Библиотека СОК

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

С.И. НОВИКОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Часть 1

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЕК РЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2006

УДК 621.311.22.0025+621.183](075.8)
Н 731

Рецензенты:
вед. инженер ЗАО «СибКОТЭС» *Н.Г. Мац,*
доцент, канд. техн. наук *О.А. Вихман*

Работа выполнена на кафедре
тепловых электрических станций

Новиков, С.И.
Н 731 Оптимизация автоматических систем регулирования теплоэнергетического оборудования: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. Ч. 1. – 108 с.

ISBN 5-7782-0637-2

В работе излагаются различные методы определения оптимальных параметров настроек регулирующих устройств автоматических систем регулирования теплоэнергетического оборудования. Рассмотрены расчетные и экспериментальные способы, даны критерии оценки качества регулирования для наиболее распространенных структур систем.

Пособие предназначено для студентов специальности «Автоматизация теплоэнергетических установок» (220301) и аспирантов. Оно представляет интерес для специалистов по проектированию, эксплуатации, наладке и исследованию систем автоматизации теплоэнергетических установок.

УДК 621.311.22.0025+621.183](075.8)

ISBN 5-7782-0637-2

© С.И. Новиков, 2006
© Новосибирский государственный технический университет, 2006

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация теплоэнергетического оборудования имеет большое значение, расширяя возможности создания высокоэкономических и экологически чистых теплосиловых установок. Все возрастающий объем в автоматизации занимают автоматические системы регулирования (АСР) различных технологических процессов в теплоэнергетике. Постоянно совершенствуются структуры АСР, используются новые законы регулирования, которые формируют управляющие воздействия на объект регулирования с целью компенсации реакции на возмущающие воздействия. Но следует отметить, что только совершенствование структуры и законов регулирования еще не гарантируют эффективной работы АСР. Необходимо оптимизировать параметры настройки регулирующих устройств, ибо изменение динамических и статических характеристик объекта регулирования значительно сложнее и не всегда возможно, когда объект уже существует. Начиная с первых работ по созданию методов поиска оптимальных параметров регуляторов (Циглер и Никольс (Ziegler & Nichols, 1943 г.) поиск велся исходя из определенного показателя эффективности действия АСР – критерия качества регулирования системы. За критерии качества в теплоэнергетике приняты следующие:

– динамическая ошибка регулирования σ_1, где σ – регулируемая величина системы;

– квадратичный интегральный критерий, который должен быть минимальным, при условии равенства степени затухания заданной $\psi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1}$.

Показатели качества определяются при 10 % возмущениях нагрузкой. Необходимо отметить, что величина заданной степени затухания изменяется от $\psi = 0,65...0,75$ (в 60-х годах) до $\psi = 0,90...0,95$ (в последние годы прошлого столетия), что связано с исследованиями малоцикловой усталости материалов, используемых в котлостроении.

В настоящее время создано огромное множество различных методов определения оптимальных параметров настроек (ОПН) регулирующих устройств, среди которых из отечественных авторов следует отметить Е.П. Стефани, Н.И. Давыдова, Н.Д. Александрову (ВТИ), А.П. Копеловича, Б.Я. Жихарева, Ю.П. Даниленко (Сибтехэнерго), (Северо-Западное ПНУ треста Запсибспецмонтаж, среди заграничных – Циглера – Никольса, Резвика, фирмы Hartmann & Braun (Германия).

Выбор наиболее приемлемых методов определения ОПН представляет весьма непростую задачу, поэтому автор попытался выбрать те методы, которые оправдали себя за время его 40-летней работы в пусконаладочной организации СибОРГРЭС – Сибтехэнерго. В основу настоящей работы положены лекции, читаемые автором студентам специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов» (220301) на факультете энергетики НГТУ.

Автор выражает особую благодарность студентам группы АТЭ-01 Е.Н. Регузовой, И.В. Пунгину, И.Е. Тарасову и студентам группы АТЭ-11.

Из-за ограниченности объема настоящая работа представляет первую из трех запланированных частей пособия.

Автор заранее благодарит за все замечания и предложения по этой работе и надеется, что она окажется полезной не только студентам, но и инженерам, специализирующимся в области наладки и эксплуатации автоматических систем регулирования теплоэнергетических процессов.

1. ОБЪЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЭС

После подсистем дистанционного управления запорной и регулирующей арматурой и технологических защит, блокировок и сигнализаций теплоэнергетического оборудования особый интерес представляет подсистема автоматических систем регулирования технологических процессов (сокращенно АСР ТП).

Существует рекомендуемый объем АСР на ТЭС, который предписывается руководящим документом РД 153-34.-35.101-01 [1] и предназначен для ТЭС с паровыми котлами ≥ 50 т/ч, водогрейными котлами производительностью свыше 30 Гкал/ч и турбоагрегатами свыше 12 МВт. Он является типовым и может быть уточнен с учетом опыта эксплуатации, но не определяет средств реализации АСР и структуру систем. В объеме нет предписания по автоматическому регулированию частоты и мощности (АРЧМ), что требует учета режима работы и роли ТЭС в энергосистеме.

Остановимся на перечне контролируемых параметров и АСР основных технологических процессов.

ПЫЛЕПРИГОТОВЛЕНИЕ

1. Температура пылегазовоздушной смеси за мельницей.
2. Давление (разрежение) перед подсушивающим устройством или мельницей.
3. Расход сушильного агента, поступающего в молотковые и среднеходные мельницы.

4. Загрузка топливом мельниц пылеприготовительных установо.

5. Напряжение в системе бесступенчатого регулирования частоты вращения питателей пыли топлива (в схемах с прямым вдуванием).

Проиллюстрируем объем АСР для различного вида пылеприготовительных установок:

ШБМ – АСР разрежения; температуры за мельницей; загрузки мельницы топливом.

ММТ – АСР первичного воздуха; загрузки мельницы топливом.

МВ – АСР загрузки мельницы топливом.

ПАРОВЫЕ И ВОДОГРЕЙНЫЕ КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

1. Водопаровой тракт

1. Температура среды за отдельными поверхностями нагрева и за впрысками, в том числе и за растопочными, температура вторичного пара за точкой смешения с байпасом.

2. Температура свежего пара и пара промперегрева за пароперегревателем в каждом паропроводе (для водогрейных котлов – воды за котлом).

3. Давление среды до встроенных задвижек (при пуске котла).

4. Давление свежего пара (для паровых котлов).

5. Давление в растопочном расширителе (при пуске котла).

6. Давление воды в линии пускового впрыска (при пуске котла).

7. Перепад давления на диафрагме линии сброса из встроенных сепараторов.

8. Растопочный расход питательной воды по каждому потоку прямоточных котлов (если невозможно использовать основной регулятор питания).

9. Расход питательной воды на котле (по каждому потоку для парового прямоточного котла).

10. Расход непрерывной продувки.

11. Уровень в барабане котла.

12. Уровень в растопочном расширителе (при пуске котла).

2. Тракты подачи газообразного и жидкого топлива

1. Давление топлива за регулирующим клапаном.
2. Расход топлива.

3. Воздушный тракт

1. Температура воздуха перед воздухоподогревателями.
2. Расход воздуха на котел (при трубчатых ВЗП можно использовать перепад давления на ВЗП).

4. Газовый тракт

1. Разрежение или давление вверху топки.
2. Перепад давления между верхом топки и «шатром» газоплотных котлов под наддувом.
3. Содержание кислорода в дымовых газах (отбор газов в области температур около 600 ^{o}C).

ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ

1. РУ, РОУ, БРОУ

1. Температура редуцированного пара после охладителя.
2. Давление свежего пара.
3. Давление редуцированного пара.

2. Испарительные установки

1. Уровень питательной воды в испарителе и конденсаторе испарителя.
2. Уровень конденсата греющего пара.

3. Питательные насосы. Основные и бустерные насосы

1. Перепад давления между коллектором подвода конденсата к уплотнениям и камерой слива из уплотнения в деаэратор или входом в насос.
2. Температура масла за маслоохладителями.

4. Деаэратор

1. Давление пара в надводном пространстве бака.
2. Уровень воды в баке.

ПАРОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ

1. Температура масла на выходе из маслоохладителей.
2. Температура рабочей жидкости в системе регулирования.
3. Температура среды после пароохладителя на сбросах в конденсатор для турбин блоков.
4. Давление пара в коллекторе подачи к уплотнителям.
5. Давление пара перед пароструйными эжекторами.
6. Давление пара в паропроводе отбора пара на производство.
7. Давление пара в паропроводе теплофикационного отбора.
8. Давление пара к уплотнителям.
9. Давление масла на смазку подшипников.
10. Уровень в конденсаторе.
11. Уровень в ПВД.
12. Уровень в ПНД.

ТЕПЛОФИКАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЭС

1. Давление сетевой воды в обратном коллекторе.
2. Уровень конденсата в сетевых подогревателях.

ХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ВОДЫ

1. Предочистка

1. Температура исходной воды на предочистку.
2. Расход реагентов на каждый осветлитель (с коррекцией по pH).
3. Расход воды на каждый осветлитель.
4. Расход воды из баков повторного использования.
5. Уровень в баке осветленной воды.
6. Концентрация (электропроводность рабочего раствора коагулянта).

2. Узлы восстановления механических фильтров

1. Давление воздуха к механическим фильтрам.
2. Расход воды для взрыхления и отмывки фильтрующего материала.

3. Ионитная часть ВПУ

3.1. Блочная схема фильтров

1. Давление управляющей среды.
2. Уровень в баке обессоленной воды.
3. Уровень в баке частично обессоленной воды каждого блока фильтров.

3.2. С параллельным включением фильтров

1. Давление управляющей воды.
2. Уровень в баке частично обессоленной воды.
3. Уровень в баке обессоленной воды.

4. ВПУ подпитки теплосети

1. Расход воды на каждый блок подкисления.
2. Электрическая проводимость (или pH) воды после ввода кислоты.

5. Узлы регенерации ионитных фильтров

1. Расход воды на смесители реагентов.
2. Расход воды на взрыхление фильтров.
3. Расход воды на отмывку фильтров.
4. Концентрация регенерационных растворов к фильтрам.

6. Котлы с естественной циркуляцией

1. Дозирование аммиака.
2. Дозирование гидравина.

Количество контуров АР зависит от мощности энергоблока, режимов его работы, вида сжигаемого топлива, особенностей тепловой схемы и оборудования, принятых способов регулирования и может быть от 50 до 100.

АСР можно подразделить на следующие участки регулирования:

- подготовки топлива;
- подачи топлива в котел;
- подготовки питательной воды;
- подачи питательной воды в котел;
- температуры свежего пара;
- температуры пара промперегрева;
- параметров турбоустановки;
- параметров вспомогательного оборудования котла;
- параметров вспомогательного оборудования турбины;
- параметров общеблочного (общестанционного) вспомогательного оборудования.

Структура АСР определяется особенностями пусковых режимов:

- изменением технологических схем в процессе пуска;
- необходимости в использовании других регулирующих органов для пусковых режимов. Для примера приведем объем АСР блока 100 мВт.

АСР газомазутного барабанного котла блока 100 МВт:

1) перепада давления п. в. на РПК

2) РПК

3) РПК байпаса Dy 100
4) РПК пусковой
5) топлива
6) общего воздуха
7) разрежения
8) воздуха на ЗЗУ
9) непрерывной продувки
10) давления пара обдувки РВП
11) впрыск I $t^{\circ}_{\text{ПЕ}}$
12) впрыск II $t^{\circ}_{\text{ПЕ}}$
13) пусковой впрыск
14) $t^{\circ}_{\text{ПП}}$
15) t° калорифера
16) t° воздуха после калорифера
17) рециркуляции дымовых газов

АСР турбины:
1) давления пара на уплотнения ЦВД и ЦСД
2) давления пара на уплотнения ЦНД
3) уровня в конденсаторе
4) – 6) уровня в ПНД – 1, 2, 3
7) – 8) уровня в ПНД − 4, 5

2. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим одноконтурную автоматическую систему регулирования (АСР) (рис. 2.1), на которую можно воздействовать двумя видами возмущения: на вход объекта регулирования и заданием регулятору. Возмущение на вход объекта регулирования (ОР) может быть подано как с внешней связи его с другими технологическими процессами, так и со стороны регулирующего органа (РО) – регулирующее воздей-

ствие μ. В главную обратную связь АСР включен регулирующий прибор (РП), реализующий определенный закон регулирования.

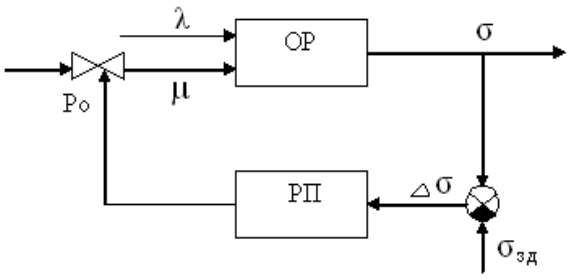


Рис. 2.1

Для простоты будем считать, что регулирующий прибор реализует линейный закон регулирования, который определяется на входе в регулирующий орган, т.е. включает исполнительный механизм, пусковые устройства и редуктор. Рассмотрим поведение регулируемого параметра σ на выходе ОР. Задачей АСР может быть стабилизация параметра σ на заданном уровне или изменение параметра по определенному закону (программе). Рассмотрим вначале задачу стабилизации параметра σ.

Возможны три варианта изменения выходного параметра под действием возмущения со входа ОР:

- значение выходной величины колебательно изменяется с нарастанием амплитуды колебания («расходящийся» переходный процесс – 1);
- значение выходной величины колеблется около некоторого значения с постоянной амплитудой («автоколебательный» переходный процесс – 2);
- значение выходной величины после нанесения возмущения возвращается к заданному значению («сходящийся» переходной процесс – 3).

На рис. 2.2 показаны эти переходные процессы.

Переходные процессы в различных промышленных АСР должны отвечать определенным требованиям. Эти требования получили название критериев качества переходных процессов авторегулирования. Эти

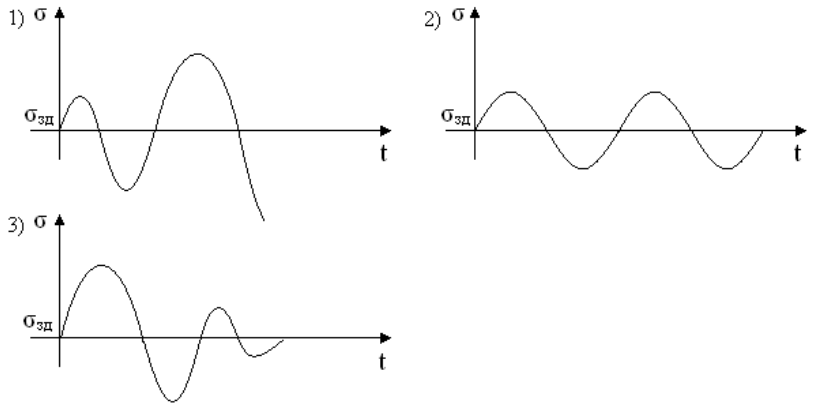


Рис. 2.2

критерии в порядке их значимости распределяются следующим образом.

1. *Степень устойчивости процесса* η, численно равная абсолютному значению действительной части корня характеристического уравнения с наименьшей действительной частью.

2. *Степень колебательности процесса m*, которая определяет затухание его колебательных составляющих и численно равна абсолютному значению отношения действительной части к коэффициенту при мнимой части корня характеристического уравнения с наименьшим абсолютным значением этого отношения.

Для оценки колебательной составляющей процессов используются и другие показатели, например, логарифмический декремент колебаний

$$\vartheta = \frac{\ln \delta_n}{\ln \delta_{n+1}},$$

где δ_n, δ_{n+1} – соответственно *n*-я и (*n* + 1)-я амплитуда рассматриваемой колебательной составляющей. Подставив значения δ_n и δ_{n+1}, будем иметь

$$\vartheta = 2\pi m .$$

Чаще используют *степень затухания колебательной составляющей*

$$\psi = \frac{\delta_n - \delta_{n+2}}{\delta_n},$$

где δ_n, δ_{n+2} – соответствующая амплитуда рассматриваемой составляющей. Подставив значения δ_n, δ_{n+2}, получим

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

Численные значения связи *m* и ψ

m	0	0,141	0,221	0,366	0,478	0,623	1,00	∞
ψ	0	0,600	0,750	0,900	0,950	0,980	0,998	1,00

3. *Динамическая погрешность регулирования* $\sigma_{дин}$ представляет максимальное отклонение регулируемой величины в переходном процессе от заданного значения, т.е.

$$\sigma_{max} = \sigma_{зд} - \sigma_{дин}.$$

4. *Статическая погрешность регулирования* $\sigma_{ст}$, равная отклонению регулируемой величины в новом положении равновесия от ее значения в исходном состоянии равновесия:

$$\sigma_{ст} = \sigma_{\infty} - \sigma_{зд}.$$

5. *Длительность процесса регулирования* $T_{пр}$, равная времени, в течение которого отклонение регулируемой величины от заданного будет меньше определенной наперед заданной величины.

На рис. 2.3 показаны графики переходных процессов с их критериями качества для АСР, описываемой дифференциальным уравнением второго порядка.

Оптимальное качество регулирования – это наиболее близко отвечающее поставленным требованиям поведение регулируемой величины σ при нанесении (появлении) возмущений, выводящих ОР из равновесного состояния.

Объект регулирования является частью технологического процесса, и изменение его статистических и динамических характеристик да-

леко не всегда возможно. Следовательно, достичь оптимального качества регулирования можно путем рационального выбора закона регулирования, оптимального размещения измерительных преобразователей и регулирующего органа, характеристиками РО, правильным выбором статистических и динамических настроек регулирующего прибора с учетом особенностей характеристик ОР.

Следует отметить, что повышение степени устойчивости и степени колебательности процессов может быть, как правило, достигнуто только за счет снижения скорости регулирования (скорости перемещения РО), т. е. за счет увеличения динамической и статической погрешностей процесса.

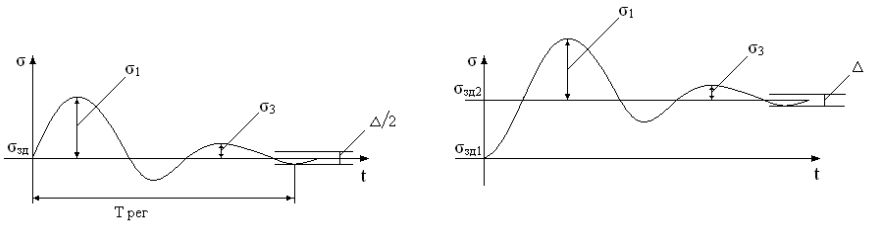


Рис. 2.3

Затухание переходного процесса является первостепенным критерием качества процесса регулирования (в этом смысле создания АСР), поэтому под оптимальной настройкой регулирующего прибора понимается обычно настройка, обеспечивающая заданные значения степени колебательности и степени устойчивости процесса при минимальных значениях других критериев качества.

Предполагая, что ОР и РП являются детерминирующими звеньями, можно представить уравнение замкнутой АСР в операторной форме

$$\sigma(p) = W_0(p)\ \mu(p) + W_\lambda(p)\ \lambda(p),$$

полагая, что на систему действует только одно возмущение λ.

С другой стороны, имеем уравнение.

$$\mu(p) = W_p(p)\ \sigma(p).$$

Исключим из обоих уравнений $\mu(p)$ и получим

$$\sigma(p) = \frac{W_\lambda(p)}{1 - W_0(p)W_p(p)}\lambda(p) = \frac{W_\lambda(p)}{1 - W}\lambda(p)$$

или

$$\sigma(p) = \frac{W_0(p)}{1 - W(p)}x_1(p) + \ldots + \frac{W_\lambda(p)}{1 - W(p)}\lambda(p) + \frac{R(p)}{1 - W(p)},$$

где $\sigma(p)$ – изображение (по Лапласу) регулируемой величины; $\mu(p)$ – изображение отклонения регулирующего органа; $x_1(p)$, …, $\lambda(p)$ – изображения возмущающих воздействий, действующих на систему; $W(p) = W_0(p)\ W_p(p)$ – передаточная функция разомкнутой системы по каналу для регулирующих воздействий; $W_0(p) = \frac{\sigma(p)}{\mu(p)}$ – передаточная функция регулируемого объекта; $W_p(p) = \frac{\mu(p)}{\sigma(p)}$ – передаточная функция по каналу от измерительного прибора к регулирующему органу; $W_2(p) = \frac{\sigma(p)}{x_2(p)} \ldots W_\lambda(p) = \frac{\sigma(p)}{\lambda(p)}$ – передаточные функции разомкнутой системы (источник возмущений может быть и в регуляторе) по каналам к выходу ОР от источников возмущения; $R(p)$ – член, выражающий влияние начальных условий; при нулевых начальных условиях $R(p) = 0$.

Дифференциальное уравнение системы или передаточная функция ее определяет форму процесса регулирования. На нее влияют и форма возмущающих воздействий, расположение их источников в системе и начальные условия.

«Прямой» метод, путем непосредственного интегрирования дифференциальных уравнений системы, требует:

а) определения коэффициентов дифференциального уравнения;

б) вычисления корней p_1, p_2, …, p_n характеристического уравнения $1 - W(p) = 0$;

в) определения начальных условий и постоянных интегрирования;

г) построения графика переходного процесса;

д) оценки качества регулирования;

е) сравнения полученных значений степени устойчивости η, степени колебательности m, динамической $\sigma_{дин}$ и статической $\sigma_{ст}$ погрешностей, длительности T_p с их заданными значениями.

Достаточно большие затраты времени на выполнение этих операций заставляют искать обходных путей. Критерии качества можно определить непосредственно по экспериментальным кривым, минуя операции «а», «б», «в». По этим же данным можно построить приближенные графики переходных процессов в АСР. В линейной АСР свободные колебания имеют форму:

$$\sigma = \sum_{k=1}^{n} C_k e^{p_k t} \ .$$

Если корни характеристического уравнения будут лежать левее прямой АВ, то будет справедливо неравенство $| \mathrm{Re}(p_x) | < \eta$.

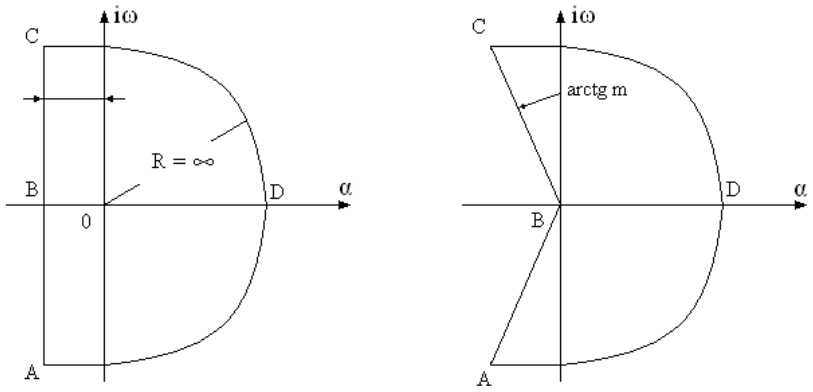


Рис. 2.4

Степень колебательности процесса будет не ниже заданного значения m, т.е. для затухающего процесса будет иметь место неравенство: $\left|\frac{\mathrm{Re}(p_x)}{\mathrm{Im}(p_x)}\right| > m$, если все корни характеристического уравнения будут лежать вне контура *ABCD*.

Назовем частные выражения передаточной функции системы, для которых p изменяется вдоль замкнутого контура $ABCD$ для типов, показанных на рис. 2.4, расширенными амплитудно-фазовыми характеристиками данной линейной системы, и обозначим их через $W_{ABCD}(p)$.

Она определяется как взятое для всей области частот $(-\infty < \omega < \infty)$ отношение вынужденных колебаний на выходе линейной системы ко входным колебаниям, т.е. для входов

$$X_{\text{вх}} = e^{-\eta t} e^{-i\omega t}$$

или

$$X_{\text{вх}} = e^{-m\omega t} e^{i\omega t}.$$

Для приближенной оценки качества регулирования могут быть использованы простейшие интегральные критерии качества регулирования:

$$I_1 = \int_0^\infty \sigma(t)dt,$$

$$I_2 = \int_0^\infty \left[\sigma(t)\right]^2 dt,$$

$$I_3 = \int_0^\infty \left|\sigma(t)\right| dt.$$

Первый интегральный критерий не может быть принят в качестве критерия, так как при автоколебании показатель равен нулю, но этот процесс не может удовлетворить требованиям технологического процесса. Второй интегральный критерий, который подразумевает площадь под кривой, отражает затраты на ликвидацию возмущения. Третий интегральный критерий не имеет этого недостатка, но реализуется сложнее.

В настоящее время для АСР теплоэнергетических процессов за критерий оптимальности принимается комплексная оценка переходных процессов:

- динамическая ошибка должна быть меньше заданной по условиям технологического процесса;
- квадратичный интегральный критерий должен быть минимальным при равенстве показателя затухания заданному.

Под действием возмущения происходит изменение выходной величины объекта регулирования во времени. Задачей АСР является поддержание постоянным заданного значения выходной величины объекта. При отсутствии регулирующего устройства (разомкнутая АСР) изменение выходной величины во времени, называемое переходной характеристикой (или кривой разгона), характеризует динамику объекта регулирования.

При включении регулирующего устройства в главную отрицательную обратную связь изменение выходной величины во времени называют переходным процессом. Вид переходного процесса, с одной стороны, определяется настройкой регулирующего устройства АСР, с другой стороны – требованиями технологического процесса, причем последние являются определяющими. Следовательно, исходя из требований технологического процесса должны быть определены допустимые границы изменения показателей переходного процесса. Эти показатели считают наилучшими (среди остальных), или оптимальными, а параметры настроек регулирующих устройств – оптимальными параметрами настроек.

На рис. 2.5 показаны различные виды переходных процессов, позволяющие определить показатели, характеризующие отдельные процессы. Показанный на рис. 2.5, *а* переходный процесс не переходит через ось заданного значения σ, приближаясь к ней с одной стороны, апериодически. Он характеризуется следующими показателями: динамической ошибкой $\sigma_{дин}$; статической (остающейся) ошибкой $\sigma_{ст}$; площадью под кривой. Отличием одного переходного апериодического процесса от другого служит динамическая ошибка, площадь под кривой. Граничный апериодический процесс определить достаточно сложно.

На рис. 2.5, *б* приведен переходный процесс – апериодический с наложенной колебательностью (состоящий из двух составляющих).

На рис. 2.5, *в* в переходном процессе отсутствует апериодическая составляющая. Штриховая линия сверху и снизу показывает скорость (степень) затухания. Степень затухания может быть определена через показатель колебательности ψ:

$$\psi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1}.$$

При отсутствии апериодической составляющей показатель колебательности для нечетных составляющих равен таковому для четных.

$$\psi_{\text{неч}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1} = \psi_{\text{чет}} = \frac{\sigma_2 - \sigma_4}{\sigma_2}.$$

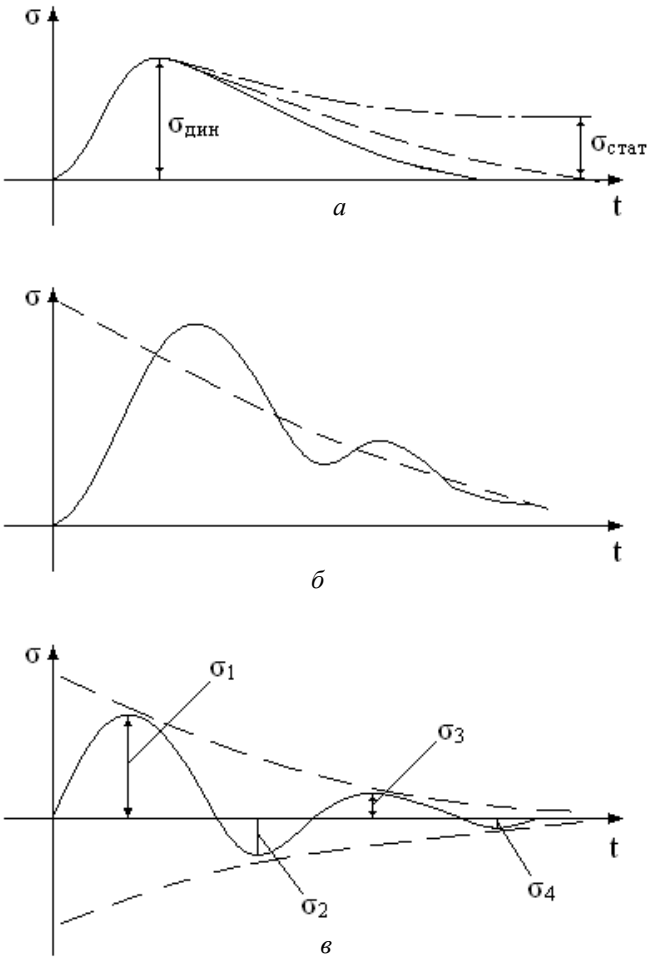


Рис. 2.5

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ АСР

Характеристики ОР АСР (рис. 3.1) могут быть получены различными способами:

- составлением дифференциального уравнения (расчетный метод);
- экспериментальным путем (может быть определена АФЧХ или кривая разгона).

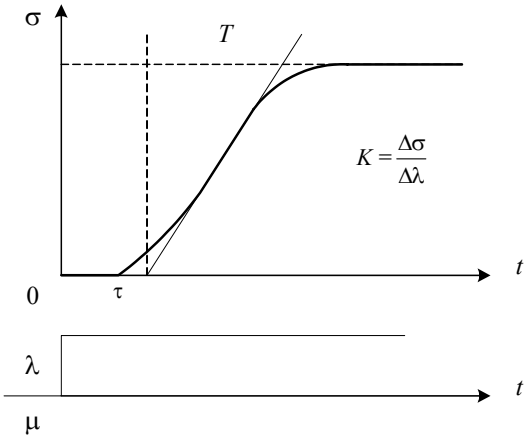
Исследование затрат времени, сопоставление соотношения точности–затраты позволяют сделать однозначный вывод о преимуществе экспериментального метода и его подвида – определения кривой разгона (переходной функции) с последующей обработкой. Исследование динамических характеристик проводится с целью:

- получения данных для расчета параметров настроек регулирующих устройств АСР;
- оценки тех или иных сигналов для уточнения концепции регулирования;
- оценки динамических особенностей АСР;
- оценки влияния конструктивных и режимных факторов на качество регулирования.

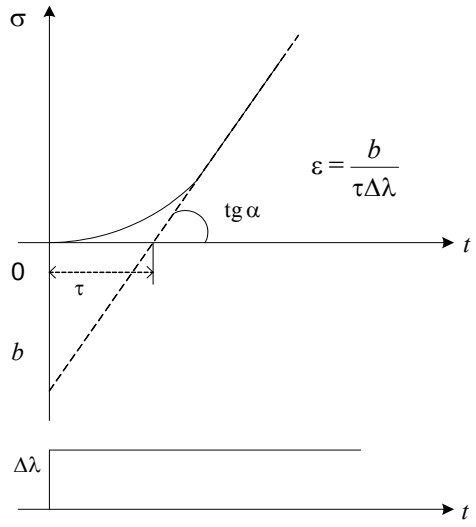
Переходные характеристики (называемые кривыми разгона) объекта регулирования определяются при однократном ступенчатом возмущении регулирующим органом. Это объясняется простотой, наглядностью и относительно низкой трудоемкостью этого способа. Объем испытаний обычно определяется поставленной целью исследования, они различаются типами наносимых возмущений, числом регистрируемых параметров, учетом режимных факторов.

Основные виды возмущений, используемые при динамических испытаниях, следующие:

1) изменение расхода топлива в топку путем дистанционного перемещения органа подачи топлива. На газомазутных котлах при включенном стабилизаторе расхода топлива возмущение наносится путем изменения положения задатчика. На котлах с молотковыми мельницами возмущение топливом наносится при включенных стабилизаторах


σ
T
$K = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\lambda}$
t
0
τ
λ
t
μ

а


σ
$\varepsilon = \frac{b}{\tau\Delta\lambda}$
tg α
t
0
τ
b
Δλ
t

б

Рис. 3.1

первичного воздуха (либо при полностью открытых шиберах первичного воздуха);

2) изменение подачи общего воздуха в топку (при включенном регуляторе общего воздуха как стабилизаторе расхода воздуха воздействием на задатчик);

3) изменение подачи первичного воздуха (при включенных регуляторах первичного воздуха воздействием на их задатчики);

4) изменение давления перед турбиной путем дистанционного воздействия на механизм управления (синхронизатор) турбины (при включенном регуляторе давления перед турбиной «до себя» воздействием на задатчик);

5) изменение расхода питательной воды на прямоточном котле (при включенном регуляторе питания как стабилизаторе воздействием на задатчик; на двух поточных котлах – изменяется расход обеих линий на одинаковую величину);

6) при полностью включенной в работу АСР тепловой нагрузки изменение положения ЗРУ (задатчика ручного управления);

7) дистанционное воздействие на регулирующий орган (клапан впрыска, байпас паро-парового теплообменника, направляющий аппарат ДРГ).

Возмущения необходимо наносить разных знаков (в одну и другую сторону). По виду возмущения различают скачкообразное (ступенчатое) и линейное (с определенной скоростью), реже используют синусоидальные изменения входных сигналов.

Регистрируемые параметры

В общем случае рекомендуется регистрировать следующие параметры:

1) расход пара за котлом;

2) давление пара:
- за котлом;
- в барабане;

3) температура пара:
- острого пара;
- вторичного пара;

4) расход питательной воды (собственного конденсата) на каждый впрыск;

5) температура дымовых газов:

- в поворотной камере;
- в области пароперегревателя;
- по полутопкам;

6) содержание кислорода на выходе из кола (дымовые газы);

7) мощность (ток) электродвигателей прямого вдувания.

На многопоточных котлах параметры регистрируются по каждому потоку. Объем регистрации зависит от цели исследования.

Основные режимные факторы

Одним из важных режимных факторов является нагрузка, поэтому динамические характеристики определяются на минимальной, максимальной и наиболее характерной промежуточной нагрузках, так как котел – объект с нелинейной характеристикой. Второй фактор – вид топлива и соотношение видов топлива. Одним из режимных факторов является давление перед турбиной (рис. 3.2).

Можно рекомендовать определять динамические характеристики при нерегулируемом давлении перед турбиной (рис. 3.2, *б*). Для базового режима работы котла испытания следует проводить при поддержании давления перед турбиной регулятором «до себя» или вторым корпусом котла (рис. 3.2, *а*; 3.2, *в*).

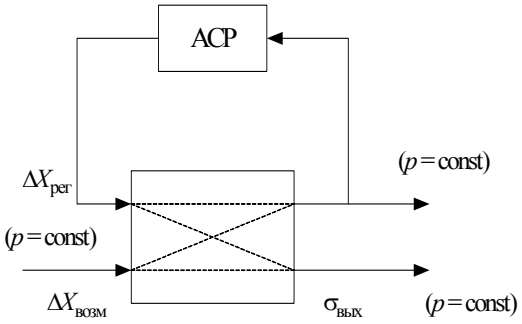
$$\sigma_{\text{вых}}^{(p=\text{const})} = \sigma_{\text{вых}}^{(p=\text{var})} + K_{\text{рег}}^{\text{вых}}(s)\Delta X_{\text{рег}}^{(p=\text{const})},$$

$\sigma_{\text{вых}}^{(p=\text{const})}$ – изменение параметра $\sigma_{\text{вых}}$ при данном возмущении при $p = \text{const}$;

$\sigma_{\text{вых}}^{(p=\text{var})}$ – изменение параметра $\sigma_{\text{вых}}$ при данном возмущении в условиях $p = \text{var}$;

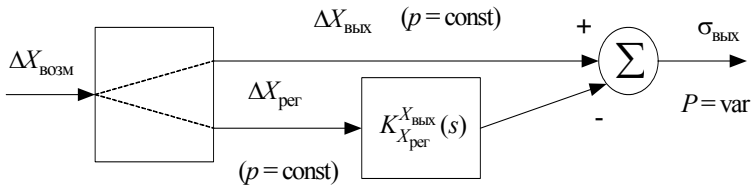
$K_{\text{рег}}^{\text{вых}}$ – передаточная функция выходного параметра относительно регулирующего воздействия;

$\Delta X_{\text{рег}}^{(p=\text{const})}$ – изменение параметра при данном регулирующем воздействии системы регулирования давления пара перед турбиной.



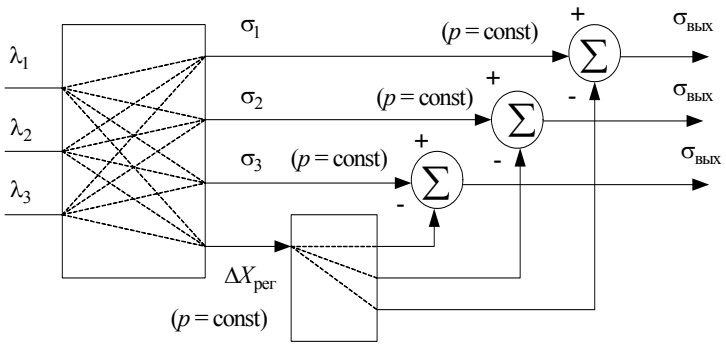
а

Изменение параметра σ при p = const.



б

Определение $\sigma_{вых}$ при p = var.



в

Рис. 3.2

Отсюда следует:

$$\sigma_{\text{вых}}^{(p=\text{var})} = \sigma_{\text{вых}}^{(p=\text{const})} - K_{X_{\text{рег}}}^{\sigma_{\text{вых}}}(s)\Delta X_{\text{рег}}^{(p=\text{const})}.$$

Система регистрации

Требования к системе регистрации:

Время пробега каретки по шкале прибора – 1 с (< 2,5 с).

Рекомендуемая скорость диаграммы – 2500 мм/с, цикл печати – 1,5 с.

Шкала прибора – 0...5 или 0...10 мВ.

Система регистрации должна позволять смещение по шкале и усиление сигнала.

Проведение динамических испытаний

При проведении динамических испытаний важно правильно организовать технологический процесс на испытываемом котле: обеспечивать оптимальные избытки воздуха, без переносов по газовой и тепловой сторонам, по потокам. Расход пара промперегрева должен быть распределен между корпусами.

Динамические испытания следует проводить при налаженных и включенных в работу регуляторах температуры острого и промпара, их работу следует проверить во всем регулировочном диапазоне работы котла. Необходимо стабилизировать давление перед турбиной и тягодутьевой режим.

Внешнее возмущение (нагрузкой турбины, топливом) целесообразно проводить при включенных регуляторах топлива, стабилизирующих температуру дымовых газов. Топочный режим контролируется по показателям кислородомера и характеру изменения температуры дымовых газов. Для повышения стабильности работы пылепитателей желательно проводить испытания при наибольшем уровне пыли в бункере. Контроль за работой отдельных питателей пыли осуществляется визуально по показаниям щитовых амперметров и напоромеров перед горелками.

На котлах с прямым вдуванием необходимо обеспечить постоянную величину слоя угля на ПСУ, мощность (ток) мельниц.

При нарушении, изменении режима необходимо прекратить испытания.

Выбор величины и момента возмущения

Выбор величины возмущения имеет большое значение, оно должно быть ориентировано на заданный исходный режим котла. Величина возмущения связана с уровнем шумов, обусловленных нестабильной работой топливоподающих органов, переменным качеством топлива, колебаниями частот вентиляторов газовоздушного тракта и др. Величина возмущения не должна нарушать нормального режима работы котла.

Работа котла во время каждого опыта должна соответствовать режимной карте: средняя паропроизводительность должна быть равна заданной, среднее значение температуры по перегревательному тракту до и после возмущения должно быть одинаковым. Регистрация включается после стабилизации режима работы котла. В ходе опыта до и после нанесения возмущения периодически фиксируются контрольные значения по другим приборам (эксплуатационные приборы КИП). Длительность стабильного режима до возмущения должна быть равна длительности переходного процесса.

Существенную роль играют значительные нелинейные искажения, которые проявляются в разном виде кривых разгона при возмущениях разного знака. Для этой цели обработку этих кривых разгона производят отдельно. На рис. 3.3 показаны кривые разгона котла ПК-40-1 при возмущениях топливом (ΔB = 7,5 %).

При проведении испытаний рекомендуется выбирать величину возмущения по расходу топлива и питательной воды примерно 7...9 % заданной нагрузки котла.

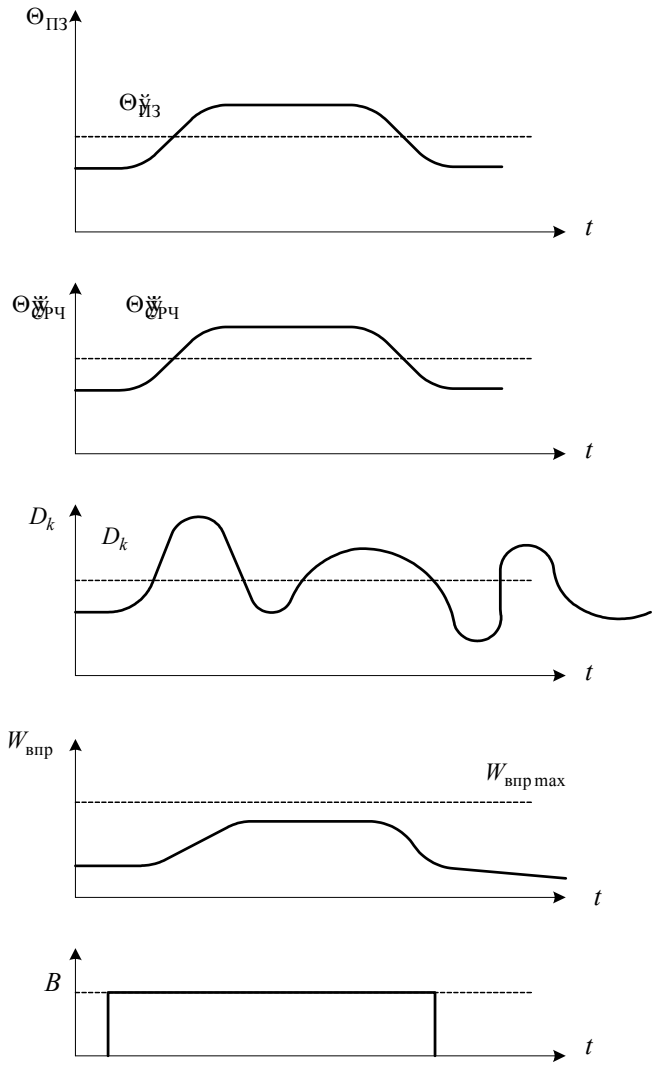


Рис. 3.3:

$\Theta_{СРЧ}$, $\Theta_{ПЗ}$, D_k – заданные значения температуры за СРЧ, за ПЗ, расхода пара; $\Delta W_{впр}$ – расход воды на впрыск

Первичная обработка результатов опытов

Неудачные опыты следует отбрасывать (исключать из дальнейшего рассмотрения). К ним относятся опыты, во время которых были значительные нарушения режима работы котла: броски пылепроизводительности пылепитателя, обрыв угля на ПСУ и т.д.

Обработка ведется на основе анализа графиков изменения параметров эксплуатационных приборов. Графики отдельных кривых на ленте регистрирующего прибора рекомендуется обвести цветными карандашами.

Для достоверности результатов динамических испытаний важное значение имеет число опытов, оставшихся после первой обработки. Решающим фактором для определения количества необходимых опытов является уровень помех.

Можно ориентировочно порекомендовать необходимое количество опытов для котлов с разным составом сжигаемых видов топлива, уровнем помех, технологии:

Котлы с разомкнутой схемой сжигания:
- работа пылепитателей нестабильна..... 12...14
- работа пылепитателей стабильна ..... 8...10

Котлы с прямым вдуванием
(мельницы ММ, МВ; ПСУ) ..... 6...8
Газомазутные котлы ..... 4...6

Следует отметить, что использование различных устройств подавления помех при динамических испытаниях нежелательно из-за искажения динамических характеристик объекта регулирования. Если их применение неизбежно, то при наладке АСР они должны быть использованы для подавления помех в сигналах для регулирующих устройств или должно быть учтено их влияние на динамику объекта.

Понятия пассивного и активного эксперимента

При пассивном эксперименте проведение испытаний сводится к фиксации режимных и исследуемых факторов в течение длительного времени и статической обработке результатов. Активный эксперимент

проводит исследователь путем нанесения возмущений и фиксации необходимых переходных характеристик. Можно использовать теорию планирования эксперимента с выбором величин возмущений по отдельным параметрам и получением уравнения корреляции (при выбранной оценке оптимизации) (рис. 3.4).

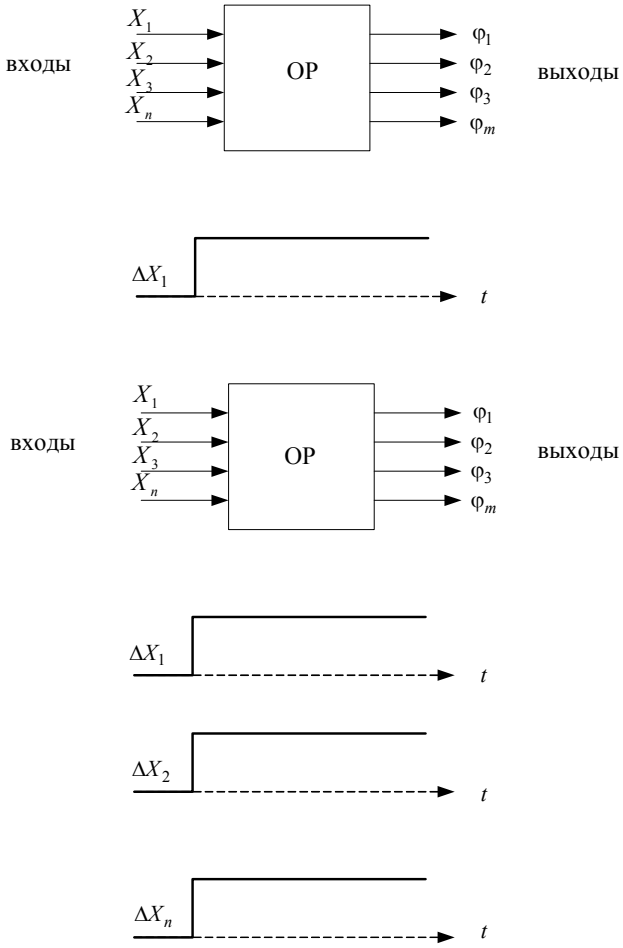


Рис. 3.4

Обработка результатов динамических испытаний

Под обработкой результатов динамических испытаний понимают некоторый объем работ, позволяющих получать усредненные с использованием статистической значимости переходных характеристик объекта регулирования. К этим работам относятся:

- приведение к единичным возмущениям (нормализация);
- совмещение (по моменту возмущения и/или нулевым линиям);
- вторичная отбраковка результатов эксперимента (по заданной статистической достоверности).

Рассмотрим подробнее отдельные операции обработки результатов испытания.

Нормализация кривых разгона

При проведении испытаний предпочтительнее наносить во всей серии опытов одинаковые величины возмущений, что дает определенные преимущества и при вторичной обработке результатов опытов. Но это в ряде случаев невозможно (при нестабильных характеристиках топливоподающих органов нанесение возмущения топливом на пылеугольном котле). Одной из таких возможностей является возмущение задатчиком.

Само приведение к единичному возмущению сводится к получению дробной размерности: в числителе – размерность параметра, в знаменателе – размерность возмущающего воздействия (˚С/(т/ч); ˚С/число контактов плоского контроллера (ПК); в станции бесступенчатого регулирования (СБР); т/ч/(кгс/см^2) и т.п.

В опытах с прямоточным котлом для удобства сопоставления возмущений питательной водой и топливом величину возмущения топливом рекомендуется выражать в тоннах в час установившегося изменения паропроизводительности котла.

Совмещение кривых разгона

Существует два способа совмещения:

- совмещение отдельных кривых по моменту возмущения;
- совмещение по нулевым линиям.

По первому способу ординаты кривых разгона независимо от поведения параметров совмещаются и приводятся к нулю в момент возму-

щения. При этом рассеивание кривых разгона, а следовательно, и точность определения усредненной кривой разгона непостоянна для разных моментов времени. Наиболее точно определяется начальный участок усредненной кривой разгона, наименее точно – конечный (установившийся). Дисперсия как показатель рассеивания (и соответственно ширина доверительного интервала) в момент возмущения равна нулю, а на установившемся участке – максимальному значению.

При совмещении по нулевым линиям проводят так называемую нулевую линию: она получается путем усреднения значений параметра на некотором отрезке времени до момента возмущения. Длина отрезка, на котором производится усреднение, должна быть не менее 2–3 периодов колебаний при высокочастотном спектре помех. Кривые разгона совмещаются на одном графике таким образом, чтобы их нулевые линии совпали с горизонтальной осью координат.

Положительная сторона первого способа совмещения – возможность более точных оценок для начального участка кривой разгона и, в частности, более точного определения величины запаздывания, так как начальный участок во многом определяет расчетные параметры настройки регуляторов, это обстоятельство весьма существенно. Недостаток этого способа – повышенная погрешность в определении коэффициента усиления объекта.

Положительная сторона второго способа – небольшое различие в точности определения усредненной кривой разгона при небольшой величине нулевой линии и одинаковая точность для всех точек кривой разгона при значительной величине нулевой линии. Это дает возможность наиболее точно определить коэффициент усиления, а в ряде случаев (особенно при высокочастотных помехах) и постоянную времени объекта и, следовательно, форму кривой разгона в целом.

Первый способ целесообразно применять для определения времени запаздывания, при низкочастотном спектре помех – для определения постоянной времени (по температуре, по пароводяному тракту котла). Второй способ следует применять при определении коэффициента усиления объекта для сложных форм кривых разгона (по расходу и давлению пара на прямоточных котлах).

Вторичная обработка результатов опытов

Второй этап обработки кривых разгона проводится после приведения кривых разгона данного отчета к единичному возмущению и построения нормализованных кривых разгона в общих координатах.

В семействе полученных после нормализации кривых разгона необходимо проверить достаточность достоверности одной или нескольких кривых разгона, которые по своей форме выделяются из общей массы. Для этой цели используют методы математической статистики, применяя критерий Диксона.

В терминах математической статистики эта проверка означает выяснение, определение вероятности необоснованности отбрасывания в действительности представительных кривых разгона путем сравнения этой вероятности с заданным значением α. Если фактическая вероятность для сомнительной кривой превышает это значение α, отбрасывать данную кривую не следует, в противном случае ее необходимо считать недостаточно достоверной и исключить ее из дальнейшего рассмотрения. Рекомендуется величину α принять равной 0,05, т.е. вероятность необоснованности отбрасывания представительной в действительности кривой разгона равна 5 %.

Значения параметров кривых разгона в конкретный момент времени называют мгновенными значениями параметров. Проверка достоверности кривых разгона проводится для одного или нескольких моментов времени, в которые наблюдается наибольшее рассеивание («разброс») значений кривых разгона. Обозначим мгновенные значения параметра в выбранный момент времени i – σ_1, σ_2 …σ_n (по количеству принятых к рассмотрению n-кривых разгона).

Проверка достаточности достоверности проводится последовательно для кривой с наибольшим значением параметра – σ_{ni}, с наименьшим значением параметра – σ_{n1}, с двумя наибольшими σ_{ni} и $\sigma_{n-1,i}$, с двумя наименьшими σ_{1i}, σ_{2i}.

Для проверки достоверности параметра σ_n вычисляется критерий

$$V_1 = \frac{\sigma_n - \sigma_{n-1}}{\sigma_n - \sigma_1},$$

если есть уверенность, что значение σ_1 достоверно.

Если уверенности нет, вычисляется критерий

$$V_2 = \frac{\sigma_n - \sigma_{n-1}}{\sigma_n - \sigma_2}.$$

Вычисленные значения V_1, V_2 сравниваются с величинами критерия достоверности при α = 0,05 по табл. 3.1.

Таблица 3.1

Критерии достоверности при α = 0.05

n	V_1	V_2	V_3
4	0,765	0,955	0,967
5	0,642	0,807	0,845
6	0,560	0,689	0,736
7	0,507	0,610	0,661
8	0,468	0,554	0,607
9	0,437	0,512	0,565
10	0,412	0,477	0,531
11	0,392	0,450	0,504
12	0,376	0,428	0,481
13	0,361	0,410	0,461
14	0,349	0,395	0,445
15	0,338	0,381	0,430
16	0,345	0,365	0,418
17	0,320	0,359	0,406
18	0,313	0,349	0,397
19	0,306	0,341	0,379
20	0,300	0,334	0,372
30	0,260	0,283	0,322

Примечание. n – номер опыта.

Если значения V_1 (V_2) больше табличного, то отклонение считается существенным, и соответствующая кривая разгона исключается из дальнейшего рассмотрения.

Для проверки достоверности наименьшего значения параметра σ_1 вычисляется критерий

$$V_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_n - \sigma_2}.$$

Если есть уверенность, что значение σ_n достоверно, или критерий

$$V_2 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_n - \sigma_1},$$

если предполагается недостоверность σ_n.

Найденные значения V_1, V_2 сравниваются с табличными.

Если подозрительными кажутся одновременно оба наибольших значения σ_n, σ_{n-1}, вычисляется критерий V_3:

$$V_3 = \frac{\sigma_n - \sigma_{n-2}}{\sigma_{n-1} - \sigma_1}.$$

Если при сравнении полученного и табличного V_3 окажется, что первое больше, то отбрасывается одно наибольшее значение параметра σ_n. Оставшееся значение σ_{n-1} вновь подвергается проверке.

Если подозрительными считаются два наименьших параметра σ_1 и σ_2, вычисляется критерий

$$V_3 = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\sigma_n - \sigma_1}.$$

И проводится аналогичный анализ критериев (табл. 3.2).

П р и м е р 1

При динамических испытаниях получена серия из семи опытов. После приведения к единичному возмущению и совмещению экспериментальных кривых разгона получаем для некоторого момента времени следующие мгновенные значения параметра: $\sigma_1 = 0{,}68$, $\sigma_2 = 0{,}72$, $\sigma_3 = 0{,}73$, $\sigma_4 = 0{,}75$, $\sigma_5 = 0{,}78$, $\sigma_6 = 0{,}82$, $\sigma_7 = 0{,}99$.

С точки зрения достоверности вызывают сомнения σ_1 и σ_7. Необходимо оценить достоверность указанных значений параметров.

Таблица 3.2

Критерии достоверности при α = 0.4

n	V_1	V_2	V_3
4	0,394	0,648	0,743
5	0,308	0,440	0,560
6	0,261	0,350	0,463
7	0,230	0,298	0,402
8	0,208	0,260	0,361
9	0,191	0,236	0,331
10	0,178	0,216	0,307
11	0,168	0,202	0,290
12	0,160	0,190	0,274
13	0,153	0,180	0,261
14	0,147	0,171	0,250
15	0,141	0,164	0,241
16	0,136	0,158	0,233
17	0,132	0,152	0,226
18	0,128	0,148	0,219
19	0,125	0,143	0,213
20	0,122	0,139	0,208
30	0,103	0,115	0,175

Вычислим для σ_7 критерий V_1, предполагая, что значение параметра σ_1 достаточно достоверно

$$V_1 = \frac{\sigma_7 - \sigma_6}{\sigma_7 - \sigma_1} = \frac{0,99 - 0,82}{0,99 - 0,68} = 0,55 .$$

Из табл. 3.1 для $n = 7$ находим критичное значение $V_1 = 0,507$, следовательно, значение параметра σ_7 из дальнейшего рассмотрения надо исключить. Однако и σ_1 вызывает некоторое сомнение, проверим его, вычислив критерий V_2 по σ_7:

$$V_2 = \frac{\sigma_7 - \sigma_6}{\sigma_7 - \sigma_2} = \frac{0,99 - 0,82}{0,99 - 0,72} = 0,63 .$$

Из табл. 1 для $n = 7$ находим критичное значение $V_2 = 0{,}610$, что позволяет сделать вывод о недостаточной достоверности σ_7.

Проверим достаточную достоверность значения параметра σ_1 (исключив предварительно из рассмотрения оказавшееся недостаточно достоверным значение σ_7):

$$V_2 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_6 - \sigma_1} = \frac{0,72 - 0,68}{0,82 - 0,68} = 0,286 .$$

Из табл. 3.1 для $n = 6$ находим, что $V_1 < V_{крит} = 0{,}560$. Следовательно, оснований считать значение параметра σ_1 недостаточно достоверным нет.

Может возникнуть необходимость оценки достаточности менее подозрительных, менее выделяющихся результатов опыта. Эта задача также может быть решена с помощью рассмотренного критерия Диксона.

В этом случае расчетные значения V_1, V_2, V_3 сравниваются с критическими из табл. 3.2, составленной для $\alpha = 0{,}4$.

Если расчетное значение меньше критического, исключать данную кривую разгона не следует. В этом случае с вероятностью не менее 40 % мы можем отбросить представительную в действительности кривую разгона. Значение вероятности $\alpha = 0{,}4$ является настолько большим, что исключается из рассмотрения событий, которые могут появиться с такой вероятностью, что в математической статистике считается недопустимым.

П р и м е р 2

В примере 1 после отбрасывания значения σ_7 применительно для σ_1 расчетное значение $V_1 = 0{,}261$, из чего следует, что значение параметра σ_1 (и соответствующую кривую разгона) можно исключить из рассмотрения, если по условиям проведения опыта есть сомнения, основания в недостаточной достоверности. В противном случае значение параметра σ_1 из дальнейшего рассмотрения не исключается.

Определение усредненной кривой разгона

Усреднению подлежат мгновенные значения параметров минимум для 10-12 моментов времени. Для каждого момента времени t находим среднее мгновенное значение параметра по следующим формулам;

применим их соответственно для одинаковых и неодинаковых возмущений в сериях:

$$\sigma_{\text{ср}}^{(t)} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sigma_i(t);$$

$$\sigma_{\text{ср}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\sigma_i(t)}{\sum_{i=1}^{n}\lambda_i^2},$$

где $\sigma_{\text{ср}}(t)$ – мгновенное среднее значение параметров для момента времени t; n – количество принятых к усреднению опытов; $\sigma_i(t)$ – мгновенное значение параметров для i-й нормализованной кривой разгона (одинаковые возмущения); $\sigma_i(t)$ – мгновенное значение параметров для i-й кривой разгона; λ_i – величина возмущения в i-м опыте.

П р и м е р 3

После исключения из рассмотрения параметра σ_7 (пример 1) усредненное значение $\sigma_{\text{ср}}(t)$ равно:

$$\sigma_{\text{ср}}(t) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sigma_i(t) = 0,68 + 0,72 + 0,75 + 0,78 + 0,82 = 0,747.$$

При проверке наличия существенных нелинейных искажений усреднение должно включать два этапа:

- опыты с разными знаками возмущения усредняются отдельно, а затем сопоставляются. Желательно, чтобы количество опытов возмущений со знаком плюс или минус было одинаковым или мало различалось;
- усредненные кривые разгона разных знаков для каждого момента времени усредняются.

$$\sigma_{\text{ср}}(t) = \frac{\sigma_{\text{ср}}(t)^{+} + \sigma_{\text{ср}}(t)^{-}}{2},$$

где $\sigma_{\text{ср}}(t)$ – результирующее усредненное моментное значение кривой разгона; $\sigma_{\text{ср}}(t)^{+} + \sigma_{\text{ср}}(t)^{-}$ – усредненное моментное значение кривых разгона возмущений со знаком плюс и минус.

4. ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Требования к качеству регулирования зависят от назначения АСР, регулируемого параметра, технологического процесса. Однако существуют общие положения по некоторым критериям, зависящие от общей конфигурации построения систем регулирования. Отечественные АСР строятся с использованием электрических двигателей постоянной скорости, что позволяет сформулировать общие требования, предопределяемые именно этими исполнительными механизмами.

1. Для регуляторов с релейным выходом при неизменной нагрузке агрегата частота включений должна быть не более 6 в минуту.

2. В пределах работы АСР должна быть обеспечена устойчивая работа (сходящиеся переходные процессы):

- для АСР стабилизации параметров – в пределах диапазона регулирования нагрузки;
- для программных АСР пусковых операций – в пусковых режимах.

Принято рассматривать критерии качества регулирования АСР отдельных параметров при следующих режимах:

1) стабильная, неизменная нагрузка (колебания нагрузки менее 2...3 %);

2) изменение нагрузки на 10 %.

За критерии принимают следующие:

- для первого режима – максимальное отклонение регулируемого параметра $\sigma_{э.max}$ (под влиянием случайно действующих эксплуатационных возмущений);
- для второго режима при скачкообразном возмущении нагрузкой – максимальное отклонение регулируемого параметра $\sigma_{макс}$ и интегральный квадратичный критерий $I_1 = \int_0^\infty \sigma^2 dt$. Иногда рассматривают импульсное воздействие возмущения 10 % амплитуды, ограниченное по времени.

Качество поддержания отдельных технологических параметров регламентируется паспортными данными заводов-изготовителей на

конкретное технологическое оборудование, руководящими материалами Минэнерго РФ и ЕЭС РАО «России», отраслевыми и государственными стандартами. Оно зависит от характеристик оборудования (объекта регулирования) и аппаратуры автоматических систем регулирования.

Нормы качества поддержания технологических параметров составлены с учетом требований к оборудованию, регулирующим органам, устройствам измерения параметров, при условии исправности основного и вспомогательного оборудования, соблюдении заданных условий эксплуатации его.

Таблица 4.1

Нормы качества поддержания технологических параметров котла в стационарном режиме нагрузок

Технологический параметр	Максимальное отклонение $\sigma_{э.max}$
Давление пара перед турбиной (режим номинального давления и поддержание давления автоматикой котла)	±2 %
Расход пара на выходе из котла (при поддержании расхода пара автоматикой котла)	±3 %
Уровень в барабане котла	±20 мм
Температура свежего пара на выходе из котла	±6 °С
Температура свежего пара в средней точке тракта прямоточного котла (при поддержании температуры корректирующим регулятором)	±10 °С
Температура пара промперегрева на выходе из котла	±6 °С
Разрежение в топке	±20 Па (± 2 кгс/м^2)
Содержание кислорода в дымовых газах:	
• для котлов, работающих на сернистом топливе в режиме сжигания с предельно малыми избытками воздуха	±0,1 %O_2
• для мазутных котлов при малых избытках воздуха (при постоянном времени кислородомера не более 1,5 мин)	±0,2 %O_2
• для остальных котлов	±0,5%O_2

Нормы качества регулирования составлены на основании опыта наладочных работ ОАО ОРГРЭС и других наладочных организаций.

В табл. 4.1 приведены значения максимального отклонения основных технологических параметров котла при работе его в стандартном режиме в пределах регулировочного диапазона нагрузок котла.

Данные по точности поддержания параметров по табл. 4.1 используются при выполнении статических расчетов для АСР котла.

Общие требования к динамической точности (табл. 4.2) должны быть обеспечены при 10 % возмущении нагрузкой. В этой таблице приведены данные по максимальному отклонению (динамической ошибке) и интегральному квадратичному критерию.

Таблица 4.2

Показатели качества регулирования технологических параметров котла при скачкообразном изменении нагрузки на 10 %

Технологический параметр	Показатель качества		Примечания
	Максимальное отклонение	Значение интегрального квадратичного критерия	
Давление пара перед турбиной: • для барабанных котлов • для прямоточных котлов	±3 % ±5 %	1000 $(\%)^2$ с 2000 $(\%)^2$ с	В диапазоне нагрузок 70...100 % и при поддержании давления автоматикой котла
Давление пара перед турбиной • для барабанных котлов • для прямоточных котлов	±4 % ±6 %	– –	В диапазоне нагрузок от нижнего предела до 70 % номинальной в режиме номинального давления и при поддержании давления автоматикой котла
Расход пара на выходе из котла	–	12000 $(\%)^2$ с	При поддержании расхода автоматикой котла

Продолжение табл. 4.2

Технологический параметр	Показатель качества		Примечания
	Максимальное отклонение	Значение интегрального квадратичного критерия	
Уровень в барабане котла	±50 мм		В диапазоне нагрузок 70...100 % номинальной.
	±60 мм		В диапазоне нагрузок от нижнего предельного значения до 70 % номинального
Температура свежего пара на выходе из котла	±8 °С	5000 $(°C)^2$ с	В диапазоне нагрузок 70...100 % номинальной
	±11 °С	–	В диапазоне нагрузок от нижнего предельного до 70 % номинального в режиме номинального давления
	±13 °С	–	То же в режиме скользящего давления
Температура свежего пара в средней точке тракта прямоточного котла	±12 °С	–	В диапазоне нагрузок 70...100 % номинальной, при поддержании температуры регулятором
	±14 °С	–	В диапазоне нагрузок от нижнего предельного значения до 70 % номинального в режиме постоянного давления и поддержания температуры регулятором

Окончание табл. 4.2

Технологический параметр	Показатель качества		Примечания
	Максимальное отклонение	Значение интегрального квадратичного критерия	
	±16 °С	–	В диапазоне нагрузок от нижнего предельного значения до 70 % номинальной, при режиме скользящего давления и поддержании температуры регулятором
Температура пара промперегрева на выходе из котла	±10 °С	10000 $(°C)^2$ с	В диапазоне нагрузок 70...100 % номинальной
	±16 °С	–	В диапазоне нагрузок от нижнего предельного до 70 % номинальной
Поддержание кислорода в дымовых газах:			
• для котлов, работающих на сернистых топливах в режиме сжигания с предельно малыми избытками воздуха	±0,2 % O_2		С выполнением мероприятий по режиму сжигания
• для мазутных котлов при малых избытках воздуха	±0,3 % O_2	10 $(\%O_2)^2$ с	При постоянной времени кислородомера 1,5 мин
• для остальных котлов	±1 % O_2	200 $(\%O_2)^2$ с	То же
Разрежение в топке	±30 Па (±3 кгс/м^2)	–	

В табл. 4.3 приведены показатели качества регулирования технологических параметров турбоустановки при стационарных режимах работы (колебания нагрузки менее 2...3 %).

Таблица 4.3

Показатели качества регулирования технологических параметров турбоустановки при стационарном режиме нагрузки

Технологический параметр	Максимальное отклонение
Давление пара в коллекторе лабиринтных уплотнений	±5 кПа (0,05 кгс/см^2)
Уровень воды в конденсаторе	±150 мм
Уровень конденсата греющего пара в регенеративных подогревателях	±150 мм
Давление пара в деаэраторе	±20 кПа (0,2 кгс/см^2)
Уровень воды в деаэраторе	±2 кПа (±200 кгс/м^2)
Давление перед турбиной («до себя»)	±2 %
Давление в общем паропроводе	±2 %

В табл. 4.4 приведены показатели качества регулирования параметров турбины при изменении нагрузки на 10 %.

Таблица 4.4

Показатели качества регулирования технологических параметров турбоустановки при скачкообразном изменении нагрузки на 10 %

Технологический параметр	Показатель качества		Примечания
	Динамическая ошибка σ_{max}, %	Интегральный критерий $(\%)^2$ с	
Давление перед турбиной («до себя»)	4,3	1100	Дисперсия $D_{ОП}^{РДС} = 0{,}115$ (кгс/см^2)^2
Давление в общем паропроводе (главный регулятор)	6	2000	Дисперсия $D_{ОП}^{ГР} = 0{,}155$ (кгс/см^2)^2 Без главного регулятора и регулятора «до себя» – дисперсия $D_{ОП} = 0{,}86$ (кгс/см^2)^2

В табл. 4.5 даны показатели качества регулирования параметров энергоблока при стационарном режиме нагрузок.

Таблица 4.5

Показатели поддержания технологических параметров энергоблока при стационарном режиме нагрузок

Технологический параметр	Максимальное отклонение, %
Мощность турбогенератора	±3
Давление пара перед турбиной (в режиме постоянного давления)	±2
Положение клапанов турбины (в режиме скользящего давления)	±2

В таблице 4.6 показаны критерии качества поддержания технологических параметров энергоблока при изменении нагрузки на 10 %.

Таблица 4.6

Показатели качества поддержания технологических параметров энергоблока при скачкообразном 10 % возмущении по нагрузке в пределах регулировочного диапазона нагрузок

Технологический параметр	Показатели качества		Примечание
	Максимальное отклонение, %	Значение интегрального критерия $(\%)^2$ с	
Мощность турбогенератора	–	1500	При участии блока в системном регулировании частоты и мощности
		12000	При стабилизации давления пара перед турбиной
Давление перед турбиной	±3	1000	В диапазоне нагрузок 70...100 % номинальной
	±5	2000	В диапазоне нагрузок от нижнего предельного значения до 70 % номинальной в режиме постоянного давления
		–	
Положение клапанов турбины	±5%	2000	В режиме скользящего давления

В режимах пуска и нагружения допустимые значения показателей поддержания технологических параметров показаны в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Показатели поддержания технологических параметров котла при пуске и нагружении

Технологический параметр	Максимальное отклонение, %
Расход питательной воды	±10
Температура свежего пара за котлом	±20
Температура пара промперегрева за котлом	±20

Целесообразно в качестве примера привести критерии качества регулирования, принятые в других странах, например, в Польше (табл. 4.8 и 4.9).

Основной задачей энергоблока является участие его в покрытии графиков нагрузок энергосистемы путем автоматического регулирования мощности.

АСР должна обеспечить:

- изменение активной мощности до заданного значения, с заданной скоростью (плановое изменение мощности);
- изменение активной мощности в соответствии с изменением задания, носящим случайный характер (неплановое изменение мощности);
- изменение активной мощности при отклонении частоты сети за заданные пределы в соответствии с установленной статической характеристикой «частота–мощность»;
- взаимодействие с устройствами противоаварийной автоматики и переход на послеаварийный уровень мощности, задаваемой послеаварийной автоматикой;
- поддержание заданных значений давления свежего пара перед турбиной или положение регулирующих клапанов турбины с разрешением дозированных динамических отклонений указанных параметров в целях приемистости энергоблока;
- предотвращение понижения давления свежего пара перед турбиной ниже минимального допустимого уровня;

Таблица 4.8

Критерии качества регулирования энергоблока ОР – 650 ТЭС Рыбник (Польша) (по котлу)

Технологический параметр	Режим		Диапазон нагрузок, %	Примечания
	Стационарный	10 % возмущения		
Давление пара за котлом	±2,5 %	15 - 25 %	60...100	T_p = 5 мин ψ і 0,5
Расход воздуха	±1,5 %	±2 %		T_p = 2 мин
Содержание кислорода O_2	3 %	4 %		
Разрежение в топке	±5 % мм H_2O	±10 % мм H_2O	60...100	
Давление первичного воздуха	±12 % мм H_2O	±20 % мм H_2O		
Температура первичного воздуха	±25 °С	±35 °С		
Температура аэросмеси	±10 °С	±15 °С	60...100	T_p = 4 мин Без колебаний
Уровень в барабане	±50 % мм H_2O	±60 % мм H_2O	60...100	T_p = 2 мин Апериодические колебания
Температура свежего пара	±9 °С	±15 °С	60...100	T_p = 6 мин, ψ і 0,5
Температура пара промперегрева	±9 °С	±15 °С	60...100	T_p = 6 мин, ψ і 0,5

Таблица 4.9

Критерии качества регулирования технологических параметров энергоблока ТЭС Рыбник (Польша) (по турбине)

Технологический параметр	Режим		Диапазон нагрузок, %	Примечания
	Стационарный	10 % *N*		
Давление пара	±5 %			T_p J 40 с Апериодический процесс
Уровень:				
• в ПНД	±5 %			То же
• в ПВД	±5 %			То же
• в конденсаторе	±5 %			То же
Расход конденсата	±5 %			То же
Давление пара за БРОУ-1	±1,5 атм	±3,5 атм		
Температура за БРОУ-1	±10 °С	±15 °С		
Давление за БРОУ-2	±0,6 атм	±1,2 атм		
Температура за БРОУ-2	±10 °С	±15 °С		
Давление в деаэраторе	±0,2 атм	±0,35 атм	60...100	T_p = 2 мин Без колебаний
Уровень в баке обессоленной воды	±100 мм H_2O	±200 мм H_2O	60...100	T_p = 2 мин Без колебаний
Температура масла за маслоохладителями	±7 °С			Апериодический процесс

• предотвращение недопустимых термических напряжений в деталях турбины за счет соответствующего ограничения темпа мощности энергоблока;

• минимальное рассогласование между заданным и фактическим значением в случае возникновения технологических ограничений с сохранением при этом основных технологических параметров энергоблока в допустимых пределах;

• перевод энергоблока на заданное значение нагрузки при действии внутриблочных (технологических) защит.

Для обеспечения необходимого участия энергоблока в аварийных режимах при открытии клапанов турбины на 30 % полного хода с одновременным воздействием на органы управления котла показатель приемистости:

$$\Pi = \frac{\int_0^{\tau} \Delta N dt}{\Delta N_{\text{уст}} t},$$

где $\Delta N, \Delta N_{\text{уст}}$ – текущее и установившееся отклонение мощности энергоблока; t – время от момента подачи сигнала на открытие сигнала, должен изменяться по таблице.

t, с	1	5	30	90	150
П	0,2	0,35	0,5	0,6(0,5)	0,7(0,6)

Примечание. Величины в скобках – для пылеугольных котлов.

Динамические свойства энергоблока должны быть таковы, чтобы при одновременном воздействии клапаны турбины и органы управления нагрузкой котла изменялись на величину, соответствующую изменению нагрузки на 10 % с сохранением отклонения давления пара в допустимых пределах по условиям надежности.

В диапазоне регулируемых нагрузок в нормальном режиме энергоблоки должны допускать изменение мощности без ограничения скорости, в пределах ±7 % номинальной нагрузки для блоков СКД и

±10 % для блоков докритического давления. Сверх этих пределов скорость изменения нагрузки блока ограничена ±0,3 %/мин для блоков СКД и ±0,5 %/мин для блоков докритического давления.

Таблица 4.10

Критерии качества поддержания параметров для энергоблоков

Режим	Условия и параметры величины	Критерий	
Ступенчатое изменение нагрузки	Скорость реакции	±0,3% N_{max} 5 с	N_{max} 30 с
Наброс или сброс нагрузки	Блок отключен от сети	Длительная работа в течение нескольких часов	
	Блок в сети (частичные сбросы)	Постоянная работа со сниженными нагрузками	
Пуск	Максимальное время пуска после простоя < 8 ч 8...50 ч >50 ч	 2 ч 3 ч 5 ч	
Управление нагрузкой	Неравномерность характеристик регулирования Нечувствительность по частоте	4...6 % ±20 мГц	
Наброс нагрузки	Блок отключен от сети	Без останова блока и срабатывания предохранительных клапанов Уровень в конденсаторе и расход питательной воды в норме	
Управление частотой	Стабилизация частоты регулятором скорости	В соответствии с требованиями энергосистемы	
Изменение нагрузки	Характеристики клапанов турбины регулирующие с.д. дроссельные БРОУ-1, БРОУ-2	Характеристики линейные. Скорость открытия закрытия 5...10 с 0,1...0,3 с 5...10 с 0,3...0,5 с 5...10 с 0,3...0,5 с	
Отключение от сети	Характеристики регулятора скорости	Время закрытия с.к. < 150 мс	

Для плавных изменений нагрузки (2-3 раза в сутки) в диапазоне регулируемых нагрузок энергоблоки должны допускать изменение мощности на $\pm 20\,\%$ номинальной мощности для СКД и $\pm 25\,\%$ для блоков докритического давления со скоростью до $\pm 4\,\%$/мин для газомазутных и до $\pm 2\,\%$/мин для пылеугольных котлов.

При дальнейшем изменении нагрузки в том же направлении скорость изменения мощности не менее $\pm 0,7\,\%$/мин для СКД и $\pm 1\,\%$/мин для докритического давления.

В нормах западных стран для блоков применимы следующие значения критериев (табл. 4.10).

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЕК ОДНОКОНТУРНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Переходный процесс в промышленной системе регулирования должен иметь определенный характер, диктуемый требованиями технологического процесса.

Ранее были рассмотрены критерии оптимальности переходных процессов и требования к качеству регулирования отдельных систем автоматического регулирования теплоэнергетического оборудования. Они сводились к минимизации динамической ошибки и интегрального квадратичного критерия при заданной степени колебательности.

Вопрос выбора степени колебательности, ее величины достаточно долго обсуждался с различных позиций, включая срок службы металла. В последнее время граничным значением принято считать $\psi = 0,9...0,95$. В некоторых европейских странах (Германия, Польша) – принимают требования апериодичности переходного процесса, однако при $\psi = 1,0$ процесс может иметь разную динамическую ошибку.

Степень затухания процесса определяется следующим образом:

$$\psi = 1 - \frac{A_{i+2}}{A_i} = 1 - \frac{A_n e^{-m(k\pi+2\pi)}}{A_n e^{-mk\pi}} = 1 - e^{-2\pi m},$$

где $2\pi m$ – логарифмический декремент затухания колебаний.

Различным степеням затухания ψ соответствуют следующие значения m (см. табл. 5.1)

Таблица 5.1

ψ	0,75	0,90	0,95	0,99	0,998	1,0
m	0,221	0,366	0,478	0,623	1,0	∞

Для настроек оптимальных настроек регулятора можно использовать амплитудно-фазовые характеристики объекта и регулятора с учетом заданной степени затухания, так называемые расширенные АФЧХ. Расширенные АФЧХ могут быть получены либо аналитическим путем (по дифференциальному уравнению или передаточной функции), либо графическим методом по заданным графикам нормальных частотных характеристик.

Аналитические выражения расширенных частотных характеристик наиболее распространенных регуляторов имеют вид:

П-регулятор $W(m, i\omega) = -C_1$,

ПИ-регулятор $W(m, i\omega) = \frac{mC_0}{\omega(m^2+1)} - C_1 + i\frac{C_0}{\omega(m^2+1)}$,

ПИД-регулятор $W(m,i\omega) = \frac{mC_0}{\omega(m^2+1)} - C_1 + m\omega C_2 + i\left[\frac{C_0}{\omega(m^2+1)} - \omega C_2\right]$.

На рис. 5.1–5.3 показаны частотные характеристики П-, ПИ-, ПИД-регуляторов для $\psi = 0;\ 0,75;\ 0,90$.

Рассмотрим последовательность расчета автоматической системы регулирования (АСР) по известным аналитическим выражениям расширенных АФЧХ объекта регулирования.

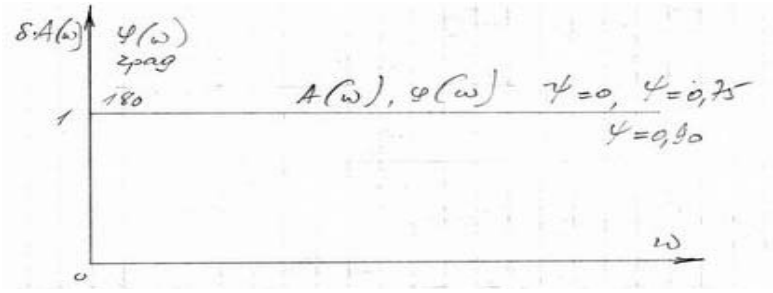


Рис. 5.1

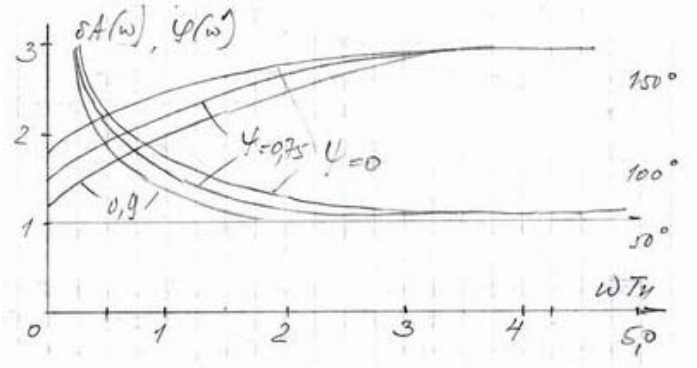


Рис. 5.2

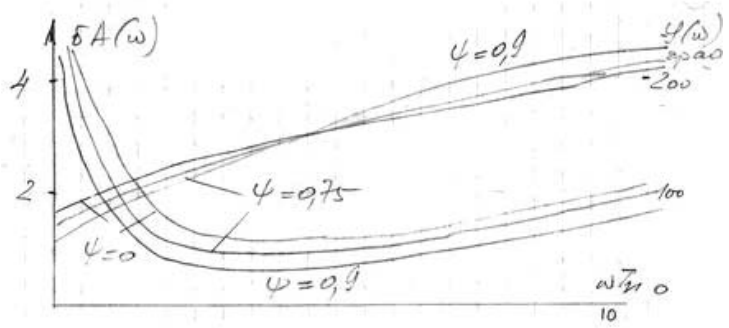


Рис. 5.3

Цель расчета – построить линии равного затухания и определить конкретные значения параметров настроек регулирующих устройств.

Как и при расчете области устойчивости, исходным условием является равенство $W(m, i\omega)_{об} W(m, i\omega)_{р} = 1$.

1. Дана расширенная АФЧХ объекта $W(m, i\omega)_{об} = A(m, i\omega)_{об} e^{-i\varphi(m, i\omega)_{об}}$, где $A(m, i\omega)_{об} = F_{об}(m, \omega, k_1, k_2, \ldots, T_1, T_2, \ldots, \tau)$, $\varphi(m, i\omega)_{об} = \Phi_{об}(m, \omega, k_1, k_2, \ldots, T_1, T_2, \ldots, \tau)$.

2. Дана расширенная АФЧХ регулятора $W(m, i\omega)_{р} = A(m, i\omega)_{р} e^{-i\varphi(m, i\omega)_{р}}$, где $A(m, i\omega)_{р} = F_{р}(m, \omega, C_0, C_1, C_2)$, $\varphi(m, i\omega)_{р} = \Phi_{р}(m, \omega, C_0, C_1, C_2)$.

3. Исходя из основного выражения $W(m, i\omega)_{об} W(m, i\omega)_{р} = 1$, можно записать $W(m, i\omega)_{р} = \dfrac{1}{W(m, i\omega)_{об}}$.

Правая часть называется инверсной расширенной АФЧХ. После подстановки значений $A(m, i\omega)_{р} e^{-i\varphi(m, i\omega)_{р}} = \dfrac{1}{A(m, i\omega)_{об}} e^{i\varphi(m, i\omega)_{об}}$.

Равенство двух комплексных чисел возможно при равенстве модулей векторов и отличии аргументов на $2\pi n$ (можно начать с $n = 0$), т.е. $A(m, i\omega)_{р} = \dfrac{1}{A(m, i\omega)_{об}}$, $\varphi(m, i\omega)_{р} = \varphi(m, i\omega)_{об}$.

Запишем выражение для объекта и регулятора через F и Φ, т.е.

$$F_{р}(m, \omega, C_0, C_1, C_2) = \frac{1}{F_{об}(m, \omega, k_1, k_2, \ldots, T_1, T_2, \ldots, \tau)},$$

$$\Phi_{р}(m, \omega, C_0, C_1, C_2) = \Phi_{об}(m, \omega, k_1, k_2, \ldots, T_1, T_2, \ldots, \tau).$$

4. Решают эту систему с двумя неизвестными, в качестве которых выбирают два параметра настроек регулятора C_0 и C_1.

$$C_0 = f_0(m, \omega, k_1, k_2, \ldots, T_1, T_2, \ldots, \tau, C_2),$$

$$C_1 = f_1(m, \omega, k_1, k_2, \ldots, T_1, T_2, \ldots, \tau, C_2).$$

5. Подставим в уравнения значения параметров объекта и степени колебательности $C_0 = F_1(\omega, C_2)$, $C_1 = F_2(\omega, C_2)$.

При ПИ-регуляторе $C_2 = 0$, при ПИД-регуляторе C_0 и C_1 определяются в зависимости от частоты для разных значений C_2.

6. Выбор частоты производят от нуля до частоты «среза» $\omega_{ср} = 0{,}1$ рад/с (если параметр $C_0 \geq 0$, если нет – выбирается частота, при которой $C_0 = 0$).

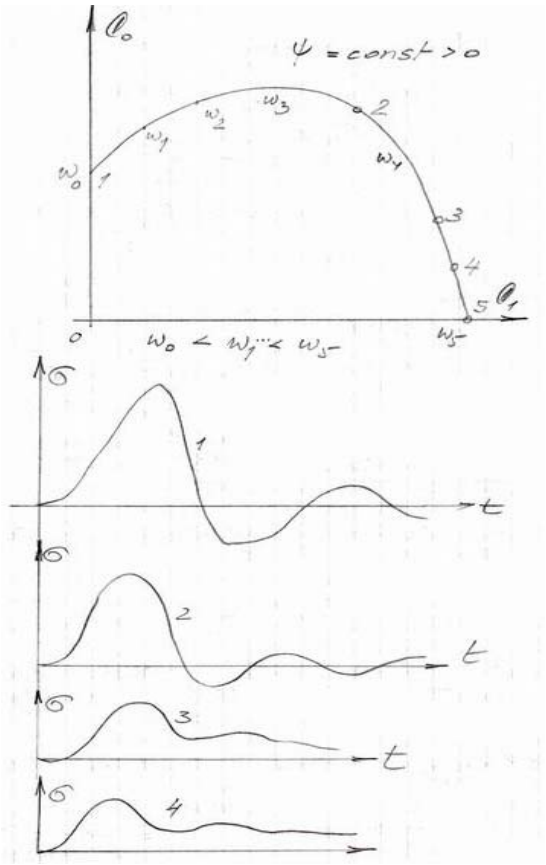


Рис. 5.4

7. В координатах C_0 и C_1 троят зависимость $C_0 = f(C_1)$.

При трех параметрах строят зависимости $C_0 = f(C_1)$ для различных C_2 (начиная с нуля).

При выбранном значении $m(\psi)$ получаем линию равных затуханий.

На рис. 5.4 показана полученная кривая как линия равной степени затухания $\psi = \text{const}$ процесса регулирования (при выбранном m и $C_2 = 0$). Пересечение кривой с осью C_1 ($C_0 = 0$) определяет параметр настройки П-регулятора. Пересечение кривой с осью C_0 ($C_1 = 0$) определяет параметр настройки И-регулятора. Полученные настройки регулятора подлежат экспериментальной проверке.

Значительная трудоемкость расчета оптимальных параметров настройки (ОПН) по расширенным АФЧХ, трудности определения частотных характеристик, невысокая точность полученных характеристик вынуждают искать менее точные, но более простые приближенные расчетные методы определения ОПН.

Приближенные методы ОПН используют формулы и номограммы. Этих методов очень много. Рассмотрим некоторые из них.

РАСЧЕТ ОПН ПО ФОРМУЛАМ ВТИ

Формулы ВТИ для определения параметров настроек были получены на моделях объектов и реальных регуляторов с присущими им нелинейностями типа люфт, зона нечувствительности, выбег регулирующего органа, с учетом времени сервомотора и т.д. (табл. 5.2).

1. Метод использует данные кривых разгона.

2. Степень колебательности $\psi = 0,75$.

3. Найденные настройки являются достаточно точными, если отношение τ / T_a однозначно характеризует форму кривой разгона.

4. По отношению τ / T_a можно провести приближенную оценку динамических свойств реальных объектов.

5. По отношению τ / T_a находят ОПН регуляторов, которые затем уточняются на реальном объекте регулирования.

Таблица 5.2

Приближенные формулы ВТИ

Объект регулятор		δ	$T_и$	$T_с$	$t_{выб} / t_{вкл}$
$\frac{\tau}{T_a} = 0...0,2$	П	$\varepsilon\tau$	–	$1...4\tau$	$< \frac{\Delta}{\delta t_{вкл}} - 1$
	ПИ	$1,1\ \varepsilon\tau$	$3,3\ \tau$	$1...4\tau$	$< 0,3$
	ПИД	$0,8\ \varepsilon\tau$	$2,5\ \tau$	$0,75...2\tau$	$< 0,3$
$0,2 < \frac{\tau}{T_a} < 1,5$	П	$2,6k\frac{\frac{\tau}{T_a} - 0,08}{\frac{\tau}{T_a} + 0,7}$	–	$1...4\tau$	$< \frac{\Delta}{\delta t_{вкл}} - 1$
	ПИ	$2,6k\frac{\frac{\tau}{T_a} - 0,08}{\frac{\tau}{T_a} + 0,6}$	$0,8T_a$	$1...4\tau$	$< 0,5$
	ПИД	$3,7k\frac{\frac{\tau}{T_a} - 0,13}{\frac{\tau}{T_a} + 1,5}$	$\frac{1,0}{\tau / T_a}\tau$	$0,75...1,5\tau$	$< 0,3$
$\frac{\tau}{T_a} > 1,5$	П	$2k$	–	$1...4\tau$	$< \frac{\Delta}{\delta t_{вкл}} - 1$
	ПИ	$2k$	$0,6\tau$	$1...4\tau$	$<0,5$
	ПИД	$1,7k$	$0,7\tau$	$0,75...2\tau$	$<0,3$

Время сервомотора (исполнительного механизма) $T_с$ может быть выбрано при условии учета динамики объекта регулирования.

Оптимальное значение $T_с$ равно:

- для П и ПИ-регуляторов $T_{с\,опт} \approx 2\tau$ с допуском $T_с \approx (1...4)\tau$;
- для ПИД-регуляторов $T_{с\,опт} \approx \tau$ с допуском $T_с \approx (0,75...2)\tau$.

На рис. 5.5 показана обработка экспериментальных кривых разгона.

$$k = \frac{\sigma_n}{\lambda_0}\left[\frac{\text{ед. рег. вел.}}{\text{ед. возм.}}\right],\ \frac{\tau}{T_a} = \frac{b}{\sigma_n},\ T_d = 0{,}15\,T_{\text{и}},\ \varepsilon = \frac{b}{\lambda_0 \tau}\left[\frac{\text{ед. рег. вел.}}{\text{ед. возм.} \cdot \text{сек}}\right].$$

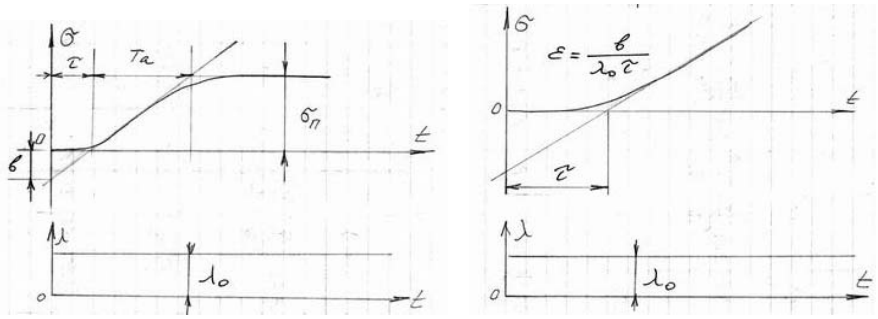


Рис. 5.5

Аналитические исследования Коэна и Куна в 1953 году проведены для колебательных переходных процессов. Кривые, полученные Коэном и Куном, дают эмпирические формулы определения ОПН регуляторов.

П-регулятор $k_{\text{об}} k_{\text{р}} = \dfrac{T_{\text{об}}}{\tau}$.

ПИ-регулятор $k_{\text{об}} k_{\text{р}} = 0{,}8\dfrac{T_{\text{об}}}{\tau}$, $\dfrac{T_{\text{и}}}{\tau} = 3$.

ПД- регулятор $k_{\text{об}} k_{\text{р}} = 1{,}2\dfrac{T_{\text{об}}}{\tau}$, $\dfrac{T_d}{\tau} = 0{,}25$.

ПИД-регулятор $k_{\text{об}} k_{\text{р}} = 1{,}2\dfrac{T_{\text{об}}}{\tau}$, $\dfrac{T_{\text{и}}}{\tau} = 2$, $\dfrac{T_0}{\tau} = 0{,}42$.

В работе Чина, Хронса и Ресвика на аналитических моделях для апериодического процесса и процесса с затуханием $\psi = 0{,}8$ получены следующие зависимости для двух видов возмущения – внешнего и внутреннего (от задатчика), которые сведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Приближенные формулы определения ОПН регуляторов

Регулятор	Апериодический процесс с кратчайшей продолжительностью		20 % перерегулирование с наименьшей продолжительностью	
	Задание	Возмущение	Слежение	Возмущение
П	$k_{об}k_р = 0,3\frac{T_{об}}{\tau}$	$k_{об}k_р = 0,3\frac{T_{об}}{\tau}$	$k_{об}k_р = 0,7\frac{T_{об}}{\tau}$	$k_{об}k_р = 0,7\frac{T_{об}}{\tau}$
ПИ	$k_{об}k_р = 0,35\frac{T_{об}}{\tau}$ $T_и = 1,2\tau$	$k_{об}k_р = 0,6\frac{T_{об}}{\tau}$ $T_и = 4\tau$	$k_{об}k_р = 0,6\frac{T_{об}}{\tau}$ $T_и = \tau$	$k_{об}k_р = 0,7\frac{T_{об}}{\tau}$ $T_и = 2,3\tau$
ПИД	$k_{об}k_р = 0,6\frac{T_{об}}{\tau}$ $T_и = \tau$ $T_0 = 0,5\tau$	$k_{об}k_р = 0,95\frac{T_{об}}{\tau}$ $T_и = 2,4\tau$ $T_0 = 0,42\tau$	$k_{об}k_р = 0,95\frac{T_{об}}{\tau}$ $T_и = 1,35\tau$ $T_0 = 0,47\tau$	$k_{об}k_р = 1,2\frac{T_{об}}{\tau}$ $T_и = 2\tau$ $T_0 = 0,42\tau$

В табл. 5.4 приведены формулы, используемые фирмой «Hartmann & Braun» (США) для объектов с самовыравниванием.

Таблица 5.4

Определение ОПН регуляторов для объектов с самовыравниванием

Регулятор	X_p	$T_и$	$T_о$
П	$1,2...1,4\frac{\tau}{T}k_{об}100\,\%$	–	–
ПИ	$1,25...1,4\frac{\tau}{T}k_{об}100\,\%$	$2,3...3,0\,\tau$	–
ПИД	$0,8...1,0\frac{\tau}{T}k_{об}100\,\%$	$2,0...2,4\,\tau$	$0,4...0,5\,\tau$

В этих формулах используются следующие обозначения:

$k_{об} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\lambda}$ – коэффициент усиления объекта;

τ – запаздывание;

$T_{об}$ – постоянная времени объекта.

В табл. 5.5 приведены формулы определения фирмы «Hartmann & Braun» для объектов без самовыравнивания.

Таблица 5.5

Определение ОПН регуляторов для объектов без самовыравнивания

Регулятор	X_p	$T_и$	$T_о$
П	$2\frac{\tau}{T_1}100\ \%$	–	–
ПИ	$2,4\frac{\tau}{T_1}100\ \%$	$5,8\ \tau$	–
ПИД	$2,5\frac{\tau}{T_1}100\ \%$	$3,2\ \tau$	$0,8\ \tau$

В этой таблице для объекта приняты следующие обозначения:

$\Delta y = \Delta\lambda$ – величина возмущения;

$\Delta x = \Delta\sigma$ – отклонение регулируемой величины за время t_0;

$T_1 = \frac{\Delta y}{\Delta x} t_0$.

РАСЧЕТ ОПН ПО НОМОГРАММАМ СИБТЕХЭНЕРГО

Используя методы моделирования и динамические характеристики реальных объектов регулирования, в наладочной организации «Сибтехэнерго» была построена номограмма для определения ОПН ПИ-регуляторов, для степени колебательности $\psi = 0,9$.

Порядок определения ОПН по номограмме Сибтехэнерго:

1) определяют параметры объекта τ, T, k;

2) находят отношение τ / T объекта и по графику рис. 5.6 находят комплексы $(k_р k)_{опт}$ и $(T_и / T)_{опт}$;

3) рассчитывают оптимальные параметры настройки ПИ-регулятора

$$k_р = \frac{(k_р k)_{опт}}{k},$$

$$T_и = T\left(T_и / T\right)_{опт}.$$

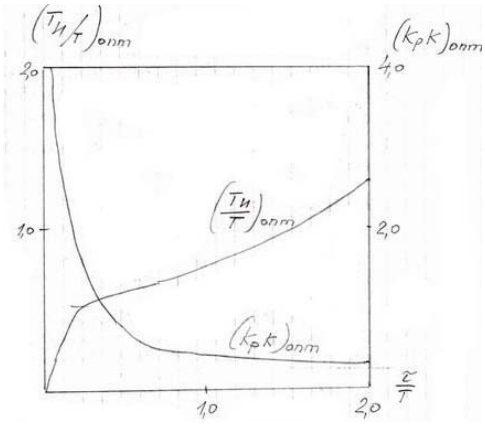


Рис. 5.6

Следует отметить, что практически все расчетные методы являются приближенными, и их результаты должны быть уточнены в процессе наладки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПН РЕГУЛЯТОРОВ

Достоинством экспериментальных методов является ненужность знания динамических характеристик объекта регулирования – отсутствуют затраты времени и сил на проведение испытаний и обработку результатов испытаний, могут быть сокращены затраты на систему измерений.

Оценка переходных процессов отдельных частных опытов производится визуально по показаниям измерительных приборов на выходе объекта регулирования. Вид переходного процесса может быть зафиксирован по указателю положения (УП) исполнительного механизма.

Однако для определения ОПН необходимо знать характер объекта регулирования (с самовыравниванием или без него), алгоритма поиска (последовательность шагов) и критериев оценки результатов шагов.

1. Метод Циглера–Никольса

В 1942 году Циглер и Никольс впервые предложили следующую последовательность настройки регуляторов.

Предполагаемый коэффициент затухания $\psi = 0,7...0,8$. Динамика объекта регулирования неизвестна.

Сначала настраивают регулятор как П-регулятор, увеличивая коэффициент усиления $k_{\text{р}}$ до достижения незатухающих колебаний, т.е. достижения границы устойчивости.

Фиксируют как критические период колебаний $T_{\text{кр}}$ и достигнутый коэффициент усиления $k_{\text{р кр}}$.

Определяют оптимальные настройки регуляторов:

П-регулятора $k_{\text{р опт}} = 0,5k_{\text{р кр}}$.

ПИ-регулятора $k_{\text{р опт}} = 0,45k_{\text{р кр}}$ и $T_{\text{и опт}} = 0,85T_{\text{кр}}$.

ПИД-регулятора соответствует $k_{\text{р опт}} = 0,6k_{\text{р кр}}$, $T_{\text{и опт}} = 0,5T_{\text{кр}}$ и $T_0 = 0,12T_{\text{кр}}$.

Предложенная Циглером и Никольсом методика дает хорошие осредненные результаты.

Недостаток – необходимость выведения системы на границу устойчивости, наличия системы регистрации.

Далеко не всякая АСР может быть выведена на границу устойчивости без риска нарушения технологического процесса.

В 1980–90-х годах на базе метода «раскачки» объекта до получения автоколебаний В.Ф. Кузищин, А.И. Зверьков, В.Я. Ротач разработали метод поиска ОПН. Этот метод включается в программное обеспечение современных отечественных микропроцессорных регуляторов типа «Ремиконт», в виде программы «Автоподстройщик».

2. Шаговый метод определения ОПН ПИ-регуляторов

В 1967 году А.Д. Нейман на основе анализа характеристик переходных процессов в области устойчивости многоемкостной автоматической системы регулирования с ПИ-регулятором предложил алго-

ритм поиска ОПН без выхода системы регулирования на границу устойчивости и без превращения регулятора в пропорциональный (для ряда конструкций регуляторов с исполнительным механизмом постоянной скорости затруднительно реализовать П-регулятор).

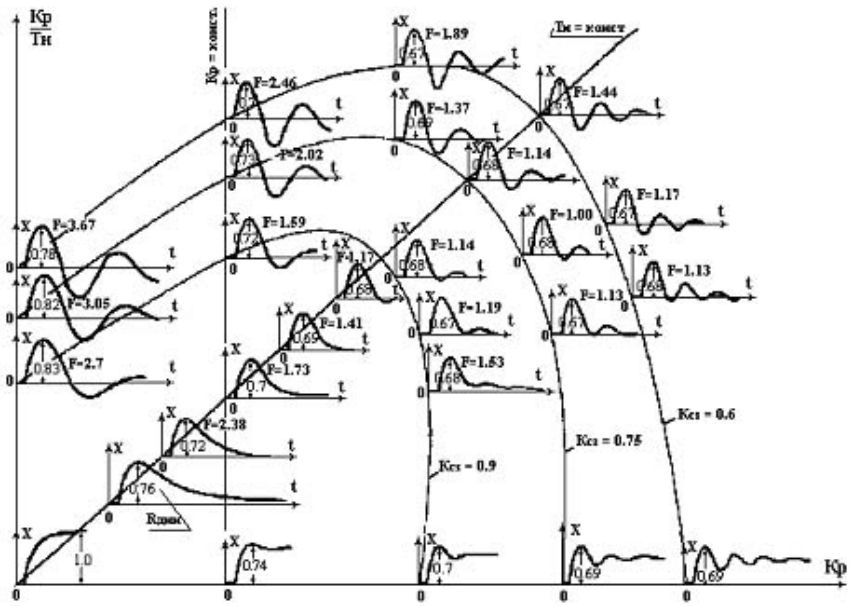


Рис. 5.7

На рис. 5.7 показаны граница устойчивости АСР с многоемкостным объектом регулирования и ПИ-регулятором ($\psi = 0$) и линии равного затухания $\psi = 0,6$, $\psi = 0,75$, $\psi = 0,9$.

На рис. 5.7 приведены переходные процессы вдоль линии равных времен интегрирования $T_{\text{и}} = \text{const}$ при изменении $k_{\text{р}}$, начиная с небольшого коэффициента $k_{\text{р}}$ в сторону увеличения его с индикацией динамической ошибки и площади под кривой переходного процесса.

Из рассмотрения графиков переходных процессов, следует, что переходный процесс изменяется от чисто апериодического к колебатель-

ному с уменьшением динамической ошибки от 1,0 до 0,67 и площади под кривой от $F = 2{,}38$ до $F = 1{,}14$, в районе $\psi = 0{,}6$ площадь снова начинает расти.

Рассмотрение переходных процессов при перемещении от оси ординат показывает, что для линии $\psi = 0{,}6$ (например) F меняется от 1,3 до 3,67. Характер колебательности вдоль линии равного затухания изменяется от высокочастотных (вблизи оси ординат) до низкочастотных (вблизи оси абсцисс).

Приняв за начальную точку плоскости области устойчивости с большим значением $T_{\text{и}}$, увеличивают коэффициент усиления регулятора $k_{\text{р}}$ и повторяют опыт с нанесением возмущений до получения вида переходного процесса, показанного на рис. 5.8 ($T_{\text{и}} = \text{const}$, $k_{\text{р}} = \text{var}$).

Нетрудно видеть, что полученный переходный процесс можно представить состоящим из двух составляющих: чисто апериодической и колебательной с симметричным затуханием относительно оси ординат.

На рис. 5.9 описанная выше процедура, состоящая из нескольких опытов, носит название первого шага.

Второй шаг представляет опыты при фиксированном коэффициенте усиления $k_{\text{р}} = \text{const} = k_{\text{р}i}$ с последовательным уменьшением времени интегрирования $T_{\text{и}}$ ($T_{\text{и}} = \text{var}$). Как видно из рис. 5.9, после ликвидации апериодической составляющей, переходный процесс не

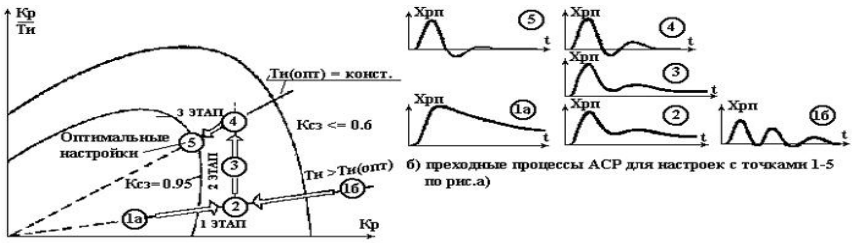


Рис. 5.8

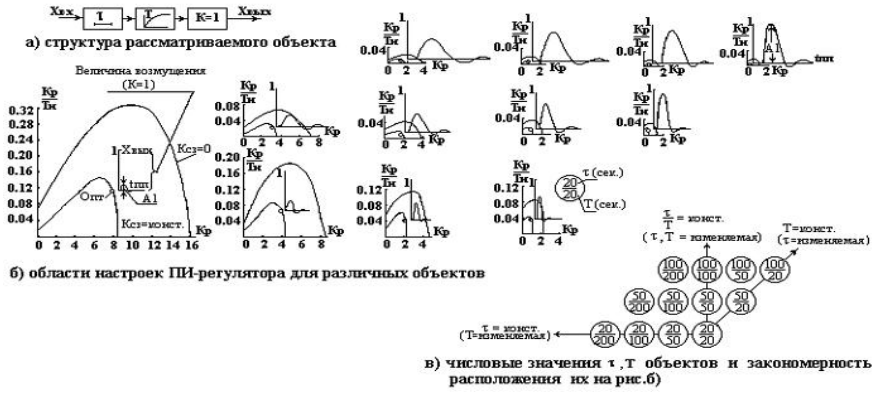


Рис. 5.9

является оптимальным, так как в процессе второго шага точка настройки приблизилась к линии равного затухания с меньшим значением ψ.

Для оптимизации переходного процесса следует реализовать третий шаг с опытами при $T_{\text{и}\,i} = \text{const}$ и с уменьшением коэффициента усиления регулятора $k_{\text{р}} = \text{var}$. Степень уменьшения $k_{\text{р}}$ должна быть плавной до достижения желаемого затухания ψ.

Описанная пошаговая процедура позволяет не только получить искомые ОПН ПИ-регулятора, но и корректировать ОПН по виду переходного процесса в ходе анализа ситуации в работающей АСР технологического процесса.

В табл. 5.6 приведены вербальные описания процедур поиска ОПН для различных законов регулирования, используемых специалистами фирмы «Hartmann & Braun».

В целом алгоритм поиска ОПН ПИ-регулятора совпадает с описанным выше.

Представляет особый интерес алгоритм поиска (или корректировки) ОПН ПИД-регулятора, так как, с одной стороны, этот наиболее совершенный из известных линейных законов регулирования находит все большее распространение, с другой стороны, апробированных методов настройки пока нет, и приведенный алгоритм тем более может быть полезен.

Таблица 5.6

Алгоритмы поиска ОПН

Регулятор	П	ПИ	ПИД
Начальная настройка	$k_р$ мал	$k_р$ мал, $T_и$ велико	$k_р$ мал, $T_и$ велико, $T_о$ мал
I шаг	Увеличивать $k_р$ до появления колебаний небольшой амплитуды около заданной величины	Увеличивать $k_р$ до появления колебаний небольшой амплитуды около заданной величины	Увеличивать $k_р$ ступенями до появления колебаний небольшой амплитуды около заданной величины
II шаг	Уменьшить $k_р$ до достижения желаемой устойчивости	Уменьшить $k_р$ до достижения желаемой устойчивости	Увеличить $T_о$ до исчезновения колебаний
III шаг	–	Уменьшить ступенями $T_и$ до исчезновения колебаний	Увеличить $k_р$ до появления колебаний и повторить шаги II и III для ликвидации колебаний
IV шаг	–	Увеличить $T_и$ до достижения желаемой устойчивости	Уменьшить $T_и$ и $k_р$ до достижения желаемой устойчивости
V шаг	–	–	Уменьшить $T_и$ до устранения колебаний. Затем увеличить $T_и$ до желаемой устойчивости

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ (ТЭО)

Основные рекомендации по использованию основных законов регулирования для ТЭО получены на основе практических результатов наладки регуляторов. Они приведены в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Выбор законов регулирования для теплоэнергетических технологических процессов

Регулируемая величина	Закон регулирования		
	П	ПИ	ПИД
Уровень	Применим, если τ мало	При высоких требованиях к качеству регулирования	Не используется (нет необходимости)
Расход	Не применим	Дает хорошие результаты	Не используется (нет необходимости)
Обороты	Обычно хорошо применим, если τ мало	Хорошо применим при высоких требованиях	Лучшие результаты по сравнению с ПИ-регулятором
Температура	Только для низких требований, если $\tau/T < 0{,}1$ или $\tau > 25$ мин	Хорошо применим	Лучшие результаты по сравнению с ПИ-регулятором
Давление	Только для низких требований	Хорошие результаты	Необходим только для трудно регулируемых объектов

В зависимости от динамических свойств объекта регулирования имеются практические рекомендации по степени и результатам регулируемости:

$\frac{\tau}{T} < \frac{1}{10}$ – хорошие результаты,

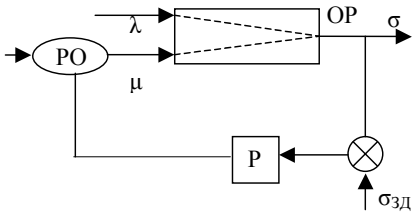
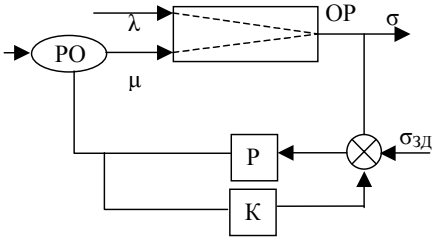
$\frac{\tau}{T} \approx \frac{1}{6}$ – достаточно хорошие результаты,

$\frac{\tau}{T} > \frac{1}{3}$ – трудно регулируемые.

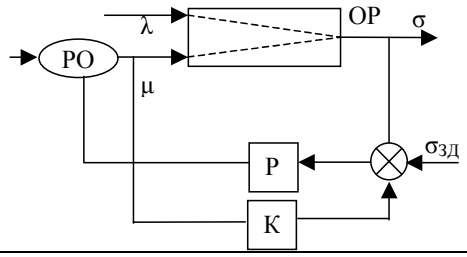
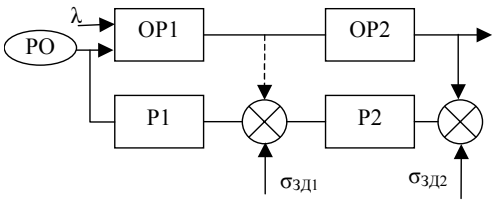
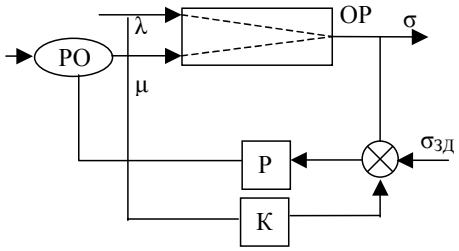
В табл. 5.8 приведены типовые структуры АСР теплоэнергетического оборудования.

Таблица 5.8

Типовые структуры АСР

Схема АСР	Параметры
1. Одноконтурная АСР 1.1. Стабилизирующая 	• разрежение в топке • температура воздуха на всосе ДВ • температура аэросмеси за ШБМ и МВ • разрежение перед мельницей • давление пара в деаэраторе • температура и давление за РОУ • давление пара на уплотнениях турбины • температура сетевой воды
2. Двухконтурная АСР 2.1. АСР с жесткой обратной связью 	• расход первичного воздуха на шахтных мельницах • уровней конденсата в конденсаторе, п.н.д, п.в.д. • уровня в деаэраторе, испарителях, подогревателях сетевой воды

Окончание табл. 5.8

Схема АСР	Параметры
2.2. АСР с сигналом обратной связи по параметру 	• уровень в барабане
2.3. С вводом сигнала из промежуточной точки объекта 	• через дифференциатор: $t^0_{\text{ПЕ}}$ и $t^0_{\text{ПП}}$ • через корректирующий регулятор O_2, NO_x
3. С вводом возмущения 	• по расходу пара в регуляторе питания • по расходу пара в регуляторе общего воздуха • по регулирующему параметру (через динамическую связь)

Примеры определения ОПН регуляторов.

Рассмотрим пример 1. При обработке записей испытаний объекта регулирования температуры получены следующие данные:

регулирующий орган открывается от 60 до 80 %, т.е. $\Delta y = 20\,\%$; температура при этом изменяется с 350 до 220 °С при диапазоне изменения 0...400 °С, т.е. $\Delta x = 40\,\%$;

время запаздывания $\tau = 15$ с;

постоянная времени объекта $T_{об} = 90$ с.

Очевидно, что $\frac{\tau}{T_{об}} = \frac{15}{90} = \frac{1}{6}$, а это свидетельствует о хорошей регулируемости объекта.

Коэффициент усиления объекта $k_{об} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{40}{20} = 2$.

Параметры настройки ПИД-регулятора определяются по формулам табл. 5.4.

Диапазон пропорциональности

$$X_p = (0,8 \div 1,0)\frac{\tau}{T} k_{об} \cdot 100\,\% = (0,8...1,0)\frac{15}{90} 2 \cdot 100\,\% = 26,7...33,3\,\%.$$

Время интегрирования $T_и = (2,0...2,4)\tau = (2,0...2,4) \cdot 15 = 30...36$ с.

Время опережения $T_о = (0,4...0,5)\tau = (0,4...0,5) \cdot 15 = 6...7,5$ с.

Рассмотрим п р и м е р 2. Из переходной характеристики объекта регулирования без самовыравнивания (например, бака запаса обессоленной воды) $\Delta y = 15\,\%$, $\Delta x = 60\,\%$, $\tau = 30$ с, $t_0 = 14$ мин $= 840$ с.

Определим ОПН ПИД-регулятора, который предполагается использовать в данной системе регулирования

$$T_1 = \frac{\Delta y}{\Delta x} t_0 = \frac{15}{60} 840 = 210 \text{ с}.$$

Область пропорциональности $X_p = 2,5\frac{\tau}{T_1} \cdot 100\,\% = 2,5\frac{30}{210} 100\,\% =$

$= 35,7\,\%$.

Время интегрирования $T_и = 3,2\tau = 3,2 \cdot 30 = 96$ с $\approx 1,6$ мин.

Время опережения $T_о = 0,8\tau = 0,8 \cdot 30 = 24$ с $= 0,4$ мин.

П р и м е р 3. Рассмотрим определение ОПН по методу Циглера–Никольса.

При регулировании уровня П-регулятором при уменьшении X_p получен критический период колебаний $T_{кр} = 2$ мин.

При оснащении АСР ПИД-регулятором необходимо определить его параметры настроек.

Область пропорциональности $X_p = 2,0 \cdot X_{p\,\text{кр}} = 2,0 \cdot 20\,\% = 40\,\%$.

Время интегрирования $T_\text{и} = 0,5 \cdot T_\text{кр} = 0,5 \cdot 2 \text{ мин} = 60 \text{ с} = 1 \text{ мин}$.

Время опережения $T_\text{о} = 0,12 \cdot T_\text{кр} = 0,12 \cdot 2 \text{ мин} = 0,24 \text{ мин} = 14,4 \text{ с}$.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПН РЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ АСР С МАЛОИНЕРЦИОННЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Рассматривавшиеся методы определения ОПН РУ одноконтурных АСР предполагали выполнение линейных законов регулирования. Реализация классических линейных законов регулирования, осуществленная ВТИ в конце 50-х годов, предполагала использование инерционной обратной связи (для реализации ПД-преобразования). ПД – преобразователь включается последовательно с интегрирующим сервомотором, представленным электрическим двигателем с постоянной скоростью (с редуктором). Постоянная времени сервомотора ограничена (для отечественных исполнительных механизмов минимальное время – 25 с.) При определенном значении постоянной времени объектов с самовыравниванием эта реализация достаточно точно представляла основной закон регулирования (пропорционально-интегрирующий). Однако для ряда объектов такой способ реализации не позволяет получить ПИ-закон. Эти объекты отличаются малой постоянной времени и малым отношением запаздывания и постоянной времени, их называют малоинерционными. На практике к ним относят объекты с самовыравниванием при $\tau/T < 0,2$ и $T < 10$ с. К таким объектам в теплоэнергетике относят топку при регулировании разрежения, общего воздуха, бак деаэратора при регулировании давления и др. Скорость изменения регулируемого параметра таких объектов достаточно велика. Для АСР с малоинерционными объектами не применимы методы определения ОПН РУ одноконтурных систем.

На практике используется метод определения ОПН РУ отработки возмущения задатчиком за одно включение импульсного регулятора с ПИ-законом регулирования. По этому методу используется возмуще-

ние задатчиком (ранее возмущения наносились регулирующим органом), поэтому следует оценить границы применения метода.

На рис. 6.1 показана структурная схема АСР, для которой можно определить передаточную функцию замкнутой системы при возмущениях регулирующим органом и задатчиком

$$W_{\text{зс}}^{\mu,\lambda} = \frac{\sigma_{\text{вых}}(p)}{\mu(p)} = \frac{W_0(p)}{1 + W_0(p)W_{\text{р}}(p)};$$

$$W_{\text{зс}}^{\sigma_{\text{зд}}}(p) = \frac{\sigma_{\text{вых}}(p)}{\sigma_{\text{зд}}(p)} = \frac{W_0(p)W_{\text{р}}(p)}{1 + W_0(p)W_{\text{р}}(p)};$$

Нетрудно видеть, что передаточные функции для этих возмущений имеют одинаковые знаменатели, но разные числители. Из теории автоматического регулирования известно, что знаменатель определяет устойчивость, а числитель – вид переходного процесса. Следовательно, чем меньше инерционность объекта (и время интегрирования регулятора), тем больше показатели переходных процессов.

Суть метода сводится к последовательному выполнению следующих процедур:

- определению коэффициента усиления;
- уточнению времени интегрирования.

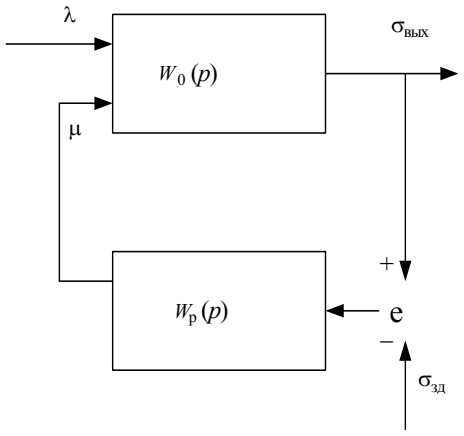


Рис. 6.1

Этим процедурам предшествует подготовительный этап, заключающийся в тарировке задатчика. Тарировка задатчика сводится к определению цены деления задатчика, чтобы при возмущении задатчиком априори знать новое значение $\sigma_{вых2}$, которое должен поддерживать регулятор. Значение $\sigma_{вых2}$ фиксируется по приборам КИП. Цена деления задатчика может быть определена в ходе статического расчета и затем проверена путем нанесения возмущения задатчиком при работе АСР в автоматическом режиме при настройке регулирующего устройства, неоптимальной, но обеспечивающей устойчивую работу системы. Можно рекомендовать установку малого коэффициента усиления и большого времени интегрирования (больше 3-4 значений постоянной времени объекта, определяемой по опыту или по $\sigma_{вых}$ при ручном управлении оператором).

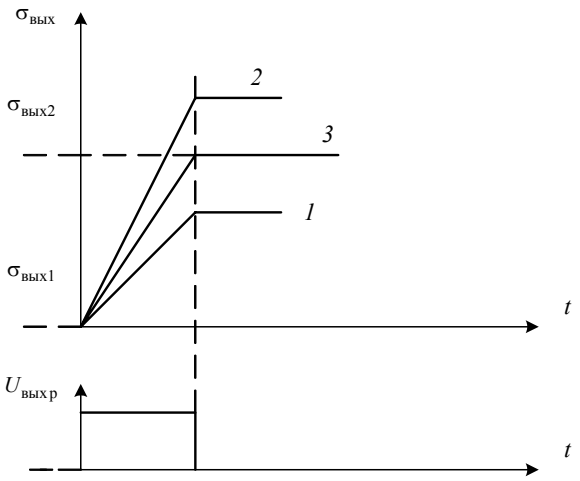
Эффективность действия задатчика может быть определена экспериментально, путем нанесения ряда возмущений задатчиком при работе АСР в автоматическом режиме работы. Настройка регулирующего устройства должна обеспечивать устойчивую работу системы.

При определении коэффициента усиления регулирующего устройства при работе АСР в автоматическом режиме (ключ режима работы АСР «авт.») наносится возмущение задатчиком, которое должно обеспечить конкретное новое значение $\sigma_{вых}$ (по прибору КИП). После первого включения регулятора ключ режима работы АСР переводится в положение «ручное» (дистанционное управление). Оценивается величина нового установившегося значения $\sigma_{вых}$. Оно может быть (рис. 6.2, *а*):

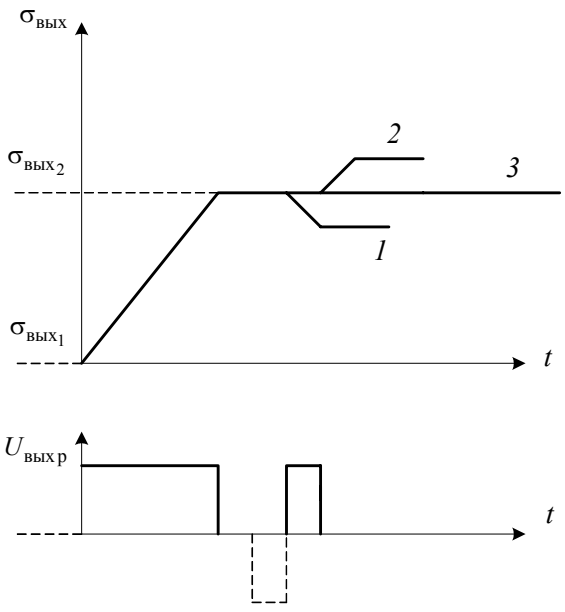
- меньше желаемого (по величине возмущения) $\sigma_{вых2}$;
- больше желаемого;
- равно $\sigma_{вых2}$.

В первом случае необходимо увеличить коэффициент усиления регулирующего устройства, во втором – уменьшить и повторить опыт с нанесением возмущения задатчиком. Эта процедура повторяется до получения значения $\sigma_{вых2}$ за одно включение.

После этого уточняется время интегрирования регулирующего устройства. Для этой цели при работе АСР в автоматическом режиме



а



б

Рис. 6.2

наносится возмущение задатчиком, но после первого включения регулятора ключ режима работы системы не переводится в режим «ручное». Дождавшись второго включения регулятора, оценивают направление этого второго включения.

Оно может быть (рис. 6.2, *б*):

- в противоположную;
- в ту же сторону, что и первое;
- отсутствовать.

В первом случае необходимо уменьшить установленное время интегрирования $T_и$, во втором – увеличить и повторять эксперименты с возмущением задатчиком до получения третьего варианта, принимаемого за оптимальный.

В заключение следует проверить работу АСР при других (не со стороны задатчика) возмущениях. Если отработка этих возмущений заканчивается за одно-два включения регулятора, определение параметров настройки считается законченным, а параметры $K_р$ и $T_и$ – оптимальными.

Описанным методом определения ОПН РУ АСР пользуются не только для одноконтурных систем регулирования (разрежение, общий воздух, давление в деаэраторе, за РОУ и др.), но и для внутренних контуров таких как АСР, питание барабанного котлоагрегата, уровня в ПНД и ПВД при использовании жесткой обратной связи и др.

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПН П-РЕГУЛЯТОРОВ

РЕАЛИЗАЦИЯ П-ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ

Разработанные ВТИ в 1950 году электронные регуляторы типа ЭР-54; 62 и т.д. представляли ПД-закон регулирования, который в сочетании с исполнительным механизмом постоянной скорости, представляющим интегральное звено, дает ПИ-закон регулирования.

В практике автоматизации теплоэнергетических объектов часто используют жесткие обратные связи по положению исполнительного

механизма. В этом случае эквивалентный регулятор имеет следующую передаточную функцию:

$$W_{\text{экв}}(p)=\frac{W_{\text{ПИ}}(p)\cdot W(p)}{1+W_{\text{ПИ}}(p)\cdot W_{\text{ИМ}}(p)\cdot W_{\text{ЖОС}}(p)}\cong\frac{1}{W_{\text{ЖОС}}}=K_{\text{р}}$$

при $K_{\text{ПИ}}\cdot K_{\text{ИМ}} >> 1$.

Жесткая обратная связь характеризуется отсутствием каких-либо временных зависимостей и некоторым коэффициентом усиления, который может быть больше или меньше 1. Это означает, что эквивалентный регулятор является пропорциональным регулятором со всеми его достоинствами и недостатками: большой областью устойчивости и наличием статизма выходного параметра объекта регулирования, который зависит от коэффициента усиления объекта и регулятора.

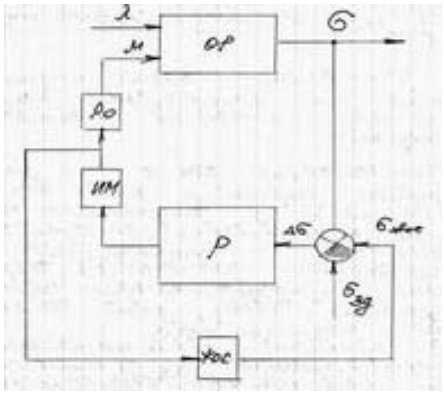


Рис. 7.1

Многие АСР турбоустановки построены с использованием жесткой обратной связи (ЖОС) по положению выходного вала исполнительного механизма (рис. 7.1): регулирование уровня в подогревателях высокого и низкого давления, деаэраторе, конденсаторе. Это предопределяет требования к точности поддержания параметра с учетом статизма: ±150; ±200 мм в. ст.

С внедрением унифицированного сигнала системы ГСП (0...5, 0(4)÷20 mA, 0...10 В) сигнал ЖОС также стал представляться в этих единицах, что потребовало использования датчика токового сигнала (например, БСПТ – бесконтактный сигнализатор положения токовый) для удобства сравнения сигналов на входе регулятора.

ПРОЦЕСС РЕГУЛИРОВАНИЯ В АСР С ЖОС

Рассмотрим работу АСР на примере бака (рис. 7.2). Регулирование уровня жидкости в баке производится изменением поступления жидкости в бак (на «притоке»).

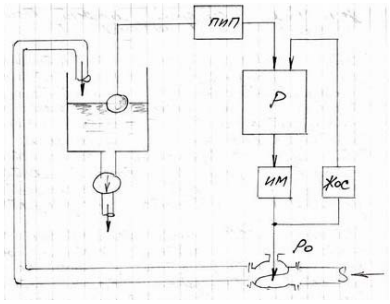


Рис. 7.2

В момент t_0 резкого уменьшения потребления воды из бака уровень повышается (рис. 7.3), возникает небаланс сигналов от датчиков уровня и задания в узле сравнения. Вырабатываемый под действием небаланса выходной сигнал регулятора перемещает регулирующий орган с постоянной скоростью, уменьшая поступление воды в бак. Одновременно с перемещением регулирующего органа вследствие поворота выходного вала изменяется сигнал датчика ЖОС. В момент времени t_1 сигнал ЖОС уравновешивает небаланс сигналов датчика по уровню и задатчика, ИМ выключается и движение регулирующего органа прекращается. Но так как в момент t_1 поступление воды в бак меньше

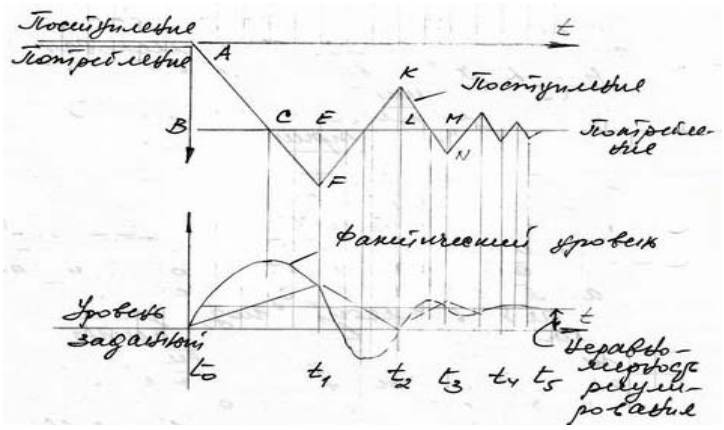


Рис. 7.3

потребления («стока»), уровень в баке будет понижаться. Вновь возникает небаланс сигналов датчика и задатчика, но противоположного знака. Это приводит к перемещению регулирующего органа в обратном направлении от включения электродвигателя исполнительного механизма. Одновременно сигнал ЖОС уменьшает небаланс сигналов датчика и задатчика. В момент t_2 сигналы уравновешиваются и регулятор временно выключается. Затем процесс повторяется, но постепенно затухает, что видно из сравнения площадей треугольников *ABC* и *CEF*. Площадь треугольника *ABC* больше площади треугольника *CEF*, и, следовательно, *AB* больше *EF*. Аналогично рассуждая, легко показать, что $EF > KL > MN$ и т.д.

Из рис. 7.3 можно легко выяснить природу статической ошибки. Из рисунка видно, что в результате затухающего переходного процесса регулирования фактическое значение уровня возвращается не к заданному, а к новому, несколько отличному значению. Действительно, после окончания переходного процесса поступление воды в бак уменьшалось до нового значения потребления воды. Иначе говоря, объект (бак) несет новую нагрузку. Но меньшему поступлению воды в бак соответствует меньшее открытие регулирующего органа, и это определяет и меньший сигнал ЖОС: следовательно, каждому положению регулирующего органа соответствует вполне определенный сигнал ЖОС. Но чтобы автоматическая система регулирования была в положении равновесия, необходимо, чтобы разность сигналов, пропорциональных отклонению регулируемой величины и положению регулирующего органа, была равна нулю (с учетом сигнала задатчика). Так как сигнал задатчика не изменялся, то равенство нулю возможно, если новому значению регулируемого параметра (новому сигналу от датчика уровня), большему прежнего значения на какую-то величину, будет соответствовать сигнал ЖОС больший прежнего.

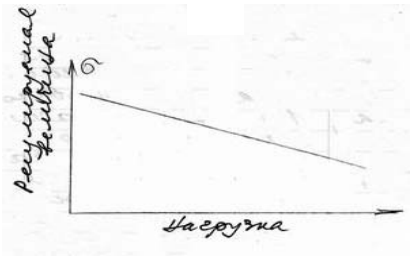


Рис 7.4

Из рис. 7.4 очевидно, что каждому значению нагрузки объекта («стока» из бака) будет соответ-

ствовать вполне определенное положение уровня – значения регулируемой величины. На рис. 7.4 показана статическая характеристика при регулировании с жесткой обратной связью, представляющая собой зависимость значения регулируемой величины от нагрузки объекта.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПН П-РЕГУЛЯТОРА

Определим настройки ПИ-регулятора для объекта без самовыравнивания, т.е. представляющего комбинацию интегрирующего звена и звена чистого запаздывания.

На рис. 7.5 показана область устойчивости для объекта без самовыравнивания и АСР с ПИ-регулятором.

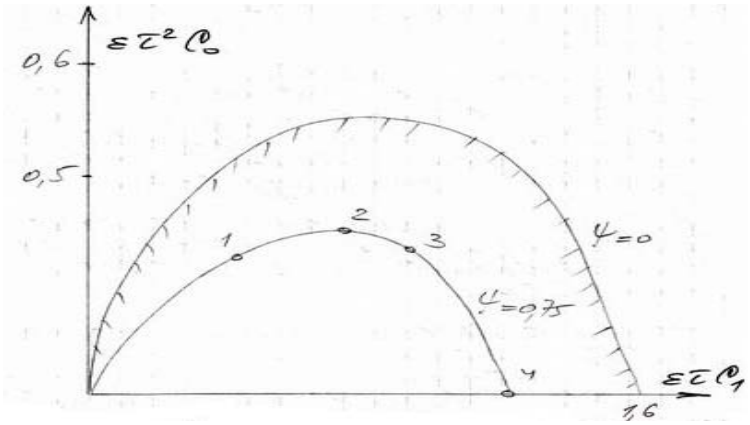


Рис. 7.5

Рассматривая точки пересечения линий равного затухания с осью абсцисс (т.е. $\varepsilon\tau^2 C_0 = 0$), можно видеть, что каждой степени затухания соответствует конкретное значение $\varepsilon\tau C_1$.

Если отразить это на графике (рис. 7.6) в виде зависимости коэффициента обратной связи от степени колебательности для объекта без самовыравнивания, можно видеть, что для получения большей степени затухания надо увеличить коэффициент обратной связи, т.е.

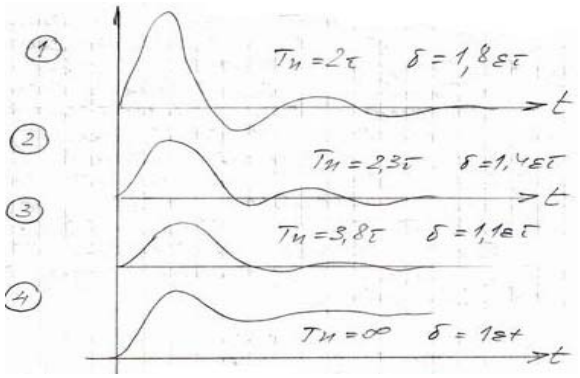


Рис. 7.6

уменьшить $K_р$ П-регулятора. Но чем выше степень затухания, тем больше остаточная неравномерность

$$\sigma_{ос} = \frac{\delta\lambda_0}{1+\frac{\delta}{k}},$$

где k – коэффициент усиления объекта.

На рис. 7.7 приведена зависимость $\delta/\varepsilon\tau$ от τ/T_a для П-регулятора.

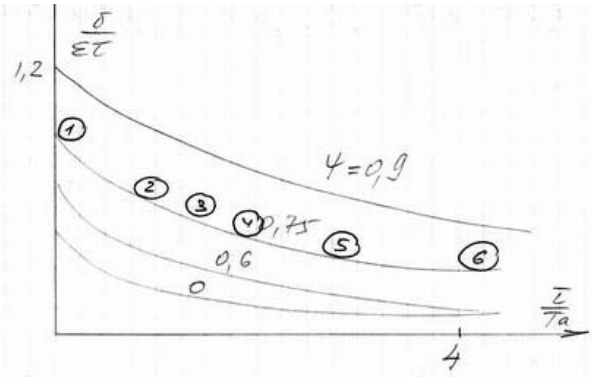


Рис. 7.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПН П-РЕГУЛЯТОРА

Динамическая настройка П-регулятора при реализации его с помощью жесткой обратной связи включает:

- расчет коэффициентов масштабирования по сигналам датчика регулируемой величины и датчика обратной связи (реализация коэффициента усиления П-регулятора);
- проверка и настройка внутреннего контура АСР;
- проверка работы П-регулятора на действующем оборудовании.

Расчет масштабирования ведется из уравнения равенства сигналов от датчиков регулируемой величины (после устранения пульсаций) и жесткой обратной связи.

$$\alpha_{ос}\Delta H_{уп}\cdot \gamma_{д}^{ЖОС} = \alpha_{д}\cdot\Delta\sigma_{р}\gamma_{д},$$

где $\alpha_{ос}$, $\alpha_{д}$ – коэффициенты масштабирования по сигналу датчика обратной связи и датчика регулируемой величины;

$\Delta H_{уп}$ – заданный диапазон перемещения регулирующего органа (обычно 100 % УП) во время работы П-регулятора;

$\gamma_{д}^{ЖОС}$ – крутизна характеристики датчика ЖОС;

$\Delta\sigma_{р}$ – заданный (рабочий) диапазон изменения регулируемого параметра при работе П-регулятора (заданный статизм);

$\gamma_{д}$ – крутизна характеристики коэффициента усиления датчика регулируемой величины.

Коэффициент усиления П-регулятора определяется по формуле:

$$K_{р}^{п} = \frac{\Delta H_{уп}}{\Delta\sigma_{р}}.$$

Настройку внутреннего контура и проверку коэффициента усиления удобнее проводить на неработающем оборудовании.

Настройка внутреннего контура производится по методу «отработки за одно включение». При появлении автоколебаний в конце переходного процесса следует уменьшить коэффициент усиления ПИ-регулятора и/или увеличить зону нечувствительности.

8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПН РЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ КАСКАДНЫХ АСР

Если объект подвергается большим по величине воздействиям по каналам, эквивалентным регулирующему воздействию (со стороны регулирующего органа), и имеется возможность стабилизировать некоторую промежуточную регулируемую величину, весьма эффективным с точки зрения стабилизации выходной регулируемой величины является использование каскадных схем регулирования.

Под каскадной системой автоматического регулирования понимают систему, состоящую из двух или более контуров, включающих объект регулирования и регулирующее устройство. Эти контуры включены последовательно, причем инерционность объекта предвключенного контура, как правило, меньше инерционности объекта второго контура. Чаще всего объект первого контура является частью всего регулируемого участка технологического процесса. На рис. 8.1 показаны два варианта регулирования давления пара за котлом с помощью одноконтурной и двухконтурной АСР.

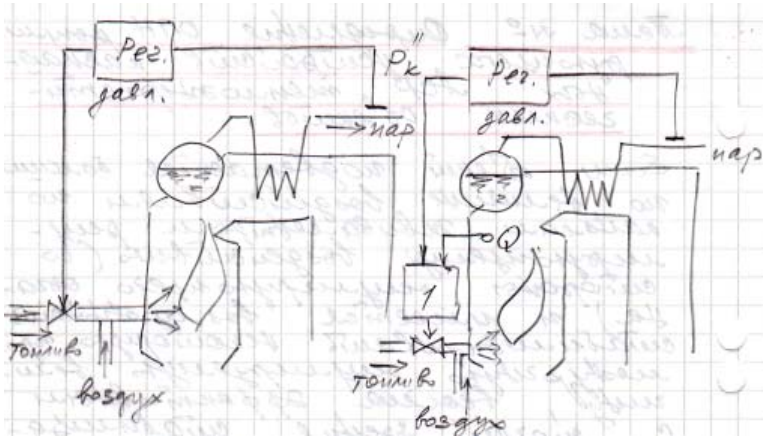


Рис. 8.1

На рис. 8.2 приведена структурная схема каскадной АСР, в которой регулятор, контролирующий основную регулирующую величину σ (давление пара за котлом), воздействует на регулятор, контролирующий вспомогательную, промежуточную регулируемую величину σ′.

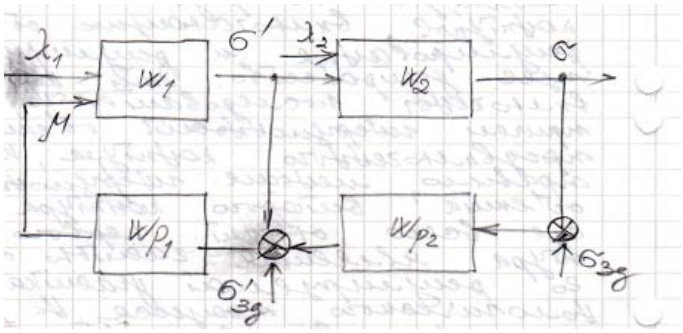


Рис. 8.2

Сигналы от основного регулятора Р2 суммируются с сигналами по промежуточной регулируемой величине и ее заданием (тепловыделение в топке и задание).

Причиной создания каскадной схемы в рассматриваемом случае является нестабильная работа топливоподающих устройств или часто и резко изменяющееся качества топлива. Значение тепловыделения в топке в каждый момент времени определяется основным регулятором (Р2) давления пара. При возникновении возмущения со стороны подачи топлива тепловыделение в топке восстанавливается значительно быстрее (из-за разницы инерционности участков регулирования), чем если бы реакция АСР была бы на изменение давления пара за котлом в результате изменения тепловыделения в топке.

В результате работы первого контура регулирования достигается хорошая стабилизация топочного процесса и практически отсутствует влияние этого типа возмущений (со стороны топлива) на выходную величину – давление за котлом. Эту стабилизацию обеспечивает в рассматриваемой АСР регулятор Р1, который часто называют стабилизирующим регулятором (или коротко – стабилизатором). Возможно из-

менение заданного значения давления пара за котлом (основной регулируемой величины) под воздействием других возмущений, идущих по другим каналам в объект регулирования. Это изменение воспринимается регулятором Р2, который изменяет («корректирует») в нужную сторону (ликвидации отклонения давления пара) изменение тепловосприятия в топке, поэтому регулятор Р2 часто называют корректирующим (или коротко – корректором).

Естественно, рассмотренная АСР стабилизации давления пара за котлом весьма упрощена, но она позволяет определить суть каскадных систем регулирования.

Рассмотрим примеры использования каскадных АСР в теплоэнергетике. На рис. 8.3 показана структурная схема каскадной АСР со стабилизирующим контуром промежуточной величины (или иногда говорят – с контуром нижнего уровня).

Такие системы применяют для регулирования:

- подачи расхода топлива барабанных и прямоточных котлов;
- мощности энергоблоков с газомазутными котлами;
- температуры свежего пара и пара промперегрева;
- производительности ПЭН;
- подачи топлива и воздуха при ступенчатом сжатии топлива для ограничения вредных выбросов;
- давления общей паровой магистрали на ТЭС с поперечными связями.

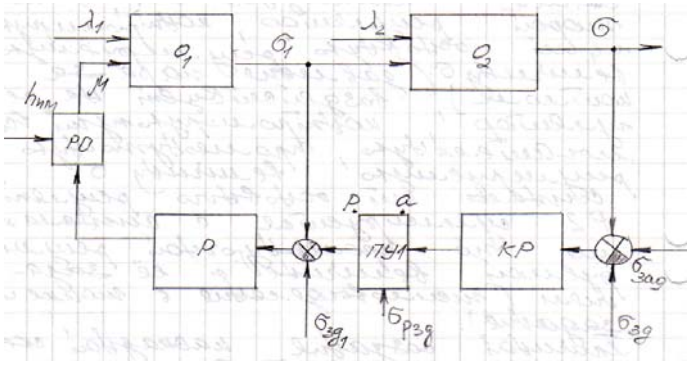


Рис. 8.3

Нетрудно видеть, что АСР со скоростным сигналом из промежуточной топки объекта может быть приведена к рассматриваемой каскадной АСР с помощью эквивалентных регуляторов. Следует учесть, что корректирующий регулятор в этой системе ограничивается ПИ-законом регулирования.

На рис. 8.4 приведена структурная схема каскадной АСР со следящей системой нижнего уровня.

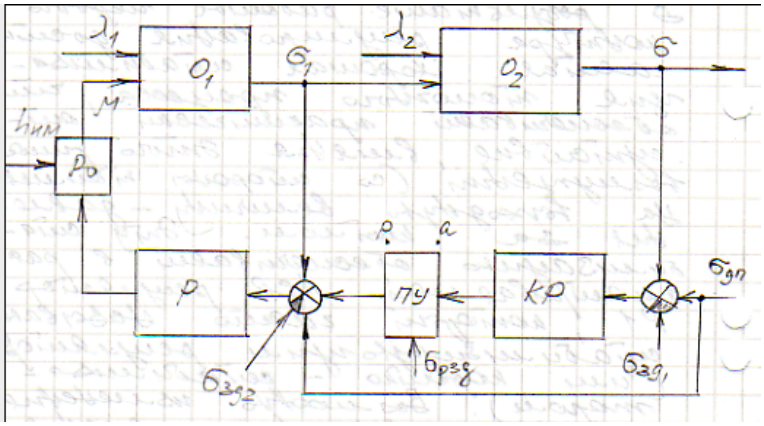


Рис. 8.4

По такой системе строятся АСР:

- экономичности процесса горения на ТЭС с поперечными связями и некоторых энергоблоков (регулятор общего воздуха с коррекцией по содержанию кислорода в уходящих дымовых газах);
- питания прямоточного котла (схема ВТИ);
- ограничения вредных выбросов.

На рис. 8.5 приведена схема каскадной АСР с устройством умножения. По этой схеме строятся АСР:

- экономичности процесса горения (с коррекцией по содержанию O_2 в уходящих газах);
- питания прямоточного котла;
- ограничения вредных выбросов (с коррекцией расхода воздуха и топлива по содержанию окислов азота NO_x и монооксида углерода CO).

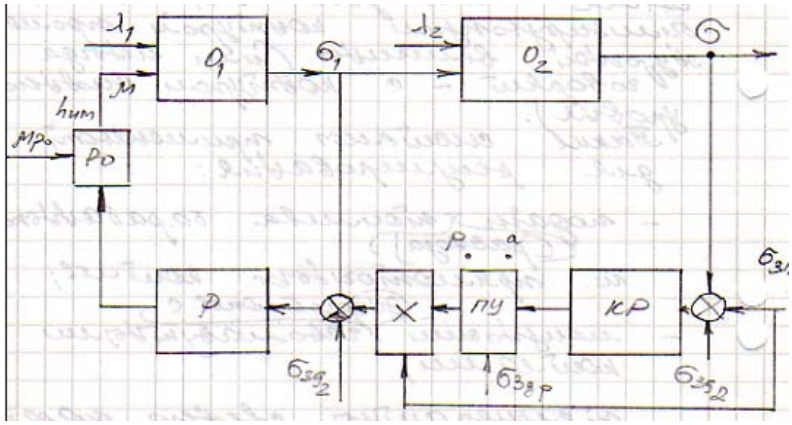


Рис. 8.5

На рис. 8.6 показана схема каскадной АСР с двумя корректирующими регуляторами, по которой организуется регулирование мощности энергоблоков с прямоточными пылеугольными котлами (с помощью котельной автоматики).

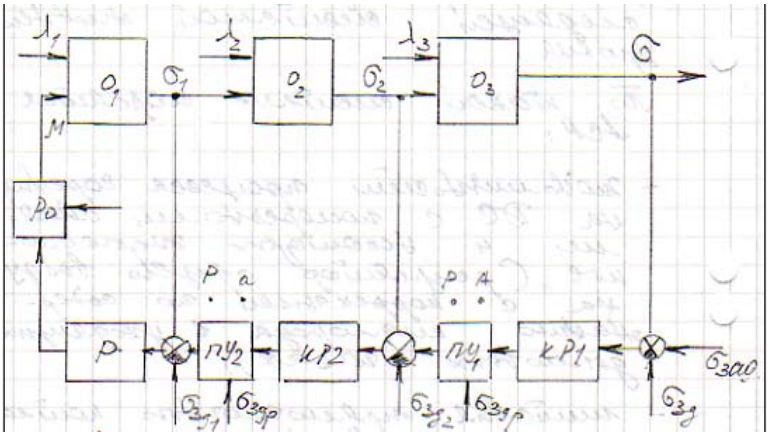


Рис. 8.6

На приведенных на рис. 8.3–8.6 схемах каскадных АСР:

- РО – регулирующий орган;
- Р – регулятор парового контура;
- КР – корректирующий регулятор (КР1, КР2 – первый и второй корректоры);
- ПУ – переключатель управления (ПУ1, ПУ2 – первый и второй переключатели);
- х – устройство умножения;
- σ – регулируемая величина (основная), $\sigma_{1,2}$ – вспомогательная;
- μ – регулирующее воздействие;
- λ – возмущающее воздействие;
- $\sigma_{зд}$ – заданное значение регулируемой величины;
- $\sigma_{зад}$ – задающий параметр;
- $h_{ИМ}$ – положение исполнительного механизма;

Индексы «а» и «р» – означают режим задания («а» – автоматический и «р» – ручной) управления: первый – от корректирующего регулятора, второй – от задатчика ручного управления.

Регулирующие устройства в каскадных АСР в каждом контуре имеют различные законы: П, ПИ, ПИД в зависимости от инерционности объектов регулирования.

Следует отметить, что, как правило, нижний контур (или первый) имеет пропорционально-интегральный закон регулирования и импульсный выход для обеспечения воздействия на электрический исполнительный механизм постоянной скорости.

Возможность применения во втором и более высоком контуре более совершенного закона регулирования позволяет применять каскадное регулирование для участков регулирования с неблагоприятными динамическими характеристиками. В высоких по номеру контурах могут использоваться регулирующие устройства с аналоговым и импульсным выходами.

Использование информации об изменении состояния объекта в промежуточных точках может повысить качество регулирования с точки зрения точности выходного параметра объекта регулирования в целом путем использования, например, динамической модели объекта, позволяющей прогнозировать поведение выходной величины.

В общем случае задача определения параметров настройки каскадных АСР является более сложной, так как надлежит найти четыре параметра настройки двух ПИ-регуляторов. Можно решить задачу просто и надежно лишь в простейших случаях, более сложные варианты могут быть решены только с использованием вычислительных устройств и моделирования.

Обычно задача решается в предположении о возможности расчета одного контура в независимости от другого (других).

После определения ОПН-регулятора этого контура переходят к расчету следующего контура, используя как часть его уже настроенный контур.

Отметим два наиболее часто встречающихся случая:

- в процессе регулирования возможно отключение корректирующего регулятора, в работе остается только стабилизирующий регулятор. Сначала настраивают стабилизаторы, затем легко настраивается корректирующий регулятор. Примером такого варианта является АСР поддержания давления в магистрали путем воздействия на тепловыделение отдельных котлов регуляторами тепловой нагрузки. Иногда можно и нужно перевести часть котлов в базовый режим, что позволяет настроить РТН этих котлов. Затем воздействие ГР эквивалентно воздействию задатчика;
- инерционность контура стабилизирующего регулятора значительно меньше инерционности контура корректирующего регулятора. Это позволяет погасить колебательный переходный процесс до влияния его на инерционный, что позволяет производить раздельную настройку регуляторов контуров.

Случай 1

1. По АФХ объекта $W_1(iw)$ настраивают стабилизирующий регулятор, находя его ОПН. Корректирующий регулятор считается отключенным.

2. Определим АФХ эквивалентного регулируемого объекта корректирующего регулятора

$$W_{\text{об э2}}(S) = \frac{W_{\text{об1}}(S)W_{\text{об1}}(S)W_{\text{р}_1}(S)}{1 + W_{\text{об1}}(S)W_{\text{р}_1}(S)},$$

если упростить последнюю формулу, используя

$$W_{p_1}(S) = K_{p_1} W'_{p_1}(S);$$

$$W_{\text{об э2}}(S) = \frac{W_{\text{об}}(S) W'_{\text{р1}}(S)}{\frac{1}{K_{\text{р1}}} + W_{\text{об1}}(S) W'_{\text{р1}}(S)}.$$

сначала строят $W_{\text{об}}(S)W'_{\text{р1}}(S)$ и $W_{\text{об1}}(iw)W'_{\text{р1}}(iw)$ по заданным $W_{\text{об}}(S)$ и $W_{\text{об1}}(S)$, а затем определяют векторы АФХ $W_{\text{об э2}}(iw)$, как частное от деления векторов АФХ $W_{\text{об}}(iw)W'_{\text{р1}}(iw)$ на векторы, проведенные для тех же частот к характеристике $W_{\text{об1}}(iw)W'_{\text{р1}}(iw)$ из точки, расположенной на отрицательной вещественной оси на расстоянии $\frac{1}{K_{\text{р1}}}$ оси начала координат. Характеристика $W_{\text{об1}}(iw)W'_{\text{р1}}(iw)$ была получена при определении ОПН стабилизирующего регулятора. После построения АФХ эквивалентного регулируемого объекта $W_{\text{об э2}}(iw)$ определение ОПН регулятора второго контура производится обычным путем.

Случай 2

Для случая совершенно различной инерционности объектов передаточная функция эквивалентного регулируемого участка $W_{\text{об э2}}(S)$ для регулятора КР может быть найдена следующим образом:

$$W_{\text{об э2}}(S) \cong \frac{W_{\text{об}}(S)}{W_{\text{об1}}(S)}.$$

Находят ОПН КР по $W_{\text{об э2}}(S)$, затем находят ОПН Р по передаточной функции эквивалентного регулируемого объекта $W_{\text{об э2}}(S) = W_{\text{об1}}(S) + W_{\text{об1}}(S)W_{\text{об2}}(S)W_{\text{р2}}(S)$.

Но чаще всего на практике удается определить переходные характеристики объектов регулирования контуров, по которым можно определить ОПН Р и КР, используя либо АФХ, полученные путем из переходных характеристик известными методами, либо используя приближенные методы. В качестве примера рассмотрим определение оптимальных параметров настроек регулирующих устройств АСР рас-

хода топлива на барабанных и прямоточных котлах с использованием сигнала по «теплу» в качестве регулируемого параметра σ_1.

Рассмотрим последовательность определения ОПН стабилизирующего регулятора.

1. Статическая настройка Р.
2. Настройка сигнала по «теплу».
3. Определение ОПН.

Сигнал по «теплу» был создан для оценки тепловыделения в топке при сжигании пылеугольного топлива, когда возможны колебания расхода его и теплотворной способности в достаточно широких пределах. При сжигании газа и мазута, теплотворная способность которых довольно стабильна, достаточно измерять расход топлива с помощью обычных (для газа) или специальных (для мазута) сжижающих устройств. При сжигании твердого топлива само измерение расхода сжигаемой пыли представляет сложную техническую задачу. Качество угля может колебаться в широких пределах, например, на Беловской ГРЭС сжигается уголь от 18 ближайших шахт, а колебание теплотворной способности возможно до 20...30 %.

Для формирования сигнала по «теплу» (предложенному З.Я. Бейрахом, В.М. Добкиным и др. в 1939 г.) используются сигналы по расходу пара и скорости изменения давления в характерной точке пароводяного тракта. Для барабанных котлов используют давление в барабане, а для прямоточных – в точке непосредственно за испарительной зоной (чаще за средней радиационной частью, СРУ).

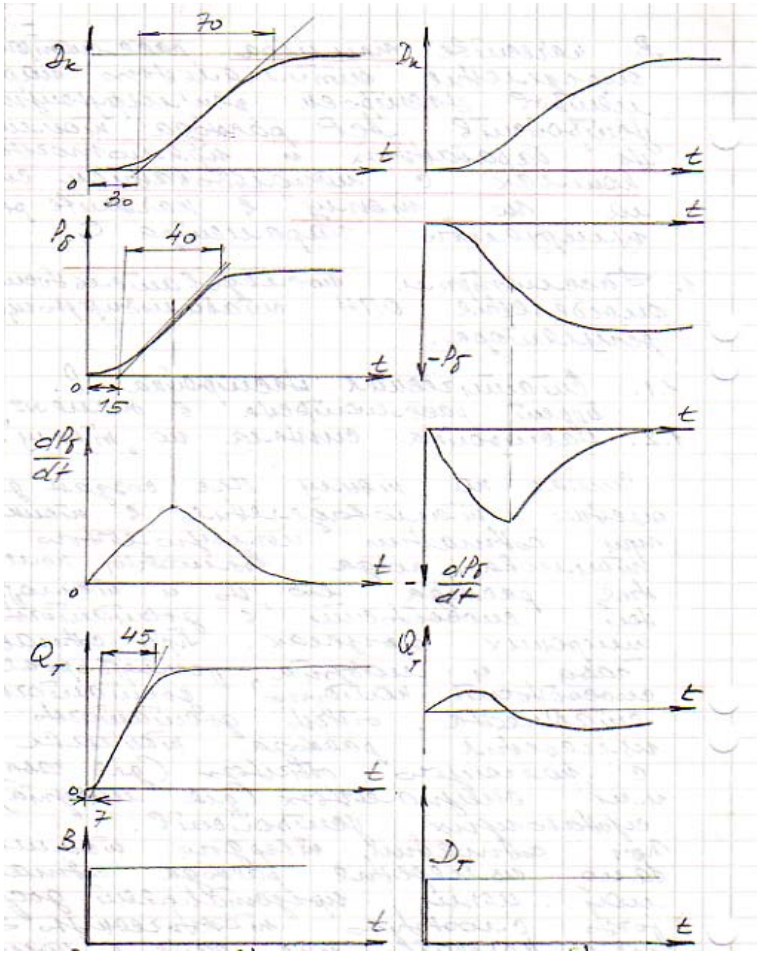
Сигнал по скорости изменения давления получают с помощью дифференцирующего устройства. Сигнал по теплу можно представить в виде выражения

$$Q = D_{\text{к}} \pm C_{\text{к}} \frac{dP}{dt},$$

где Q – количество тепла (условное); $D_{\text{к}}$ – расход пара котла; P – давление в характерной точке; $C_{\text{к}}$ – эмпирический коэффициент подбора параметров настройки дифференцирующего устройства данного котла.

Сигнал по «теплу» в установившемся стационарном режиме равен расходу пара.

В переменных режимах составляющие сигнала по «теплу» складываются (при внутренних возмущениях) или вычитаются (при внешних возмущениях) (рис. 87, *а*, *б*).



а *б*

Рис. 8.7

На рис. 8.7 с указанием динамических характеристик (запаздывание, постоянная времени) показаны изменения расхода пара и давление в барабане при внутреннем и внешнем возмущении. Из графиков очевидно, что результирующая характеристика имеет более благоприятную для автоматизации характеристику при внутреннем возмущении, а при внешнем – близкую к нулю (рис. 8.7, *а*, *б*). Полной компенсации, инвариантности к внешнему возмущению с помощью дифференцирующего устройства добиться трудно. Можно уменьшить эффект недокомпенсации с помощью зоны нечувствительности регулирующего устройства.

Сущность настройки дифференцирующего устройства при внешнем возмущении заключается в выборе коэффициента усиления $K_д$ и времени дифференцирования таким образом, чтобы сумма сигналов по расходу пара и скорости изменения давления была минимальной (близкой к нулю).

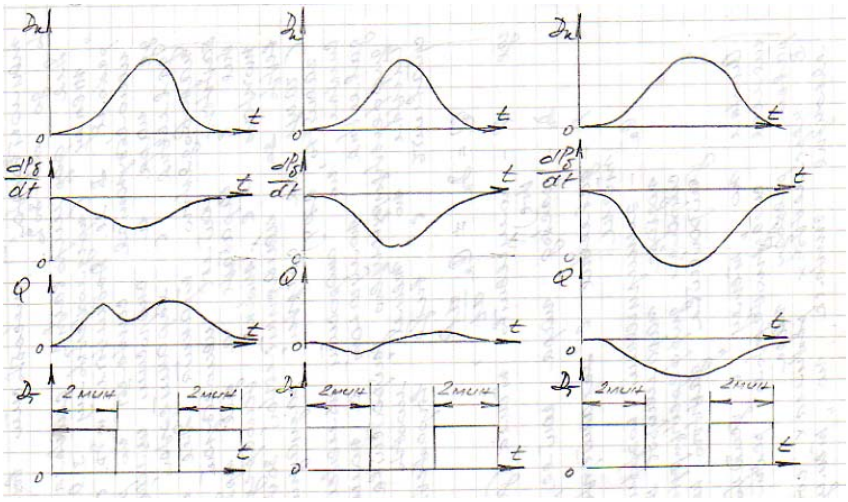
При настройке на испытываемом котле необходимо свести к минимуму внутренние возмущения: по топливу (расходу и качеству), по температуре питательной воды, тягодутьевому режиму, непрерывной продувке.

Внешние возмущения целесообразно наносить с максимально возможной скоростью изменением расхода пара на турбогенератор, БРОУ, РОУ с интервалами 1-2 минуты, несколько хуже – изменением расхода пара от соседнего котла (на дубль-блоке или при параллельных связях котлов). Величина возмущения должна составлять 15...20 % регулируемого диапазона (при диапазоне на пылеугольном котле 80...100 % примерно 10 % – номинальная паропроизводительность котла) и не должна меняться во время воздействия.

Перед опытом необходимо устранить пульсации по расходу пара и давлению пара (без демпфирования на входе в регулирующее устройство), выбрать коэффициент масштабирования по расходу пара. Должна быть организована система измерения и регистрации сигналов по расходу пара, давлению пара в соответствующей точке, суммарного сигнала, например, по вольтметру постоянного тока на входе в регулирующее устройство и по приборам КИП.

Подбор $K_д$, $T_д$ осуществляют из условия равенства сигналов по максимальному отклонению сигналов и скоростей изменения их. Це-

лесообразно начинать с максимального $K_д$ и небольших значений $T_д$. На рис. 8.8 показаны варианты сигнала по «теплу»: *а* – $K_д$, $T_д$ малы; *б* – при оптимальном подборе $K_д$, $T_д$; *в* – $K_д$, $T_д$ велики.



а *б* *в*

Рис. 8.8

При нанесении периодических ступенчатых возмущений необходимо сначала подобрать величину коэффициента $K_д$, руководствуясь следующими рекомендациями:

- если максимальное значение выходного сигнала дифференцирующего устройства больше (меньше), чем максимальное значение сигнала по расходу пара, следует уменьшить (увеличить) значение $K_д$;
- если $K_д$ максимально (по условиям реализации на дифференцирующем устройстве), а сигнал на выходе дифференцирующего устройства меньше сигнала по расходу пара, следует уменьшить коэффициент масштабирования сигнала по расходу пара на входе в регулирующее устройство (проверив при этом статическую точность поддержания расхода пара, сравнивая с допустимой);
- если уменьшение коэффициента масштабирования сигнала по расходу пара невозможно (из-за нарушения статической точности) или

малоэффективно, следует увеличить значение $T_д$, что приведет к увеличению выходного сигнала дифференциатора;

- определение оптимального $T_д$ следует производить по скорости нарастания и спадания выходного сигнала дифференцирующего устройства по сравнению со скоростью изменения сигнала по расходу пара.

Подбор положения органов настройки $K_д$ и $T_д$ выполняется до тех пор, пока отклонения сигнала по «теплу» не станут минимально возможными.

Настройку сигнала по «теплу» можно выполнить, контролируя только сигнал на выходе в регулирующее устройство (по напряжению или по току), при этом необходимо оценивать направление изменений расхода пара и давления по контрольно-измерительным приборам и индикаторам «больше» – «меньше» регулирующего устройства.

В заключение настройки сигнала по «теплу» рекомендуется зафиксировать переходную характеристику сигнала по «теплу» при внутреннем возмущении (топливом), запаздывание и постоянная времени которой используются при поиске оптимальных настроек стабилизирующего регулирующего устройства.

На рис. 8.9 и 8.10 показаны составляющие и суммарные переходные характеристики сигнала по «теплу» котлоагрегатов ТП-87 и БКЗ-320.

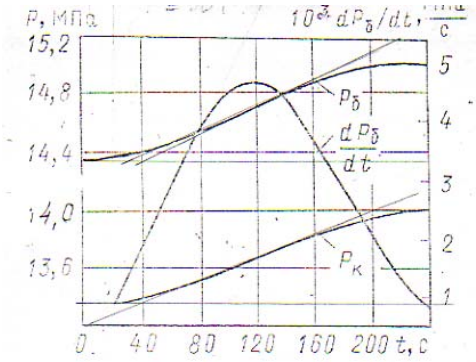


Рис. 8.9

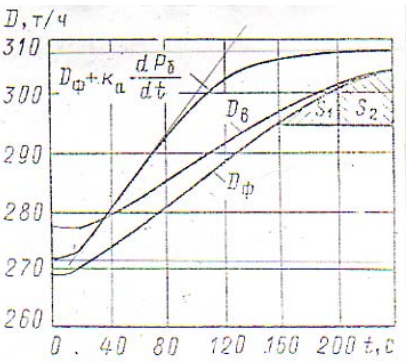


Рис. 8.10

ДИНАМИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА РЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ КАСКАДНОЙ АСР

Для систем в первом контуре, имеющих малоинерционный объект, настройка стабилизирующего регулятора выполняется экспериментальным методом (отработка возмущения задатчиком за одно-два включения). К таким системам относят АСР питания прямоточного котла, топливо газомазутных котлов, экономичности процесса горения (общего воздуха). Для систем, объект которых в первом контуре отличается более инерционной характеристикой, динамическая настройка стабилизирующего контура производится либо расчетным путем, либо экспериментальным методом или приближенным частотным методом (можно использовать модуль автоматической настройки МАН для микропроцессорных контроллеров).

Регулирующие устройства второго (или более высоких) контура (корректирующие регуляторы) настраивают расчетным, экспериментальным или приближенным частотным методом.

После завершения настройки регуляторов АСР топлива пылеугольных котлов целесообразно проверить отработку возмущения задатчиком по поведению регулирующего органа подачи топлива: перерегулирование по положению регулирующего органа не должно превышать 40 % от изменения задания, в противном случае необходимо уменьшить коэффициент усиления стабилизирующего регулятора.

Определим параметры динамической настройки стабилизирующего регулятора АСР топлива пылеугольного котла с ПИ-законом, если по переходной характеристике сигнала по «теплу» получены следующие динамические параметры:

$$K_{\text{об}_1} = 0,0047B/\%; \quad \tau = 7 \text{ с}; \quad T_1 = 48 \text{ с}.$$

В данной АСР использовалась аппаратура «Каскад», из условий реализации $K_\text{р}$ данного регулятора приведенный коэффициент усиления объекта

$$K'_{\text{об}_1} = 0,0047 \cdot 100 / 2,5 = 0,19$$

определим отношение $\tau_1 / T_1 = 7/48 = 0{,}15$ и, используя формулы ВТИ, имеем

$$K_{\text{р}} = \frac{0{,}244\left(\dfrac{\tau_1}{T_1} + 0{,}4\right)}{K'_{\text{об1}}\left(\dfrac{\tau_1}{T_1} - 0{,}07\right)} = \frac{0{,}244(0{,}15 + 0{,}4)}{0{,}19(0{,}15 - 0{,}07)} = 10{,}4,$$

$$T_{\text{и}} = 0{,}5T_1 = 0{,}5 \cdot 48 = 24 \text{ с}.$$

Определим параметры настройки корректирующего регулятора этой АСР топлива пылеугольного котла энергоблока, если по переходной характеристике сигнала по давлению перед турбиной имеем:

$$K_{\text{об}} = 0{,}016 \text{ МПа}/\% \rightarrow (0{,}16 \text{ кгс/см}^2/\%),$$

$$\tau_{\text{об}} = 24 \text{ с}; \quad T_{\text{об}} = 88 \text{ с}.$$

Приведенный по входу регулятора, имеющего ПИ-закон и реализованного на аппаратуре «Каскад», коэффициент усиления объекта равен

$$K'_{\text{об}} = 0{,}064,$$

определяем отношение $\tau_{\text{об}} / T_{\text{об}} = 24/88 = 0{,}27$, по номограмме Сибтехэнерго для одноконтурных АСР имеем $(K_{\text{р}} K_{\text{об}}) = 1{,}3$;

$$\left(\frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{об}}}\right) = 0{,}65;$$

$$K_{\text{р}} = \frac{(K_{\text{р}} K'_{\text{об1}})}{K'_{\text{об1}}} = 1{,}3/0{,}064 = 20{,}3;$$

$$T_{\text{и}} = \left(\frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{об}}}\right) T_{\text{об}} = 0{,}65 \cdot 88 = 57{,}2 \text{ с}.$$

При наличии контуров более высокого порядка переходная характеристика объектов высших контуров определяется при настроенных и включенных регуляторах контуров низшего порядка.

При $\frac{T_{\text{гл}}}{T_{\text{оп}}} \geq 4$ формулы ВТИ дают ошибку не более 20 %, при $\frac{T_{\text{гл}}}{T_{\text{оп}}} \leq 4$ следует скорректировать $T_{\text{и корр}} = T_{\text{и}} \frac{T_d}{T_d + T_{\text{и}}}$ $\left(\text{до } \frac{T_{\text{гл}}}{T_{\text{оп}}} > 3 \right)$.

По методу ВТИ

По экспериментальным переходным характеристикам объекта регулирования, полученным при одинаковых по величине возмущениях регулирующим органом $\sigma_{\text{оп}}$ и $\sigma_{\text{гл}}$, строят $\sigma_{\text{ин}}$, используя метод графического дифференцирования.

Параметры настройки регулятора и дифференциатора находят по формулам для заданных областей $\frac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}}$:

$$0 \leq \frac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}} \leq 0,1,$$

$$T_{\text{и}} = 5\tau_{\text{оп}},$$

$$\frac{1}{k_{\text{р}} k_d k_{\text{оп}}} = 0,68 \frac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}} + 17,2 \left[\frac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}} \right]^2.$$

$$0,1 \leq \frac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}} \leq 0,64,$$

$$T_{\text{и}} = 0,5\tau_{\text{оп}},$$

$$\frac{1}{k_{\text{р}} k_d k_{\text{оп}}} = 4,1 \frac{\frac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}} - 0,07}{\frac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}} + 0,4}.$$

Вычисляют $T_{\text{экв}} = \dfrac{T_{\text{и}}}{k_{\text{р}} k_d k_{\text{оп}}}$ и определяют параметры настройки при

$0{,}1 \le \dfrac{\tau_{\text{ин}}}{T_{\text{ин}}} \le 0{,}6$ и $0{,}1 \le \dfrac{\tau_{\text{экв}}}{T_{\text{ин}}} \le 0{,}3$.

$$k_d = k_{\text{ин}} \left[0{,}2 + 2{,}7 \frac{\tau_{\text{экв}}}{T_{\text{ин}}} + 2{,}5 \left(1 - 2 \frac{\tau_{\text{экв}}}{T_{\text{ин}}} \right) \frac{\tau_{\text{ин}}}{T_{\text{ин}}} \right],$$

$$T_d = T_{\text{и}} \left[0{,}6 + 2 \left(0{,}8 - \frac{\tau_{\text{ин}}}{T_{\text{ин}}} \right) \frac{0{,}18 - \dfrac{\tau_{\text{экв}}}{T_{\text{ин}}}}{0{,}61 + \dfrac{\tau_{\text{экв}}}{T_{\text{ин}}}} \right].$$

При рассмотрении структурной схемы АСР были получены передаточные функции эквивалентных регуляторов для первого и второго контуров.

В первом контуре имеем эквивалентный регулятор с передаточной функцией

$$W^1_{\text{экв}}(s) = (k'_{\text{р}} k_d) \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}} s} \right),$$

где $k'_{\text{р}}$ – коэффициент усиления собственно регулирующего устройства (ПД – преобразователя); k_d – коэффициент усиления дифференциатора.

Если обозначить $(k'_{\text{р}} k_d) = k_{\text{р экв}}$, то эквивалентный ПИ-регулятор в первом контуре аналогичен одноконтурной АСР, для которой можно использовать экспериментальный шаговый способ для определения ОПН регулятора. Однако в состав $k_{\text{р экв}}$ входит k_d, нахождение которого пока неизвестно.

Если рассмотреть второй контур с его эквивалентным ПИ-регулятором с передаточной функцией

$$W^2_{\text{экв}}(s) = \frac{1}{k_d} \left(1 + \frac{1}{T_d s} \right),$$

можно также использовать экспериментальный шаговый метод.

По номограммам Сибтехэнерго

Определение ведется по данным переходных характеристик опережающего ($k_{\text{оп}}$, $\tau_{\text{оп}}$, $T_{\text{оп}}$) и главного ($k_{\text{гл}}$, $\tau_{\text{гл}}$, $T_{\text{гл}}$) участков при

$$\frac{T_{\text{оп}}}{T_{\text{гл}}} \le 1{,}0\,,\ 0{,}1 \le \frac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}} \le 0{,}32\,,\ 0 \le \frac{\tau_{\text{гл}}}{T_{\text{гл}}} \le 1{,}0\,.$$

Параметры настройки дифференциатора $k_d = A\left(\frac{k_{\text{гл}}}{k_{\text{оп}}}\right)$, $T_d = \left(\frac{T_d}{T_{\text{гл}}}\right)T_{\text{гл}}$, где A и $\frac{T_d}{T_{\text{гл}}}$ определяют по одной из номограмм для конкретных $\frac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}} = 0{,}11$, или $\frac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}} = 0{,}22...0{,}32$ (рис. 8.11 и 8.12).

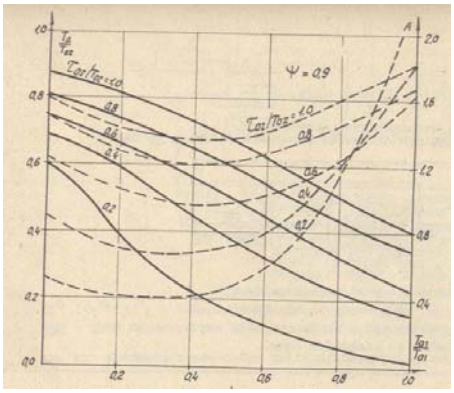


Рис. 8.11

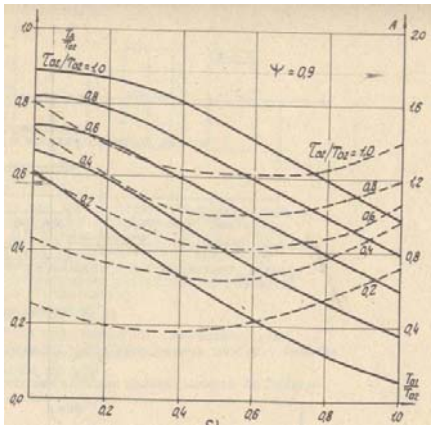


Рис. 8.12

Параметры настройки регулятора определяют с помощью номограммы для опережающего участка $k_{\text{р}} = \frac{(k_{\text{р}}k_{\text{оп}})_{\text{опт}}}{k_{\text{оп}}k_d}$, $T_{\text{и}} = \left(\frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{оп}}}\right)_{\text{опт}} T_{\text{оп}}$ (см. рис. 5.6).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД

На рис. 8.13 показана область устойчивости контура АСР с инерционным объектом, полученная с использованием расширенной АФЧХ.

Параметры настройки, оптимальные при крайнем случае внешнего возмущения (действующего только на температуру пара на выходе пароперегревателя и не действующего на температуру пара на его входе), находят на линии $\psi = 0{,}9$ в точке при минимальном значении выражения

$$k_d T_d + \left(\frac{\delta}{k_d} T_{\text{и}} \right) \frac{k_d}{k_{\text{оп}}} = k_d T_d + T_{\text{экв}} k_d ,$$

где $T_{\text{экв}} = \frac{\delta}{k_d} T_{\text{и}} \frac{1}{k_{\text{оп}}}$. Эта точка лежит на линии $\psi = 0{,}9$ между точками минимума $k_d T_d$ и минимума k_d.

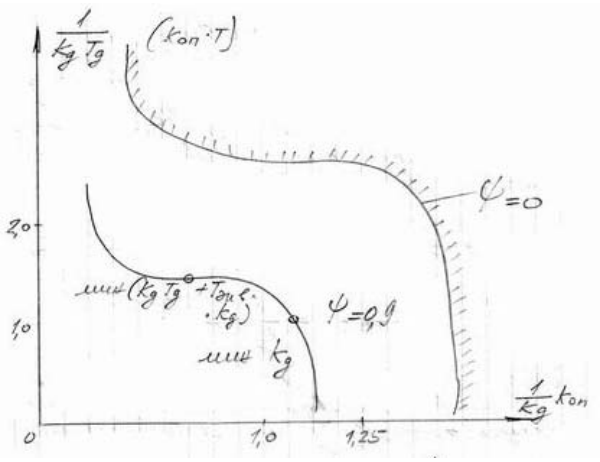


Рис. 8.13

В общем случае внешнего возмущения ОПН на линии $\psi = 0,9$ в точке минимума выражение

$$k_d T_d + \left(\frac{\delta}{k_d} T_{\text{и}} \right) \frac{k_d}{k_{\text{оп}}} = k_d T_d + T_{\text{экв}} k_d \left(1 + \frac{k_1 k_{\text{ин}}}{k_2} \right).$$

Опыты расчета АСР при внешнем и внутреннем возмущении показывают расхождения в ОПН по k_d 20 %, по T_d 40 %. Это позволяет утверждать поиск ОПН по определению k_d и T_d при любом виде внешнего возмущения.

При поиске ОПН используем шаговый метод, аналогичный одноконтурным схемам АРС. Исходная точка ОПН – достаточно большое значение T_d и малое значение $\frac{1}{k_d}$. Наносится возмущение задатчиком, и фиксируется переходный процесс на выходе инерционного участка. По виду переходного процесса делается вывод о необходимости изменения коэффициента усиления эквивалентного регулятора во внешнем контуре до появления колебательности, наложенной на апериодическую составляющую. Затем на втором шаге изменяется время интегрирования эквивалентного регулятора T_d до устранения апериодической составляющей. Затем осуществляется третий шаг – получение заданной степени колебательности. Следует отметить, что полученные значения $k^1_{\text{р экв}}$ при настройке первого контура должны сохраняться при поиске оптимального k_d, т.е. при изменении k_d необходимо менять $k'_{\text{р}}$ для сохранения постоянства $k^1_{\text{р экв}} = \text{const}$.

После выполнения поиска ОПН контуров следует проверить эффективность работы АСР, в целом при 10 % возмущении нагрузкой котла.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА АСР СО СКОРОСТНЫМ СИГНАЛОМ

1. По формулам ВТИ

1.1. Исходные данные для расчета ОПН РУ АСР экспериментального прямоточного котла:

$$\tau_{\text{оп}} = 6\ \text{с}, \quad T_{\text{оп}} = 19,2\ \text{с}, \quad \frac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}} = 0,312, \quad k_{\text{оп}} = 15,1\frac{\text{мВ}}{\text{кг/с}}, \quad T_{\text{оп}} = 20,6\ \text{с},$$

$$\tau_{\text{гл}} = 53,3\ \text{с}, \quad T_{\text{гл}} = 140\ \text{с}, \quad k_{\text{гл}} = 22,3\frac{\text{мВ}}{\text{кг/с}}.$$

1.2. По кривой разгона главного участка и величине постоянной времени опережающего участка $T_{\text{оп}}$ построена кривая разгона инерционного участка и определены значения динамических параметров этого участка:

$$\tau_{\text{ин}} = 40\ \text{с}, \quad T_{\text{ин}} = 111\ \text{с}, \quad \frac{\tau_{\text{ин}}}{T_{\text{ин}}} = 0,36, \quad k_{\text{оп}} = \frac{22,3}{15,1} = 1,47\frac{\text{мВ}}{\text{кг/с}}.$$

1.3. По формулам ВТИ найдены параметры настройки:

$$\frac{\delta}{k_{\text{оп}}k_g} = 4,1\frac{\dfrac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}} - 0,07}{\dfrac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}} + 0,4} = 4,1\frac{0,312 - 0,07}{0,312 + 0,4} = 1,38,$$

$$T_{\text{и}} = 0,5T_{\text{оп}} = 0,5 \cdot 19,2 = 9,6\ \text{с},$$

$$T_{\text{экв}} = \frac{\delta T_{\text{и}}}{k_d k_{\text{оп}}} = 1,38 \cdot 9,6 = 13,2\ \text{с},$$

$$\frac{T_{\text{экв}}}{T_{\text{ин}}} = \frac{\delta T_{\text{и}}}{k_d k_{\text{ин}} T_{\text{ин}}} = \frac{13,2}{111} = 0,119.$$

1.4. Параметры настройки скоростного сигнала:

$$k_d = k_{\text{ин}}\left[0,2 + 2,7\frac{T_{\text{экв}}}{T_{\text{ин}}} + 2,5\left(1 - 2\frac{T_{\text{экв}}}{T_{\text{ин}}}\right)\frac{\tau_{\text{ин}}}{T_{\text{ин}}}\right] =$$

$$= 1,47[0,2 + 2,7 \cdot 0,119 + 2,5 \cdot (1 - 2 \cdot 0,119) \cdot 0,36] = 1,77,$$

$$T_d = T_{\text{и}}\left[0,6 + 2\left(0,8 - \frac{\tau_{\text{ин}}}{T_{\text{ин}}}\right)\frac{0,18 - \dfrac{T_{\text{экв}}}{T_{\text{ин}}}}{0,61 + \dfrac{T_{\text{экв}}}{T_{\text{ин}}}}\right] =$$

$$= 111 \cdot [0,6 + 2\frac{0,18 - 0,119}{0,61 + 0,119}(0,8 - 0,36)] = 75 \text{ с}.$$

1.5. Параметры настройки регулирующего прибора:

$$\delta = \frac{\delta}{k_d k_{\text{оп}}} k_d k_{\text{оп}} = 1,38 \cdot 1,77 \cdot 15,1 = 37 \frac{\text{мВ}}{\text{кг/с}},$$

$$k_{\text{р}} = \frac{1}{\delta} = 0,027 \frac{\text{кг/с}}{\text{мВ}},$$

$$T_{\text{и}} = 9,6 \text{ с}.$$

2. По номограммам Сибтехэнерго

1.6. Исходные данные:

$$\tau_{\text{оп}} = 6 \text{ с}, \quad T_{\text{оп}} = 19,2 \text{ с}, \quad \frac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}} = 0,312, \quad k_{\text{оп}} = 15,1 \frac{\text{мВ}}{\text{кг/с}}, \quad T_{\text{оп}} = 20,6 \text{ с},$$

$$\tau_{\text{гл}} = 53,3 \text{ с}, \quad T_{\text{гл}} = 140 \text{ с}, \quad k_{\text{гл}} = 22,3 \frac{\text{мВ}}{\text{кг/с}}.$$

1.7. Определяем $\frac{T_{\text{оп}}}{T_{\text{гл}}} = \frac{19,2}{140} = 0,137 \approx 0,14$.

1.8. Используем вторую номограмму для расчета k_d и T_d.

По отношению $\frac{T_{\text{оп}}}{T_{\text{гл}}} = 0,14$ и $\frac{\tau_{\text{гл}}}{T_{\text{гл}}} = \frac{53,3}{140} = 0,38$ получим $\frac{T_d}{T_{\text{гл}}} = 0,62$ и $A = 0,78$.

1.9. Параметры настройки дифференциатора:

$$k_d = A\left(\frac{k_{\text{гл}}}{k_{\text{оп}}}\right) = 0,78\frac{22,3}{15,1} = 1,15,$$

$$T_d = \left(\frac{T_d}{T_{\text{гл}}}\right)T_{\text{гл}} = 0,62 \cdot 140 = 86,8 \text{ с}.$$

1.10. Параметры настройки регулятора:

$$k_{\text{р}} = \frac{(k_{\text{р}} k_{\text{оп}})_{\text{опт}}}{k_{\text{оп}} k_d}, \quad T_{\text{и}} = \left(\frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{оп}}} \right)_{\text{опт}} T_{\text{оп}} .$$

По номограмме для опережающего участка по $\frac{\tau_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}} = 0,312$ находим $(k_{\text{р}} k_{\text{оп}})_{\text{опт}} = 1,05$, $\left(\frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{оп}}} \right)_{\text{опт}} = 0,7$.

$$k_{\text{р}} = \frac{(k_{\text{р}} k_{\text{оп}})_{\text{опт}}}{k_{\text{оп}} k_d} = \frac{1,05}{1,15 \cdot 15,1} = 0,06 \frac{\text{кг/с}}{\text{мВ}},$$

$$T_{\text{и}} = \left(\frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{оп}}} \right)_{\text{опт}} T_{\text{оп}} = 0,7 \cdot 19,2 = 13,4 \text{ с} .$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе изложены методы определения оптимальных настроек регулирующих устройств автоматических систем регулирования, наиболее часто применяемых в практике наладки и эксплуатации теплоэнергетического оборудования. Появление в среде программного обеспечения персональных компьютеров одного из основных пакетов расширения системы Matlab 6.0 – Simulink 4.0 и его последующих версий позволяет в домашних условиях каждому инженеру выполнить работы по определению предварительных настроек регулирующих устройств АСР, по существу выполнив исследовательскую работу, существенно сокращающих затраты времени на внедрение АСР. Приведенные методы позволяют проводить эксплуатационную корректировку работы АСР по виду переходных процессов. Целесообразно отметить, что большинство приведенных методов расчета прошло апробацию в промышленных условиях. Использование методов предполагает расчетный путь при известных АФЧХ, или переходных характеристик объектов или экспериментальный, когда динамические характеристики объектов регулирования неизвестны.

Предполагается в дальнейшем расширить издание за счет более подробного рассмотрения методов реализации ОПН ПИД-регуляторов и наиболее распространенных в отечественной энергетике цифровых контроллеров основных зарубежных фирм, таких как Siemens, ABB, Westinhouse, Hartmann & Braun.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Герасимов С.Г.* Теоретические основы автоматического регулирования тепловых процессов. – М.: Госэнергоиздат, 1949.

2. *Герасимов С.Г.* Теоретические основы автоматического регулирования тепловых процессов. Ч.1. – М.: Высш. шк., 1967.

3. *Герасимов С.Г., Дудников Е.Г., Чистяков С.Ф.* Автоматическое регулирование котельных установок. – М.: Госэнергоиздат, 1950.

4. *Добкин В.М., Дулеев Е.М., Фельдман Е.П.* Автоматическое регулирование на электростанциях. – М.: Госэнергоиздат, 1959.

5. *Корнилов Ю.Г., Пивень В.Д.* Основы теории автоматического регулирования в применении к теплосиловым установкам. – М.: Машгиз, 1977.

6. *Стефани Е.П.* Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. – М.: Госэнергоиздат, 1960.

7. *Стефани Е.П.* Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. Изд. 2. – М.: Энергия, 1972.

8. *Ротач В.Я.* Теоретические основы автоматического регулирования теплоэнергетических процессов. – М.: МЭИ, 2004.

9. Методические указания по объему технических измерений, сигнализации и автоматического регулирования на тепловых электростанциях. – М.: СПО Союзтехэнерго, 2004 (РД 34.35.107-03).

10. *Клюев А.С., Лебедев А.Т., Новиков С.И.* Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

11. *Клюев А.С., Товарнов А.Г.* Наладка систем автоматического регулирования теплоагрегатов. – М.: Энергия, 1970.

12. *Тверской Ю.С.* Автоматизация котельных агрегатов с прямым вдуванием. – М.: Энергоатомиздат, 1995.

13. ОСТ 24.030.46.-74. Котлы паровые стационарные. Поставка. Общие технические условия.

14. Руководящие указания по переводу котлов, работающих на сернистых топливах, в режим сжигания с предельно малыми избытками воздуха. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1980.

15. Нормы точности измерений технологических параметров (РД 34.11.321-88). – М.: ВТИ, 1988.

16. Требования к оборудованию энергетических блоков мощностью 300 МВт и выше, определяемые условиями их автоматизации. – М.: СПО ОРГРЭС, 1976.

17. Рекомендации по разработке систем автоматического регулирования ТЭС (технические требования). – М.: СПО Союзтехэнерго, 1988.

18. Нормы участия энергоблоков ТЭС в нормированном первичном и автоматическом вторичном регулировании частоты. Стандарт СО-ЦДУ ЕЭС 001-2005. – М., 2005.

19. *Венцель Е.С.* Теория вероятности. – М.: Физматгиз, 1962.

20. *Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В*. Курс теории вероятности математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1995.

21. *Длин А.М.* Математическая статистика в технике. – М.: Советская наука, 1958.

22. *Янко Я.* Математико-статические таблицы. – М.: Стандарты WCE СССР, 1961.

23. *Сизиков В.С.* Математические методы обработки результатов измерений. – СПб.: Политехника, 2001.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

1. Объем автоматического регулирования технологических процессов на ТЭС 5

2. Переходные процессы в автоматических системах регулирования 11

3. Определение статических и динамических характеристик объектов регулирования (АСР) 21

4. Требования к качеству регулирования 39

5. Определение оптимальных параметров настроек одноконтурных систем регулирования 51

6. Определение ОПН регулирующих устройств АСР с малоинерционными объектами 71

7. Определение ОПН П-регуляторов 75

8. Определение ОПН регулирующих устройств каскадных АСР 82

Заключение 104

Использованная литература 105

Станислав Иванович Новиков

ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Часть 1

Учебное пособие

Редактор *И.Л. Кескевич*
Технический редактор *Н.В. Белова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Художник-дизайнер *А.В. Волошина*
Компьютерная верстка *В.Ф. Ноздрева*

Подписано в печать 17.05.2006. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Уч.-изд. л. 6,27. Печ. л. 6,75. Изд. № 357. Заказ № . Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20