$

Соответствующая переходная функция определяется формулой:

$$h(t) = k_{об} \left(1 - e^{-\frac{t - \tau_{об}}{T_{об}}} \right) \quad \text{при } t \geq \tau_{об}. \quad (5.4)$$

Для определения параметров передаточной функции (5.3) к графику исходной переходной характеристики в точке перегиба проводится касательная (рис. 5.1, а). $T_{об}$ определяется как интервал времени, заключенный между точками пересечения касательной с осью абсцисс и линией установившегося значения переходной характеристики; $\tau_{об}$ определяется как интервал времени, заключенный между точкой пересечения касательной с осью абсцисс и осью ординат; $k_{об}$ принимается равным установившемуся значению.

Представленный упрощенный подход к определению параметров передаточной функции (5.3) дает достаточно высокие погрешности аппроксимации. Для уточнения значений постоянной времени и запаздывания можно воспользоваться следующими уточняющими формулами:

$$T_{обу} = (1-b)T_{об}, \quad (5.5)$$

$$\tau_{обу} = t_{п} - (1-b)T_{об} \ln \frac{1}{1-b}, \quad (5.6)$$

где $b = h(t_{п})/h_{уст}$, $h(t_{п})$ – координата точки перегиба по оси ординат (рис. 5.1, а), $h_{уст}$ – установившееся значение сигнала (рис. 5.1, а).

Индивидуальное задание

Выдается для достижения цели занятия, т.е. сформировать практические навыки идентификации объекта управления по экспериментальной переходной характеристике и расчета оптимальных значений настроечных параметров типовых регуляторов.

Исходные данные: экспериментальные точки переходной характеристики объекта управления, тип регулятора, требования к качеству процесса управления.

Необходимо осуществить:

1. Идентификацию объекта управления по переходной характеристике.

2. Расчет оптимальных значений настроечных параметров регулятора по эмпирическим формулам согласно условиям, представленным в исходных данных.

3. Проверку работоспособности и качества работы рассчитанного регулятора.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 6. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ

Цель занятия: сформировать практические навыки расчета параметров алгоритма непосредственного цифрового управления.

Краткие теоретические сведения

Одним из ценнейших функциональных преимуществ непосредственного цифрового управления (НЦУ) является возможность точной реализации алгоритмов управления практически любой сложности. Однако в настоящее время большинство систем НЦУ являются цифровыми копиями традиционных аналоговых систем, поэтому практически все реальные системы НЦУ базируются на применении классических ПИ- и ПИД -алгоритмов управления.

В непрерывной форме ПИД – алгоритм:

$$u(t) = k_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_n} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right], \quad (6.1)$$

где $u(t)$ – управляющее воздействие; $\varepsilon(t)$ – отклонение регулируемой величины от задания; k_p - коэффициент усиления ПИД-регулятора; T_n - постоянная времени интегрирования; T_d - постоянная времени дифференцирования или время предварения. При условии $T_d = 0$ уравнение (6.1) определяет ПИ – алгоритм управления. В дискретной форме алгоритм (6.1) имеет вид:

$$u[nT_0] = k_n \varepsilon[nT_0] + k_n \sum_{i=1}^n \varepsilon[iT_0] + k_d (\varepsilon[nT_0] - \varepsilon[(n-1)T_0]), \quad (6.2)$$

где T_0 - интервал дискретности (период квантования по времени); $k_{\text{п}}$, $k_{\text{и}}$, $k_{\text{д}}$ - коэффициенты соответственно при пропорциональной, интегральной и дифференцированной составляющих алгоритма.

Коэффициенты являются параметрами настройки алгоритма и выражаются через параметры непрерывного алгоритма как

$$k_{\text{п}} = k_{\text{р}}; \quad k_{\text{и}} = \frac{k_{\text{р}}T_0}{T_{\text{и}}}; \quad k_{\text{д}} = \frac{k_{\text{р}}T_{\text{д}}}{T_0}.$$

Сопоставление (6.1) и (6.2) показывает, что операция интегрирования в (6.1) заменена в (6.2) операцией суммирования отклонений в дискретные моменты времени $T_0, 2T_0, \dots, nT_0$, операция дифференцирования – определением первой разности. В (6.2) цифровой ПИД – алгоритм представлен в форме позиционного алгоритма, для которого характерно, что регулятор НЦУ в каждый момент времени nT_0 должен выполнять полный расчет выходной величины управляющего воздействия.

Для применения в режиме НЦУ ПИД – алгоритм должен быть представлен в форме, которая легко может быть запрограммирована. Для этого применяют несколько способов.

В одном из них предполагается, что входной сигнал $\varepsilon(t)$ измеряется только в дискретные моменты времени, разделенные интервалом времени T_0 , а управляющее воздействие остается постоянным в течение всего периода квантования T_0

$$u(t) = u[nT_0]; \\ nT_0 \leq t < (n+1)T_0.$$

При подстановке в (6.2) значений параметров алгоритма управляющее воздействие записывается в виде

$$u[n] = k_{\text{р}}\varepsilon[n] + \frac{k_{\text{р}}T_0}{T_{\text{и}}} \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon[i] + \varepsilon[n-1]}{2} + \frac{k_{\text{р}}T_{\text{д}}}{T_0} (\varepsilon[n] - \varepsilon[n-1]), \quad (6.3)$$

где при формировании интегральной составляющей для численного интегрирования использовано правило трапеций. Здесь и ниже для удобства записи принимаем:

$$u[nT_0] = u[n]; \quad \varepsilon[nT_0] = \varepsilon[n].$$

Для $n-1$ момента по аналогии имеем

$$u[n-1] = k_p \varepsilon[n-1] + \frac{k_p T_0}{T_n} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\varepsilon[i-1] + \varepsilon[i-2]}{2} + \frac{k_p T_d}{T_0} (\varepsilon[n-1] - \varepsilon[n-2]). \quad (6.4)$$

Если из обеих частей уравнения (6.3) вычесть (6.4) получим уравнение

$$u[n] - u[n-1] = k_p (\varepsilon[n] - \varepsilon[n-1]) + \frac{k_p T_0}{2T_n} (\varepsilon[n] + \varepsilon[n-1]) + \frac{k_p T_d}{T_0} (\varepsilon[n] - 2\varepsilon[n-1] + \varepsilon[n-2]),$$

которое можно преобразовать к виду

$$u[n] = u[n-1] + k_p \left(1 + \frac{T_0}{2T_n} + \frac{T_d}{T_0}\right) \varepsilon[n] + k_p \left(-1 + \frac{T_0}{2T_n} - \frac{2T_d}{T_0}\right) \varepsilon[n-1] + \frac{k_p T_d}{T_0} \varepsilon[n-2]. \quad (6.5)$$

После введения обозначений основное уравнение ПИД – алгоритма примет вид

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= k_p \left(1 + \frac{T_0}{2T_{\text{и}}} + \frac{T_{\text{д}}}{T_0} \right); \\ A_1 &= -k_p \left(1 - \frac{T_0}{2T_{\text{и}}} + \frac{2T_{\text{д}}}{T_0} \right); \\ A_2 &= k_p \frac{T_{\text{д}}}{T_0} \end{aligned} \right\} \quad (6.6)$$

$$u[n] = u[n-1] + A_0 \varepsilon[n] + A_1 \varepsilon[n-1] + A_2 \varepsilon[n-2], \quad (6.7)$$

где $\varepsilon[n] = g[n] - y[n]$; $\varepsilon[n-1] = g[n-1] - y[n-1]$; $\varepsilon[n-2] = g[n-2] - y[n-2]$.

С учетом, что $g[n] = g[n-1] = g[n-2]$ выражение (6.7) упрощается. Аналогично может быть построен любой другой цифровой алгоритм управления.

Индивидуальное задание

Выдается для достижения цели занятия, т.е. сформировать практические навыки расчета параметров алгоритма непосредственного цифрового управления.

Исходные данные: тип аналогового регулятора, значения его настроечных параметров.

Необходимо осуществить:

1. Построение цифрового алгоритма управления.
2. Расчет значений настроечных параметров построенного цифрового алгоритма управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Борисевич А.В.* Теория автоматического управления: элементарное введение с применением MATLAB [Электронный ресурс] - М.: Инфра-М, 2014. - 200 с.
2. *Гайдук А.Р.* Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А.Р.Гайдук, В.Е. Беляев, Т.А. Пьявченко. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 464 с.
3. *Глазырин Г.В.* Теория автоматического регулирования [Электронный ресурс] - Новосиб.:НГТУ, 2014. - 168 с.
4. *Стороженко С.В.* Теория автоматического управления. линейные системы [Электронный ресурс]: Лаб. практикум / С.В. Стороженко, О.М. Большунова. - СПб. : Горн. ун-т, 2012. - 55 с.
5. Теория автоматического управления. Синтез САУ горного производства с использованием ЭВМ [Электронный ресурс]: метод. разработка к курсовой работе для студентов всех форм обучения специальности 180400 / сост.: Р. М. Проскуряков, С. В. Стороженко, В. И. Маларев. - СПб. : Горн. ун-т, 2001. - 57 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Практическое занятие 1. Линеаризация Статических характеристик элементов системы автоматического регулирования	4
Практическое занятие 2. Расчет передаточных функций элементов системы автоматического регулирования.....	6
Практическое занятие 3. Расчет передаточной функций системы автоматического управления по структурной схеме	8
Практическое занятие 4. Расчет устойчивости системы автоматического управления.....	10
Практическое занятие 5. Идентификация объекта управления и расчет настроечных параметров типового регулятора.....	13
Практическое занятие 6. Расчет параметров Управляющих устройств цифровых систем.....	17
Библиографический список.....	21

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 13.03.02*

Сост.: *О.М. Большунова, А.М. Камышьян*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
электроэнергетики и электромеханики

Ответственный за выпуск *О.М. Большунова*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 20.02.2019. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,3. Усл.кр.-отт. 1,3. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 50 экз. Заказ 112. С 48.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2