

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

С.В. Шидловский

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Учебное пособие



Томск – 2003

УДК 621.311.22

Ш 564

Ш 564 **Шидловский С.В.** Теория автоматического управления: Учебное пособие. –Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 40 с.

Пособие содержит основные сведения по выполнению разделов курсовой работы и включает современные требования к разработке систем автоматического регулирования, методики и пример их расчета, необходимую справочную информацию.

Пособие подготовлено на кафедре информационно-измерительной техники ТУСУРа и предназначено для студентов специальности 210200.

Р е ц е н з е н т ы :

зав. каф. автоматизации теплоэнергетических процессов ТПУ, канд. техн. наук., доц. В.С. Андык;

зав. каф. информационно-измерительной техники ТУСУР, д.т.н., проф. А.А. Светлаков.

© С.В. Шидловский, 2003

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Автоматические регуляторы и их настройка.....	5
1.1. Общие сведения о промышленных системах регулирования	5
1.2. Выбор канала регулирования	7
1.3. Требования к промышленным системам регулирования.....	8
1.4. Возмущения в технологическом процессе	9
1.5. Основные показатели качества регулирования	10
1.6. Типовые процессы регулирования.....	13
2. Определение оптимальных параметров настройки автоматических регуляторов	16
2.1. Аналитический метод определения оптимальной настройки регуляторов с помощью расширенных амплитудно-фазовых характеристик.....	16
2.2. Метод ВТИ для приближенного определения оптимальной настройки регулятора	20
2.3. Метод максимума амплитудно-частотных характеристики (метод Ротача)	23
2.4. Метод незатухающих колебаний (Циглера–Никольса)	25
3. Пример расчета.....	27
Литература	35
Приложение 1. Задание.....	36
Приложение 2. Варианты заданий на курсовую работу.	37

ВВЕДЕНИЕ

Решение задач автоматизации технологических процессов требует от будущих специалистов умения и навыков разработки современных систем автоматического управления.

Настоящее учебное пособие предназначено для выполнения студентами курсовых работ по дисциплине «Теория автоматического управления». Пособие состоит из трех разделов.

В первом разделе приведены основные сведения, необходимые для понимания принципа работы промышленных автоматических систем регулирования и процессах протекающих в технологических объектах управления.

Во втором разделе рассматриваются некоторые широко используемые методы параметрического синтеза линейных систем регулирования.

Третий раздел пособия посвящен рассмотрению типового примера расчета, выполненного с помощью системы символьной математики MathCAD.

Задачей пособия является объединить необходимые сведения о принципах работы промышленных автоматических систем регулирования и основных методах их оптимальной настройки в одном издании для выполнения курсовых работ по дисциплине «Теория автоматического управления».

В пособии приведены необходимые справочные материалы, требования к пояснительной записке.

Учебное пособие может быть полезным студентам не только специальности 210200, но и другим, изучающим основы современной теории управления.

Выполнение курсовых работ предполагает широкое применение средств вычислительной техники.

Пособие может быть использовано в процессе дипломного проектирования студентами специальности 210200 и родственной ей при разработке вопросов автоматизации технологических процессов.

1. АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ И ИХ НАСТРОЙКА

1.1. Общие сведения о промышленных системах регулирования

В большом разнообразии промышленных производств значительное место занимают технологические процессы, в которых для их нормального протекания требуется поддерживать постоянным или изменяющимся по определенному закону различные физические величины. Технологические процессы характеризуются множеством регулируемых величин: температурой, давлением, расходом, концентрацией и т. д., которые называются параметрами процесса. Чтобы технологическое оборудование работало в требуемом режиме, т.е. с высоким КПД, с заданной производительностью, давало продукцию необходимого качества и работало надежно, необходимо поддерживать величины, характеризующие процесс, в большинстве случаев постоянными. Эта важнейшая задача возложена на промышленные системы автоматического регулирования и стабилизации технологических процессов.

Главная задача промышленных систем регулирования состоит в том, чтобы стабилизировать технологические параметры на заданном уровне. Этим занимаются системы автоматической стабилизации. В этих системах сигнал задания (уставка регулятора) остается постоянным в течение длительного времени работы. Другой, не менее важной задачей является задача программного управления технологическим агрегатом, что обеспечивает переход на новые режимы работы. Решение этой проблемы осуществляется с помощью той же системы автоматической стабилизации, задание которой изменяется от программного задатчика.

Качество выдаваемой продукции во многом зависит от качества работы контуров регулирования технологическим объектом, которых в современных технологических комплексах насчитываются сотни и тысячи. Поэтому для большинства промышленных автоматических систем регулирования (АСР) необходима достаточно высокая точность их работы

($\pm 1,5\%$). При этом главное назначение системы стабилизации - это компенсация внешних возмущающих воздействий, действующих на объект управления.

Структурная схема типовой одноконтурной АСР промышленным объектом управления приведена на рис. 1.

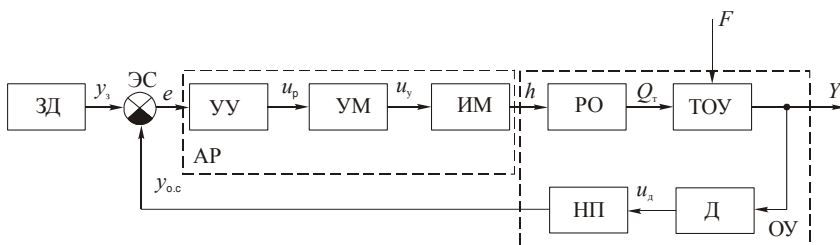


Рис. 1. Структурная схема АСР промышленным объектом управления: Основными элементами ее являются: УУ – устройство управления, УМ – усилитель мощности, ИМ – исполнительный механизм, РО – регулируемый орган, ТОУ – технологический объект управления, Д – датчик, НП – нормирующий преобразователь, ЗД – задатчик, ЭС – элемент сравнения. Здесь y_3 – задающий сигнал, e – ошибка регулирования, u_p – выходной сигнал регулятора, u_y – управляющее напряжение, h – перемещение регулирующего органа, Q_r – расход вещества или энергии, F – возмущающее воздействие, Y – регулируемый параметр (например, температура), $y_{0.c}$ – сигнал обратной связи (выходное напряжение или ток преобразователя).

Характерной особенностью схемы является наличие нормирующего преобразователя (НП), обеспечивающего работу автоматического регулятора (АР) со стандартными значениями тока (0–5 мА) или напряжения (0–10 В). НП выполняет следующие функции:

- 1) преобразует нестандартный входной сигнал (мВ) в стандартный выходной сигнал;
- 2) осуществляет фильтрацию входного сигнала;
- 3) осуществляет линеаризацию статической характеристики датчика с целью получения линейного диапазона;
- 4) применительно к термопаре осуществляет температурную компенсацию холодного спая термопары.

Для расчетных целей исходную схему упрощают до схемы, показанной на рис. 2.

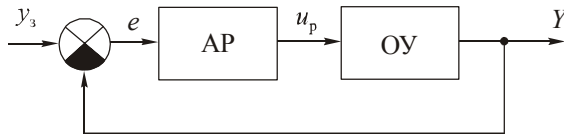


Рис. 2. Расчетная схема АСР промышленным объектом управления:

АР - автоматический регулятор, ОУ - объект управления

Здесь под объектом управления уже понимается неизменяемая часть системы, состоящая из преобразователей сигналов, регулирующего органа, технологического объекта управления и датчика.

1.2. Выбор канала регулирования

Немаловажным является выбор канала регулирования, так как одним и тем же выходным параметром объекта можно управлять по разным входным каналам. Например, температурой в печи - путем изменения расхода воздуха или газа в печь (рис. 3).



Рис. 3. Управление температурой печи по разным каналам

При выборе нужного канала управления исходят из следующих соображений:

1. Из всех возможных регулирующих воздействий выбирают такой поток вещества или энергии, подаваемый в объект или отводимый из него, минимальное изменение которого вызывает максимальное изменение регулируемой величины, т.е. коэффициент усиления по выбранному каналу должен быть по возможности максимальным. Тогда по данному каналу, можно обеспечить более точное регулирование.

2. Диапазон допустимого изменения управляющего сигнала должен быть достаточен для полной компенсации максимально возможных возмущений, возникающих в данном технологическом процессе, т.е. должен быть запас по мощности управления в данном канале.

3. Выбранный канал должен иметь благоприятные динамические свойства, т.е. запаздывание τ_0 и отношение τ_0/T_0 , где T_0 – постоянная времени объекта, должны быть возможно меньшими. Кроме того, изменение статических и динамических параметров объекта по выбранному каналу при изменении нагрузки или во времени должны быть незначительными.

4. Выбранный канал регулирования должен быть согласован с технологическим регламентом ведения процесса.

1.3. Требования к промышленным системам регулирования

Современные промышленные АСР должны удовлетворять следующим условиям:

1. Обеспечивать устойчивое управление процессом во всем диапазоне нагрузок на технологический агрегат.

2. Система должна обеспечивать в окрестности рабочей точки заданное качество процессов управления (время переходного процесса, перерегулирование и колебательность).

3. Система должна обеспечивать в установившемся режиме заданную точность регулирования. Желательно обеспечить нулевую статическую ошибку регулирования. Кроме этого, желательно обеспечить заданную дисперсию ошибки регулирования.

Вышеперечисленные условия будут выполняться, если объект управления является стационарным, либо его вариации параметров достаточно малы и компенсируются запасами устойчивости системы. Этому способствует то, что большинство промышленных систем - это системы автоматической стабилизации заданных параметров. Серийные регуляторы обеспечивают устойчивый процесс регулирования подавляющего большинства промышленных объектов при условии, что правильно выбраны настройки регулятора.

Высокие требования, предъявляемые к качеству регулирования, способствуют усложнению и повышению стоимости всей системы. Поэтому при создании АСР стремятся найти разумный компромисс между качеством регулирования и затратами на автоматизацию технологического процесса.

1.4. Возмущения в технологическом процессе

Возмущающее воздействие – воздействие, стремящееся нарушить требуемую функциональную связь между задающим воздействием и регулируемой величиной. Основное назначение систем автоматической стабилизации - борьба с возмущениями. На систему стабилизации главным образом действуют два вида возмущений:

- возмущения со стороны нагрузки на технологический объект;
- возмущения в виде изменения сигнала задания на регулятор.

В первом случае система должна скомпенсировать (парировать) внешнее возмущение. Во втором - точно отработать сигнал задания.

Наиболее неприятным случаем является возмущение по нагрузке, так как при этом:

- 1) обычно неизвестно место приложения возмущения;
- 2) неизвестен момент подачи возмущения;
- 3) неизвестен характер или вид возмущающей функции.

Основные возмущения - это возмущения со стороны нагрузки на технологический агрегат, которые проявляются в виде неконтролируемых произвольных изменений расходов, концентраций, температур и т. д.

По характеру изменения во времени возмущения делятся на медленно меняющиеся, импульсные и случайные. В зависимости от характера доминирующих возмущений и типа системы выбирается и нужный критерий оптимизации настроек регулятора.

Выделяют два типа случайных возмущений:

- 1) низкочастотные;
- 2) высокочастотные (шумы).

Низкочастотные случайные возмущения условно считают, что они поступают на вход объекта, в то время как шумы - на его выход (рис. 4). В случае высокочастотных случайных возмущений становится актуальной задача фильтрации этих шумов.

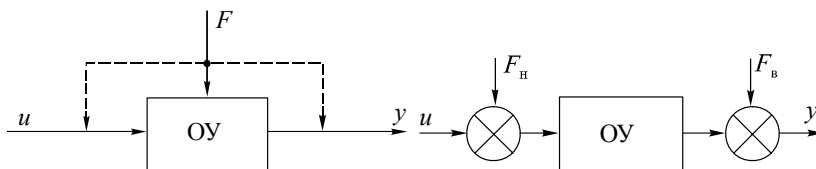


Рис. 4. Распределение случайных возмущений

На практике возмущения по нагрузке чаще всего компенсируются соответствующим перемещением регулирующего органа, изменяющего расход вещества или энергии в объект управления.

Поэтому такое возмущение и приводят ко входу объекта, а его величину измеряют в процентах хода регулирующего органа.

1.5. Основные показатели качества регулирования

Помимо устойчивости процессов во всем диапазоне нагрузок на объект, в автоматических системах предъявляют требования к характеру отклонений управляемой величины, т.е. к динамическому и статическому, или установившемуся, отклонениям, характеризующим процесс управления. В связи с тем, что отклонение управляемой величины существенно не зависит от вида воздействий, места их приложения, которые могут быть различными, обычно при рассмотрении конкретных автоматических систем приходится задаваться типовыми, наиболее характерными для данной системы воздействиями. Обычно в качестве такого типового возмущающего воздействия принимают воздействия вида скачка, являющегося во многих случаях наиболее неблагоприятным. Если в этом случае отклонение удовлетворяет определенным условиям, то часто можно считать, что оно тем более будет удовлетворять им и при иных характерных воздействиях.

Требования, предъявляемые к процессу управления, относятся к основным, характерным его чертам, которые называются показателями процесса управления. *Показатели качества* – величины, характеризующие поведение системы в переходном процессе, вызванном определенным внешним воздействием. Такими показателями являются:

1) ошибка регулирования (статистическая или среднеквадратическая составляющие);

2) время регулирования;

3) перерегулирование;

4) показатель колебательности;

5) динамический коэффициент регулирования R_d , который определяется из формулы

$$R_d = \{[y_1 + y(\infty)]/y_0\} \cdot 100\%.$$

Смысл величин y_1 , y_0 и $y(\infty)$ поясняет рис. 5.

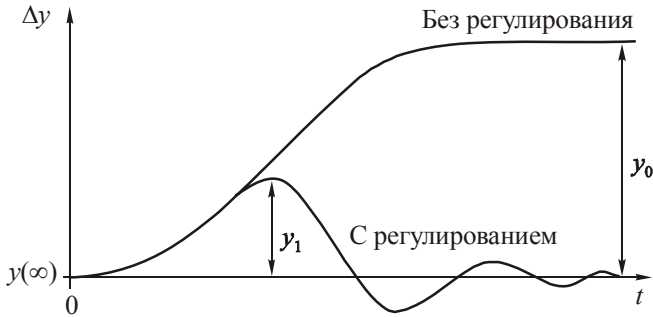


Рис. 5. График пояснения динамического коэффициента регулирования

Величина R_d характеризует степень воздействия регулятора на процесс, т.е. степень понижения динамического отклонения в системе с регулятором и без него.

Величина перерегулирования зависит от вида обрабатываемого сигнала.

При обработке ступенчатого воздействия по сигналу задания величина перерегулирования определяется по формуле

$$\sigma = \frac{X_m - X_y}{X_y} 100\% .$$

Значения величин X_m и X_y иллюстрирует рис. 6.

При обработке возмущающего воздействия величина перерегулирования определяется из соотношения

$$\sigma = \frac{X_1}{X_m} 100\% ,$$

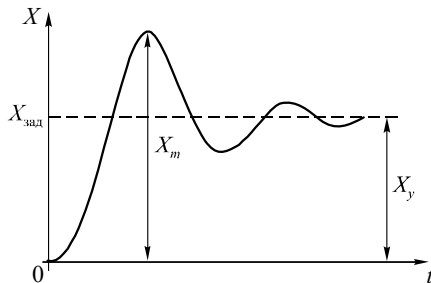


Рис. 6. График обработки ступенчатого сигнала задания

Значения величин X_m и X_1 показаны на рис. 7.

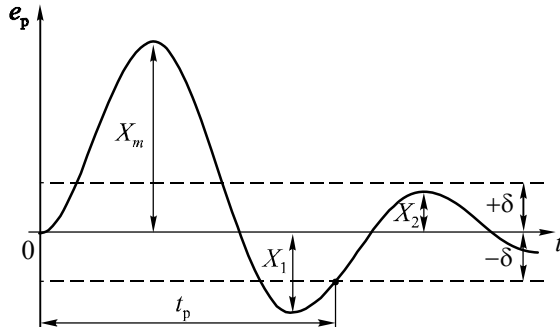


Рис. 7. График переходного процесса при обработке возмущения

Время регулирования — это время, за которое регулируемая величина в переходном процессе начинает отличаться от установившегося значения менее, чем на заранее заданное значение δ , где δ — точность регулирования. Обычно принимается, что $\delta = 3\text{--}5\%$ от величины скачка по сигналу задания. Настройки регулятора необходимо выбирать так, чтобы обеспечить минимально возможное значение общего времени регулирования либо минимальное значение первой полуволны переходного процесса. В непрерывных системах с типовыми регуляторами это время бывает минимальным при так называемых оптимальных апериодических переходных процессах. Дальнейшего уменьшения времени регулирования до абсолютного минимума можно достичь при использовании специальных оптимальных по быстродействию систем регулирования.

В некоторых АСР наблюдается ошибка, которая не исчезает даже по истечении длительного интервала времени — это статическая ошибка регулирования ε_c . Данная ошибка не должна превышать некоторой наперед заданной величины.

У регуляторов с интегральной составляющей ошибки в установившемся состоянии теоретически равны нулю, но практически незначительные ошибки могут существовать из-за наличия зон нечувствительности в элементах системы.

Показатель колебательности M характеризует величину максимума модуля частотной передаточной функции замкнутой системы (на частоте

резонанса) и, тем самым, характеризует колебательные свойства системы. Показатель колебательности наглядно иллюстрируется на графике рис. 8.

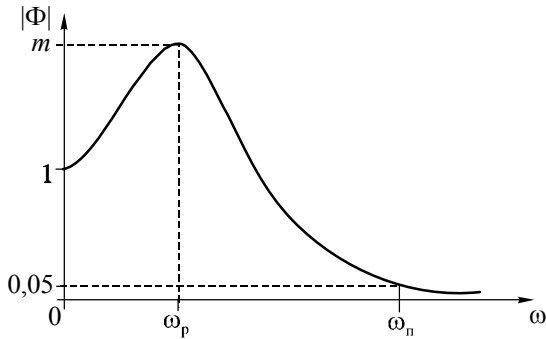


Рис. 8. График модуля частотной передаточной функции замкнутой системы

Условно считается, что значение $M = 1,5-1,6$ является оптимальным для промышленных АСР, так как в этом случае σ обеспечивается в районе от 20 до 40%. При увеличении M колебательность в системе возрастает.

В некоторых случаях нормируется полоса пропускания системы ω_n , которая соответствует уровню усиления в замкнутой системе 0,05. Чем больше полоса пропускания, тем больше быстродействие замкнутой системы. Однако при этом повышается чувствительность системы к шумам в канале измерения и возрастает дисперсия ошибки регулирования.

Аналогом показателя колебательности является степень затухания Ψ :

$$\Psi = \frac{X_m - X_2}{X_m}.$$

Значения величин X_m и X_2 показаны на рис. 7.

1.6. Типовые процессы регулирования

Выбор структуры и параметров автоматической системы определяет ее динамические свойства. Устойчивость системы является, как правило, необходимым, но далеко не достаточным условием для того, чтобы система выполняла свое назначение. Возникает задача обеспечения не только устойчивости, но и надлежащего качества системы и, более того,

наилучшего, оптимального в том или ином смысле, режима функционирования.

В процессе настройки регуляторов можно получить довольно большое число переходных процессов, удовлетворяющих заданным требованиям. Таким образом, появляется некоторая неопределенность в выборе конкретных значений параметров настройки регулятора. С целью ликвидации этой неопределенности и облегчения расчета настроек вводится понятие оптимальных типовых процессов регулирования.

Выделяют три типовых процесса :

1. Аperiodический процесс с минимальным временем регулирования (рис. 9). Этот типовой процесс предполагает, что обрабатывается возмущение F (система автоматической стабилизации). В данном случае настройки подбираются так, чтобы время регулирования t_p было минимальным. Данный вид типового процесса широко используется для настройки систем, не допускающих колебаний в замкнутой системе регулирования.

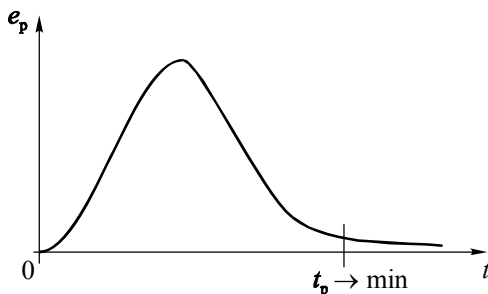


Рис. 9. График апериодического переходного процесса

2. Процесс с 20%-м перерегулированием и минимальным временем первого полупериода (рис. 10). Такой процесс наиболее широко применяется для настройки большинства промышленных АСР, так как он соединяет в себе достаточно высокое быстродействие ($t_1 = \min$) при ограниченной колебательности ($\sigma = 20\%$).

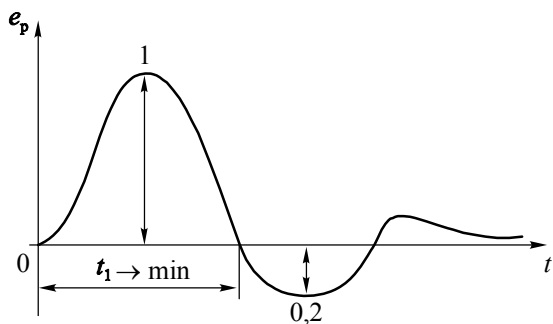


Рис. 10. График процесса с 20%-м перерегулированием

3. Процесс, обеспечивающий минимум интегрального критерия качества (рис. 11). Интегральный критерий качества выражается формулой

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \min ,$$

где e - ошибка регулирования.

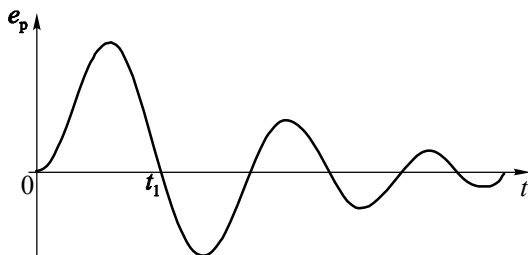


Рис. 11. График процесса по минимуму интегрального критерия качества

К достоинствам этого процесса можно отнести высокое быстродействие (1-й полуволны) при довольно значительной колебательности. Кроме этого, оптимизация этого критерия по параметрам настройки регулятора может быть выполнена аналитически, численно или путем моделирования.

Для каждого из трех видов оптимальных процессов разработаны соответствующие формулы и номограммы для настройки регуляторов на данный процесс.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

В теории автоматического управления разработаны различные методы расчета автоматических систем регулирования при заданных критериях качества, а также методы оценки качества переходных процессов при заданных параметрах объекта и регулятора. При этом наряду с точными методами, требующими больших затрат времени и ручного труда, разработаны приближенные методы, позволяющие сравнительно быстро оценить рабочие параметры регулятора или качество переходных процессов.

Приведем обзор основных методов определения оптимальных параметров настройки регуляторов.

2.1. Аналитический метод определения оптимальной настройки регуляторов с помощью расширенных амплитудно-фазовых характеристик

Рассмотрим последовательность расчета системы автоматического регулирования на заданную степень затухания Ψ и приемы построения линии, равной степени затухания применительно к случаю, когда известны аналитические выражения расширенных амплитудно-фазовых характеристик объекта и регулятора.

Одним из методов расчета автоматических регуляторов в подобных случаях является так называемый корневой метод параметрического синтеза систем автоматического управления. Данный метод основан на понятии расширенных амплитудно-фазочастотных характеристик (РАФЧХ). РАФЧХ какого-либо звена можно получить подстановкой в передаточную функцию этого звена $W(p)$ оператора $p = (i - m)\omega$ или $p = -\eta + i\omega$, где m – степень колебательности, а η – степень устойчивости. В

первом случае расчетные формулы метода обеспечивают получение границы заданной степени колебательности системы m , а во втором – получение границы заданной степени устойчивости η в пространстве параметров настройки регулятора. Дальнейший поиск параметров настройки регулятора осуществляется вдоль границы заданного запаса устойчивости системы регулирования до достижения экстремума принятого критерия качества. Расчетные формулы корневого метода для типовых регуляторов имеют вид

П-регулятор

$$W(P) = C_1,$$

где $C_1 = k_p$ – настроечный параметр регулятора.

ПИ-регулятор

Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид

$$W(P) = -\left(\frac{C_0}{P} + C_1\right),$$

где коэффициенты $C_0 = k_p/T_n$ и $C_1 = k_p$ являются настроечными параметрами регулятора. Амплитудно-фазовая характеристика получается, как обычно, заменой оператора p на $i\omega$:

$$W(i\omega) = -\frac{C_0 + C_1 i\omega}{i\omega} = -\left(C_1 + i\frac{C_0}{\omega}\right),$$

или в показательной форме

$$W(i\omega) = \sqrt{\left(\frac{C_0}{\omega}\right)^2 + C_1^2} \exp\left[i\left(\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{\omega C_1}{C_0}\right)\right].$$

Исходное уравнение для расчета настройки замкнутой линейной системы автоматического регулирования, находящейся на границе заданной степени затухания, имеет вид

$$W(m, i\omega)_p W(m, i\omega)_{об} = 1. \tag{2.1}$$

Уравнение (2.1) можно представить в виде

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(m, \omega)_p = \frac{1}{\operatorname{Re}(m, \omega)_{об}}, \\ \operatorname{Im}(m, \omega)_p = \frac{1}{\operatorname{Im}(m, \omega)_{об}}, \end{cases} \quad (2.2)$$

где $\operatorname{Re}(m, \omega)_{об}$ и $\operatorname{Im}(m, \omega)_{об}$ – расширенные вещественная и мнимая характеристики объекта соответственно, а $\operatorname{Re}(m, \omega)_p$ и $\operatorname{Im}(m, \omega)_p$ – расширенные вещественная и мнимая характеристики регулятора.

Уравнение (2.1) может быть записано в показательной форме

$$A(m, \omega)_p \exp(i\varphi(m, \omega)_p) = \frac{1}{A(m, \omega)_{об} \exp(i\varphi(m, \omega)_{об})},$$

где $A(m, \omega)_p$ – расширенная амплитудно-частотная характеристика регулятора; $\varphi(m, \omega)_p$ – расширенная фазочастотная характеристика регулятора; $A(m, \omega)_{об}$ – расширенная амплитудно-частотная характеристика объекта; $\varphi(m, \omega)_{об}$ – расширенная фазочастотная характеристика объекта.

Отсюда следует:

$$\begin{cases} A(m, \omega)_p = \frac{1}{A(m, \omega)_{об}}, \\ \varphi(m, \omega)_p = -\varphi(m, \omega)_{об}. \end{cases} \quad (2.3)$$

Подставляя в уравнение (2.2) и (2.3) соответственно расширенные вещественную, мнимую, амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики ПИ-регулятора, можно выразить их настроечные параметры через характеристики объектов:

$$\frac{k_p}{T_n} = -\frac{\omega(m^2 + 1) \operatorname{Im}(m, \omega)_{об}}{A^2(m, \omega)_{об}}; \quad k_p = -\frac{m \operatorname{Im}(m, \omega)_{об} + \operatorname{Re}(m, \omega)_{об}}{A^2(m, \omega)_{об}}.$$

Из этих уравнений определяются значения настроечного параметра k_p ; T_n и частоты ω , на которой будет «работать» система регулирования.

Аналогично можно получить настроечные параметры ПИД-регулятора, выраженные через характеристики объектов:

$$\begin{cases} \frac{K_p}{T_n} = \omega(m^2 + 1) \left[\omega C_2 - \frac{\text{Im}_{об}(m, \omega)}{A_{об}^2(m, \omega)} \right]; \\ K_p = -\frac{m \text{Im}_{об}(m, \omega) + \text{Re}_{об}(m, \omega)}{A_{об}^2(m, \omega)} + 2\omega m C_2, \end{cases}$$

где $C_2 = K_p T_d$.

Порядок применения расчетных формул следующий:

- 1) задаются величиной m , диапазоном и шагом изменения частоты ω ;
- 2) по передаточной функции объекта рассчитываются значения расширенной частотной характеристики объекта и в явном виде определяются настройки регулятора в заданном диапазоне частот;
- 3) для П-, И-регуляторов решение системы расчетных уравнений сразу дает параметр настройки и резонансную частоту замкнутой системы;
- 4) для ПД-, ПИ-, ПИД-регуляторов расчетные формулы дают в пространстве параметров настройки границу заданного запаса устойчивости;
- 5) на границе заданного запаса устойчивости ищут значения параметров, минимизирующих принятый критерий качества работы системы. Так, например, минимуму первого интегрального критерия соответствует максимум отношения k_p/T_n , минимуму второго интегрального критерия соответствует точка $0,95 \cdot \max(k_p/T_n)$ в сторону большего значения частоты («правее максимума»).

Расчетные формулы имеют общий характер. На одной и той же частоте ω величины η и m связаны однозначной зависимостью $m\omega = \eta$. Поэтому, подставив в расчетные формулы $m = \eta/\omega$, получим формулы, которыми можно пользоваться для построения границы заданной степени устойчивости η . Если требуется построить границу заданных η и m , то в диапазоне частот $0 \leq \omega \leq \eta/m$ используются формулы с η , а в диапазоне $\eta/m \leq \omega \leq \infty$ – формулы с m . При $\eta = 0$ или $m = 0$ формулы позволяют построить границу устойчивости.

При расчетах настроек регуляторов бывает полезной нижеприведенная таблица (табл. 1) соответствия оценок запаса устойчивости: степени затухания Ψ ; степени колебательности m ; показателя колебательности M .

Т а б л и ц а 1

Таблица соответствия оценок запаса устойчивости

Ψ	0	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	0,998	1,0
m	0	0,221	0,265	0,305	0,366	0,478	1,0	∞
M	∞	2,38	2,09	1,8	1,55	1,29	1,0	1,0

2.2. Метод ВТИ* для приближенного определения оптимальной настройки регулятора

Излагаемая ниже методика дает возможность приближенно определить оптимальные настройки П-, ПИ- и ПИД-регуляторов применительно к объектам, кривые разгона которых имеют формы, подобные изображенным в табл. 2.

Метод основан на следующих положениях:

1. Кривые разгона многих технологических объектов в энергетической, химической, металлургической и других отраслях промышленности идентичны по своему характеру друг другу. Так как передаточные функции такого класса объектов известны, то были детально исследованы и рассчитаны настройки регуляторов применительно к указанным моделям для $\Psi = 0,75$.

2. Большинство рекомендуемых настроек экспериментально проверено на системах регулирования, состоящих из моделей объекта и реального регулятора (электронного регулятора системы ВТИ). Последнее обстоятельство особенно существенно, так как предшествующие эксперименту теоретические исследования базировались на динамических характеристиках идеальных регуляторов, т.е. регуляторов, лишенных зоны нечувствительности, выбега сервомотора, люфтов, трений и т. п.

* Метод, разработанный во Всероссийском теплотехническом институте.

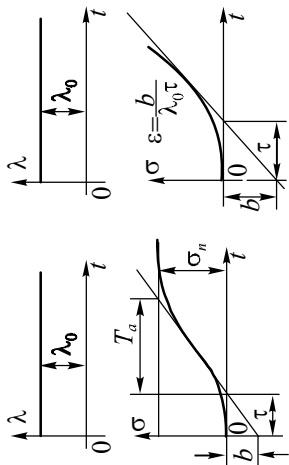
Теоретические исследования и экспериментальная проверка дали возможность уточнить некоторые настройки и наложить определенные ограничения на конструктивные параметры регуляторов (время сервомотора T_c^* , зона нечувствительности Δ , отношение зоны возврата к зоне нечувствительности Δ_v/Δ , отношение времени выбега сервомотора к продолжительности включения $t_{выб}/t_{вкл}$ и др.).

3. В результате расчетно-экспериментальных исследований и определения оптимальных настроек П-, ПИ- и ПИД-регуляторов применительно к большому количеству моделей объектов, составленных из различных комбинаций звеньев, были установлены закономерности изменения настроечных параметров ($\delta = k_p, T_i, T_d$) регуляторов в зависимости от заданных параметров ($k, T_a, \varepsilon, \tau$) кривой разгона объекта. Таким образом, рекомендуемые ниже настройки являются достаточно точными применительно к исследованным моделям объектов, у которых отношение τ/T_a однозначно характеризует форму кривой разгона.

4. Для приближенной оценки динамических свойств реальных объектов их кривые разгона обрабатывают так, как это показано в табл. 2, и затем определяют отношение параметров τ/T_a .

5. По найденному значению τ/T_a определяют настройку регулятора в соответствии с табл. 2 рекомендуемых настроек. Таким образом, кривую разгона промышленного объекта как бы сравнивают с «эталонной» кривой разгона модели с тем же значением τ/T_a и распространяют на данный объект настройку регулятора, рассчитанную для соответствующей модели.

Таблица 2



$$\varepsilon = \frac{b}{\lambda_0 \tau} \left[\frac{\text{ед. рег. вел.}}{\text{ед. возм.} \times \text{сек.}} \right];$$

$$k = \frac{\sigma_n}{\lambda_0} \left[\frac{\text{ед. рег. вел.}}{\text{ед. возм.}} \right];$$

$$\tau = \frac{b}{T_a} \left[- \right]; T_n = 0,15 T_n$$

Объект	$\tau/T_a = 0 \div 0,2$				$0,2 < \tau/T_a < 1,5$				$\tau/T_a > 1,5$			
	П	ПИ	ПИД	ПИД	П	ПИ	ПИД	ПИД	П	ПИ	ПИД	ПИД
δ	$\varepsilon \tau$	1,1 $\varepsilon \tau$	0,8 $\varepsilon \tau$		2,6 $k \frac{\tau/T_a - 0,08}{\tau/T_a + 0,7}$	2,6 $k \frac{\tau/T_a - 0,08}{\tau/T_a + 0,6}$	3,7 $k \frac{\tau/T_a - 0,13}{\tau/T_a + 1,5}$		2 k	2 k	1,7 k	
T_n	—	3,3 τ	2,5 τ		—	$\frac{0,8}{\tau/T_a}$	$\frac{1}{\tau/T_a} \tau$		—	0,6 τ	0,7 τ	
T_c	(1 ÷ 4) τ	(1 ÷ 4) τ	(0,75 ÷ 2) τ		(1 ÷ 4) τ	(1 ÷ 4) τ	(0,75 ÷ 1,5) τ		(1 ÷ 4) τ	(1 ÷ 4) τ	(0,75 ÷ 2) τ	
$t_{\text{выст}}/t_{\text{вкл}}$	$< \frac{\Delta}{\delta_{\text{вкл}}} - 1$	$< 0,3$	$< 0,3$		$< \frac{\Delta}{\delta_{\text{вкл}}} - 1$	$< 0,5$	$< 0,3$		$< \frac{\Delta}{\delta_{\text{вкл}}} - 1$	$< 0,5$	$< 0,5$	

2.3. Метод максимума амплитудно-частотных характеристик (метод Ротача)

Данный метод применяется в том случае, если динамические свойства объектов определены экспериментально в виде частотных комплексных характеристик $W_0(i\omega)$.

Для системы с ПИ-регулятором последовательность расчетов следующая (рис. 12):

1. Вычертить амплитудно-фазовую характеристику $W_0(i\omega)$ и задать несколько частот: $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$.

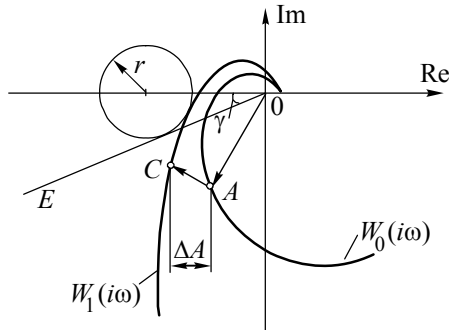


Рис. 12. Определение настройки ПИ-регулятора

2. Для каждой из частот провести вектор $W_0(i\omega_1)$ (вектор OA и аналогичные ему).

3. По частотной характеристике объекта $W_0(i\omega)$ построить несколько частотных характеристик разомкнутой системы для $k_p = 1$ и нескольких значений $T_{и}$:

$$W_1(i\omega) = \left(1 - i \frac{1}{T_{и}\omega} \right) W_0(i\omega).$$

Для этого следует задать несколько значений $T_{и}$: $T_{и1}, T_{и2}, \dots, T_{ин}$, – и затем каждый вектор $W_0(i\omega_i)$ при частоте ω_0 повернуть на угол 90° и разделить на $\omega_i T_{и}$. Получится ряд новых векторов, аналогичных AC , соответствующих частотной характеристике разомкнутой системы при $\omega = \omega_i$ и $T_{и} = T_{иi}$. Точки c_i соединить плавными кривыми.

Таким образом, для получения АФЧХ разомкнутой системы с ПИ-регулятором при $k_p = 1$ и некоторым заданном T_n следует к каждому вектору АФЧХ объекта добавить вектор длиной

$$\Delta A = \frac{A_0}{\omega T_n},$$

где A_0 – длина вектора АФЧХ объекта для данной частоты ω , повернутый на угол 90° по часовой стрелке.

4. Провести прямую OE под углом $\gamma = \arcsin(1/M)$.

5. Путем подбора провести окружность с центром на оси абсцисс, радиус которой одновременно касался бы прямой OE и $W_1(i\omega)$ для данного T_n .

6. Для заданного T_n вычислить коэффициент усиления регулятора в соответствие с формулой

$$k_p = \frac{M}{M^2 - 1} \cdot \frac{1}{r},$$

где r – радиус окружности.

7. Построить по результатам расчета в плоскости k_p/T_n от T_n границу области заданного запаса устойчивости АСР.

Данный метод позволяет довольно точно определить параметры настройки регулятора, но его основной недостаток состоит в том, что необходимо выполнять графические построения.

Настройка ПИД-регулятора определяется аналогично настройке ПИ-регулятора. Для этого строится семейство АФЧХ разомкнутой системы для $k_p = 1$ и для фиксированного оптимального значения отношения постоянной дифференцирования ко времени изотропа $T_d/T_n = 0,5$. Порядок такого построения тот же, что и для ПИ-регулятора, но при других значениях ΔA :

$$\Delta A = \frac{A_0}{\omega T_n} - A_0 \omega \frac{T_d}{T_n}$$

В остальном расчет ничем не отличается от определения настройки ПИ-регулятора.

2.4. Метод незатухающих колебаний (Циглера–Никольса)

В соответствии с этим методом расчет настроек ПИ- или ПИД-регуляторов проводят в два этапа: 1) расчет критической настройки пропорциональной составляющей S_1^{KP} , при которой АСР будет находиться на границе устойчивости, и соответствующей ей $\omega_{кр}$; 2) определение по S_1^{KP} и $\omega_{кр}$ оптимальных настроек $S_1^* = k_p$, $S_0^* = k_p/T_n$, $S_2^* = T_d k_p$, обеспечивающих степень затухания $\psi \approx 0,8 - 0,9$ [6].

Уравнения для расчета S_1^{KP} и соответствующей ей частоты:

$$\varphi_{об}(\omega) + \pi = 0; S_1^{KP} = [A_{об}(\omega_{кр})]^{-1}.$$

Оптимальные настройки П-, ПИ- и ПИД-регуляторов находят по следующим формулам:

для П-регулятора

$$S_1^* = 0,5S_1^{KP};$$

для ПИ-регулятора

$$S_1^* = 0,45S_1^{KP};$$

$$S_0^*/S_1^* = 0,19\omega_{кр} \text{ или } S_0^* = 0,086S_1^{KP}\omega_{кр};$$

для ПИД-регулятора

$$S_1^* = 0,6S_1^{KP};$$

$$S_0^*/S_1^* = 0,32\omega_{кр} \text{ или } S_0^* = 0,192S_1^{KP}\omega_{кр};$$

$$S_2^*/S_1^* = 0,785/\omega_{кр} \text{ или } S_2^* = 0,471S_1^{KP}/\omega_{кр}.$$

Метод Циглера – Никольса лежит в основе многих методов настройки дискретных ПИД-регуляторов. В частности, если рекуррентный алгоритм управления, соответствующий аналоговому ПИД-закону, имеет вид

$$u_p(j) = -K_1\varepsilon(j) - K_0 \sum_{v=0}^{j-1} \varepsilon(v) - K_2[\varepsilon(j) - \varepsilon(j-1)],$$

то для больших значений периода квантования t_0 параметры настройки K_1^* , K_0^* , K_2^* могут быть найдены по следующим формулам:

для П-регулятора

$$K_1^* = 0,5 K_1^{KP};$$

для ПИ-регулятора

$$K_1^* = 0,45 K_1^{\text{KP}} - 0,5 K_0^*;$$

$$K_0^* = 0,54 K_1^{\text{KP}} t_0 / T_{\text{кр}}, \text{ если } \tau \neq 0,25 t_0;$$

для ПИД-регулятора

$$K_1^* = 0,6 K_1^{\text{KP}} - 0,5 K_0^*;$$

$$K_0^* = 1,2 K_1^{\text{KP}} t_0 / T_{\text{кр}}, \text{ если } \tau \neq 0,25 t_0;$$

$$K_2^* = 3/40 K_1^{\text{KP}} T_{\text{кр}} / t_0.$$

В приведенных уравнениях K_1^{KP} и $T_{\text{кр}}$ – коэффициент при П-составляющей закона управления и период колебаний выходной координаты, соответствующие режиму незатухающих колебаний АСР.

3. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Исходные данные:

Дана одноконтурная АСР с ПИ-регулятором (рис. 13) и передаточной функцией объекта регулирования вида

$$W_{об}(P) = \frac{K}{\prod_{i=1}^n (T_i P + 1)} \exp(-P\tau), \quad (3.1)$$

где $K = 0,5$; $n = 2$; $\tau = 9$; $\Psi = 0,95$; $T_1 = 90$; $T_2 = 45$.

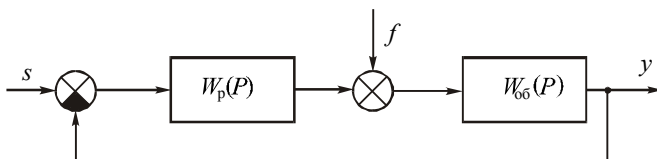


Рис. 13. Структурная схема системы регулирования

Запишем исходную передаточную функцию с учетом заданных коэффициентов:

$$W_{об}(P) = \frac{0,5 \exp(-9P)}{(90P + 1)(45P + 1)}. \quad (3.2)$$

Заменяем оператор P в (3.2) на $i\omega$ и выделим вещественную и мнимую часть:

$$\operatorname{Re}(W_{об}(i\omega)) = -0,5 \frac{(-1 \cdot \cos(9\omega) + 135 \cdot \sin(9\omega)\omega + 4050 \cdot \cos(9\omega)\omega^2)}{(1 + 10125\omega^2 + 16402500\omega^4)}; \quad (3.3)$$

$$\operatorname{Im}(W_{об}(i\omega)) = 0,5 \frac{(-1 \cdot \sin(9\omega) + 135 \cdot \cos(9\omega)\omega + 4050 \cdot \sin(9\omega)\omega^2)}{(1 + 10125\omega^2 + 16402500\omega^4)}. \quad (3.4)$$

Найдем амплитуду и фазовый сдвиг по формулам

$$A_{об}(\omega) = |W_{об}(i\omega)|; \quad (3.5)$$

$$\varphi_{об}(\omega) = \arg(W_{об}(i\omega)). \quad (3.6)$$

Задавая разные значения частоты ω , выполним расчеты формул (3.3) – (3.6) и результаты сведем в табл. 3.

Расчет параметров частотных характеристик

ω, c^{-1}	$\text{Re}_{\text{об}}(\omega)$	$\text{Im}_{\text{об}}(\omega)$	$A_{\text{об}}(\omega)$	$\varphi_{\text{об}}(\omega), \text{град}$
0	0.5	0	0.5	0
0.01	0.1083	-0.3212	0.3389	-71.37
0.02	-0.07123	-0.1658	0.1805	-113.2
0.03	-0.07756	-0.06833	0.1034	-138.6
0.04	-0.05939	-0.02638	0.06499	-156
0.05	-0.04328	-0.008185	0.04405	-169.3
0.06	-0.03162	6.905e-005	0.03162	-179.9
0.07	-0.02339	0.0039	0.02372	-170.5
0.08	-0.01753	0.005634	0.01841	-162.2
0.09	-0.01325	0.006323	0.01469	-154.5
0.1	-0.01008	0.00647	0.01198	-147.3
0.11	-0.007674	0.006334	0.00995	-140.5
0.12	-0.005821	0.006048	0.008394	-133.9
0.13	-0.004372	0.005688	0.007175	-127.5
0.14	-0.003228	0.005295	0.006201	-121.4
0.15	-0.002314	0.004893	0.005413	-115.3
0.16	-0.001581	0.004495	0.004765	-109.4
0.17	-0.000988	0.00411	0.004227	-103.5
0.18	-0.000509	0.00374	0.003774	-97.75
0.19	-0.000121	0.003389	0.003391	-92.04
0.2	0.000193	0.003057	0.003063	-86.39

Исходя из табл. 3 построим амплитудно-фазочастотную (рис. 14), амплитудно-частотную (рис. 15) и фазочастотную (рис. 16) характеристики объекта.

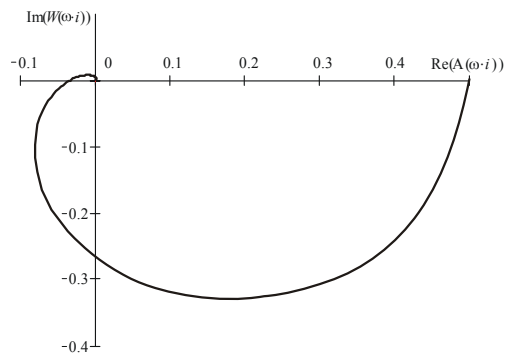


Рис. 14. Амплитудно-фазочастотная характеристика объекта

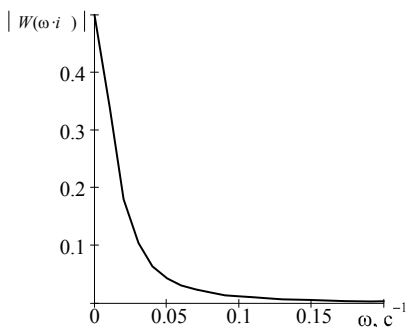


Рис. 15. Амплитудно-частотная характеристика объекта

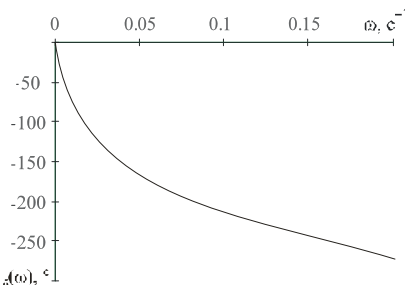


Рис. 16. Фазочастотная характеристика объекта

Определим расширенные частотные характеристики заменив оператор P в (3.2) на $(i - m)\omega$, где $m = 0,477$, при $\Psi = 0,95$ (табл. 1).

Результаты расчета расширенных частотных характеристик сведем в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Результаты расчета расширенных частотных характеристик

ω, c^{-1}	$A_{об}(m, \omega)$	$\varphi_{об}(m, \omega), \text{град}$
1	2	3
0	0.5	0
0.01	0.5411	-71.37
0.02	0.2832	-113.2
0.03	0.15	-138.6
0.04	0.08957	-156
0.05	0.05928	-169.3
0.06	0.04235	-180.1
0.07	0.03202	-189.5
0.08	0.02527	-197.8
0.09	0.02061	-205.5
0.1	0.01726	-212.7
0.11	0.01477	-219.5
0.12	0.01286	-226.1
0.13	0.01137	-232.5
0.14	0.01017	-238.6
0.15	0.009205	-244.7
0.16	0.008408	-250.6

Продолжение табл. 4

1	2	3
0.17	0.007744	-256.5
0.18	0.007185	-262.2
0.19	0.00671	-268
0.2	0.006303	-273.6

Используя ПИ-регулятор, применим следующие формулы для расчета:

$$\frac{k_p}{T_n} = -\frac{\omega(m^2 + 1) \operatorname{Im}(m, \omega)_{об}}{A^2(m, \omega)_{об}}; \quad k_p = -\frac{m \operatorname{Im}(m, \omega)_{об} + \operatorname{Re}(m, \omega)_{об}}{A^2(m, \omega)_{об}}. \quad (3.7)$$

Обозначим $C_0 = k_p/T_n$ и $C_1 = k_p$.

Результаты расчетов сведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчетов параметров ПИ-регулятора

$\omega, \text{с}^{-1}$	C_0	C_1
0.007	0.01299	0.04669
0.008	0.01615	0.3517
0.009	0.0194	0.6577
0.01	0.02266	0.9642
0.011	0.02586	1.27
0.012	0.02892	1.576
0.013	0.03175	1.88
0.014	0.03428	2.181
0.015	0.03643	2.48
0.016	0.03812	2.776
0.017	0.03928	3.067
0.018	0.03982	3.354
0.019	0.03968	3.636
0.02	0.03877	3.912
0.021	0.03701	4.182
0.022	0.03433	4.445
0.023	0.03067	4.701
0.024	0.02593	4.949
0.025	0.02005	5.189
0.026	0.01296	5.419
0.027	0.004576	5.641

На рис. 19 в плоскости параметров настройки регуляторов C_0 и C_1 построена (на основе табл. 5) линия равного затухания при $\Psi = 0,95$.

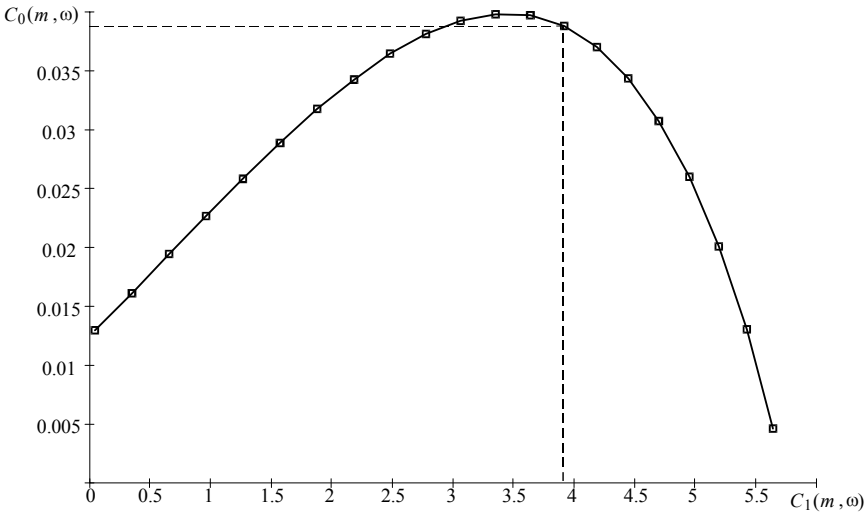


Рис. 19. Область параметров настройки ПИ-регулятора

Точка на графике, соответствующая чуть правее максимума (т.е. минимуму второго интегрального критерия), определит параметры настройки ПИ-регулятора $k_p = C_1 = 3,912$; $T_{и} = C_1/C_0 = 3,912/0,039 = = 100,92$ с. Резонансная частота $\omega_{рез} = 0,02$ с⁻¹.

Для построения переходного процесса в замкнутой АСР при возмущении f , идущем по каналу регулирующего воздействия, преобразуем схему, изображенную на рис. 13. При рассмотрении системы в данном аспекте входом будет являться внешнее воздействие f (в данном случае оно равно единичной ступенчатой функцией – $1(t)$), а выходом – сигнал y (вход s не учитывается, рис. 20).

Сигнал x (рис. 20) проходит через звено с передаточной функцией $W_{об}(P)$ (элемент 4), выходом которого является сигнал y , последний через цепь обратной связи должен быть подан на звено с передаточной функцией $W_p(P)$ (элемент 2) через инвертор I , но на данном этапе элемент I мы исключим из схемы, а инверсию учтем на элементе 3 (заменяв сумматор на элемент сравнения).

В результате преобразования получим схему, изображенную на рис. 21. Передаточная функция полученной замкнутой системы АСР примет вид

$$W_{f_y}(P) = \frac{W_{o6}(P)}{1 + W_p(P)W_{o6}(P)}, \quad (3.8)$$

где $W_p(P) = (C_0/P + C_1)$ – передаточная функция ПИ-регулятора.

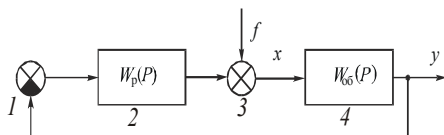


Рис. 20. Исследуемая замкнутая система АСР

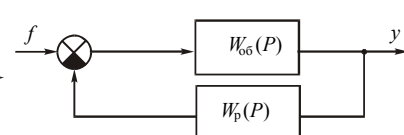


Рис. 21. Результирующая замкнутая система АСР

Найдем вещественную частотную характеристику, заменив оператор P в уравнении (3.8) на $i\omega$, выделим вещественную часть и подставим различные значения частоты ω (табл. 6). На основе табл. 6 строим ВЧХ системы (рис. 22). Для построения переходного процесса (рис. 23) воспользуемся следующей формулой:

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \text{Re}_{f_y}(\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega. \quad (3.9)$$

Т а б л и ц а 6

Результаты расчетов

ω, c^{-1}	$\text{Re}_{f_y}(\omega)$	t, c	$h(t)$
1	2	3	4
1,00e-06	3.934e-009	1,00e-07	1.038e-017
0.01	0.1963	20	0.005947
0.02	0.1336	40	0.04201
0.03	-0.08985	60	0.08873
0.04	-0.07756	80	0.1306
0.05	-0.05254	100	0.1582
0.06	-0.03607	120	0.1682
0.06999	-0.02554	140	0.1617
0.07999	-0.01855	160	0.1425
0.08999	-0.01372	180	0.1159

1	2	3	4
0.09999	-0.01026	200	0.08675
0.11	-0.007705	220	0.0593
0.12	-0.005781	240	0.03629
0.13	-0.004302	260	0.01909
0.14	-0.003147	280	0.007856
0.15	-0.002235	300	0.001885
0.16	-0.001508	320	-5.167e-005
0.17	-0.0009246	340	0.0006499
0.18	-0.000455	360	0.002688
0.19	-7.64e-005	380	0.00502
0.2	0.0002285	400	0.006937

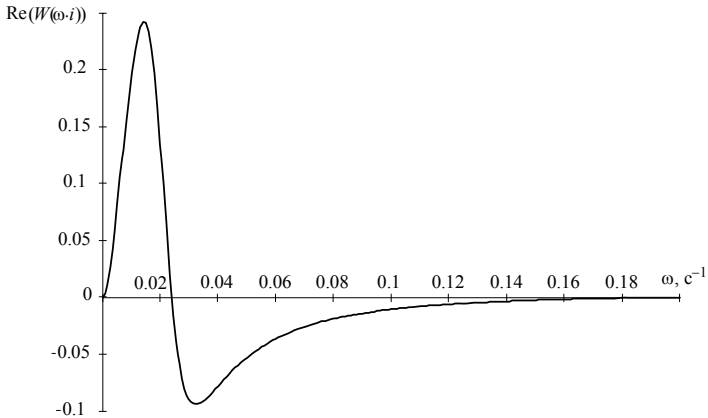


Рис. 22. Вещественно-частотная характеристика системы

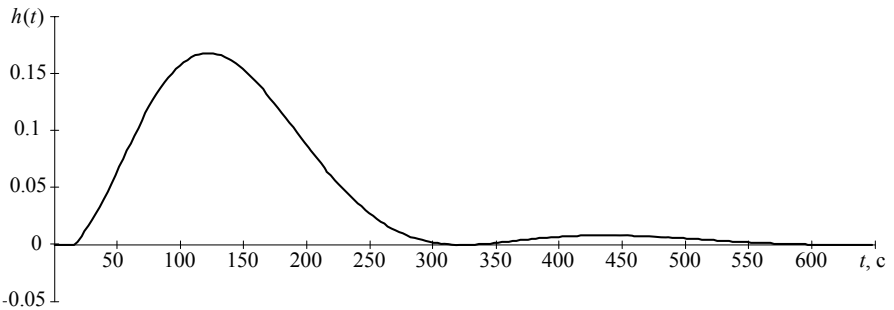


Рис. 23. Переходный процесс системы

Оценки качества переходного процесса

Любая промышленная АСР кроме устойчивости должна обеспечивать определенные качественные показатели процесса регулирования.

Качество процесса регулирования оценивают из переходной характеристики по отношению к единичному ступенчатому возмущающему воздействию.

Склонность системы к колебаниям, а следовательно, и запас устойчивости могут быть охарактеризованы максимальным значением регулируемой величины h_{\max} или так называемым перерегулированием:

$$\sigma = A_3/A_1 \cdot 100\% = (0,003/0,168) \cdot 100\% = 1,8\%.$$

Время регулирования t_p – время, по истечении которого отклонение регулируемой величины от установившегося состояния не будет превышать некоторой наперед заданной величины δ (Обычно $\delta = 0,05K_{об} = 0,05 \cdot 0,5 = 0,025$).

$$t_p = 250 \text{ с.}$$

Статическая ошибка

$$\varepsilon_{ст} = y(\infty) = 0.$$

Динамический коэффициент регулирования

$$R_d = \frac{A_1 + y(\infty)}{K_{об}} 100 = \frac{0,168 + 0}{0,5} 100 = 33,6\%.$$

Максимальная динамическая ошибка

$$A_1 = 0,168.$$

Степень затухания называется отношение разности двух соседних амплитуд, одного знака, к большей из них:

$$\Psi = (A_1 - A_2)/A_1 = (0,168 - 0,00324)/0,168 = 0,95.$$

Как видно, полученный переходный процесс оптимально близок к заданным (требуемая и полученная степень затухания полностью совпадают).

Данная одноконтурная система автоматического регулирования может применяться на всевозможных технологических объектах, где необходим пропорционально-интегральный закон регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. К о р и к о в А . М . Основы теории управления: Учебное пособие. Ч1,2. –Томск: ТУСУР, 2000.
2. Б е с е к е р с к и й В . А . , П о п о в Е . П . Теория систем автоматического регулирования. - М.: Наука, 1972. - 768с.
3. Ц ы п к и н Я . З . Основы теории автоматических систем. –М.: Наука, 1977. –560с.
4. Р о т а ч В . Я . Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. -М.: Энергия, 1973. -440с.
5. С т е ф а н и Е . П . Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. - М.: Энергия, 1972. -376с.
6. А в т о м а т и ч е с к о е управление в химической промышленности /Под ред. Е.Г. Дудникова. -М.: Химия, 1987. -368с.
7. Т е х н и ч е с к а я кибернетика. Теория автоматического регулирования /Под ред. В.В. Солодовникова. –М.: Машиностроение, 1967. –К1-3.
8. Р о т а ч В . Я . Расчет настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. –М.: Энергия, 1961. –286с.
9. П е ч о р и н а И . Н . Расчет систем автоматического управления. – Свердловск: Машгиз, 1962. –112с.
10. З а й ц е в А . П . Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. –Томск: Изд-во ТПУ, 2000. –152с.
11. Д ь я к о н о в В . П . , А б р а м е н к о в а И . В . MathCAD 7.0 в математике, физике и в Internet. – М.: Нолидж, 1999. - 352с.
12. М е д в е д е в В . С . , П о т е м к и н В . Г . Control System Toolbox: MATLAB 5 для студентов. -М.: ДИАЛОГ-МИФ, 1999. -287с.
13. Н а л а д к а средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие /А.С. Клюев, А.Т. Лебедев, С.А. Клюев. -М.: Энергоатомиздат, 1989. -368с.
14. М а з у р о в В . М . , К а р п о в В . С . Адаптивные регуляторы состояния с частотным разделением каналов управления и самонастройки для объектов с запаздыванием //Изв. РАН. Техническая кибернетика. 1994, –№6. –34с.

Приложение 1
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра информационно-измерительной техники (ИИТ)

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой ИИТ
_____ А.А. Светлаков
«__» _____ 200 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПОЛНЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ ПО ТАУ

Студенту гр. _____

1. Тема работы: «Расчет одноконтурной автоматической системы регулирования»

Срок сдачи студентом готовой работы _____

3. Исходные данные к работе.

Дана одноконтурная АСР с ПИ-регулятором и передаточной функцией объекта регулирования

$$W_0 = \frac{K}{\prod_{i=1}^n (T_i P + 1)} \exp(-P\tau).$$

Здесь $K = \underline{\hspace{1cm}}$; $n = \underline{\hspace{1cm}}$; $\tau = \underline{\hspace{1cm}}$; $T_1 = \underline{\hspace{1cm}}$; $T_2 = \underline{\hspace{1cm}}$; $T_3 = \underline{\hspace{1cm}}$.
интегральный критерий $\underline{\hspace{1cm}}$; $\Psi = \underline{\hspace{1cm}}$.

4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

- Реферат
- Введение
- Расчет оптимальных параметров настройки (ОПН) ПИ-регулятора:
расчет и построение границы заданного запаса устойчивости АСР;
обоснование и выбор ОПН регулятора;
расчет и построение переходного процесса в АСР; оценка его качества
- Заключение.

5. Перечень графических материалов: иллюстрация расчетов

Задание принял к исполнению / _____ / _____ г.

Задание выдал / _____ / _____ г.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

№ п/п	<i>K</i>	<i>n</i>	<i>T</i>	Ψ	<i>I</i>
1	1,2	2	80	0,95	1
2	0,4	3	40	0,95	1
3	0,2	1	100	0,9	2
4	2	2	25	0,85	1
5	0,1	1	56	0,9	1
6	0,376	2	108	0,9	2
7	1,5	2	74	0,95	2
8	3,042	3	171	0,85	2
9	2,122	1	269	0,8	2
10	4	2	400	0,95	1
11	0,5	3	300	0,8	2
12	1,5	2	40	0,95	1
13	3	1	72	0,85	1
14	7	3	60	0,9	1
15	0,1	2	20	0,95	2
16	0,7	1	35	0,85	1
17	2	1	68	0,8	2
18	5	2	10	0,95	1
19	0,3	1	15	0,8	1
20	6	2	70	0,9	1
21	8	2	55	0,95	2
22	1,1	2	120	0,95	1
23	1,7	3	110	0,8	2
24	6	3	215	0,95	2
25	1,97	2	60	0,8	2
26	0,7	3	112	0,95	2
27	2,4	2	113	0,85	2
28	6	1	80	0,95	1
29	5	2	141	0,8	2
30	3,4	3	160	0,95	2

Дополнительные данные находятся из формул

$$\tau = T/(5n); \quad T_i = T/i, (i = 1 \dots n).$$

Для заметок

Для заметок

Станислав Викторович Шидловский

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Учебное пособие

К–ОКП ОК–005–93, код продукции 954240

Изд. лиц. ЛР № 04000 от 12.02.2001. Подписано в печать 30.01.03.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага белая писчая. Печать офсетная. Гарнитура «Таймс».

Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд.л. 2,08. Тираж 200 экз.

ЗАО «Издательство научно-технической литературы»
634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а, тел. (3822) 53–33–35

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.