

Гигиена и санитария, 1972, № 11. 2. Кропп Л.И. Пути сокращения вредных выбросов ТЭС. – Теплоэнергетика, 1978, №11. 3. Внуков А.К., Шпорта И.П. Техничко-экономические оценки затрат на пресечение токсичных выбросов. – Изв. АН БССР. Сер. Физико-энергетических наук, 1979, №4. 4. Сорокин Я.Г. Особенности переработки сернистых нефтей и охрана окружающей среды. – М.: Химия, 1975. 5. Исследования окислообразования на котле ТП-87 с подовой установкой горелок. Тепловые испытания парогенератора ТП-87 при сжигании мазута (отчет). Белорусский филиал ЭНИН и предприятие. – Минск – Свердловск: Уралтехэнерго, 1978. 6. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН 369-74. – М.: Стройиздат, 1975.

УДК 62-52(0.75.8)

Г.Т.Кулаков, А.Т.Кулаков, Н.Л.Шайковский

### ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА НАСТРОЕК ПИ-РЕГУЛЯТОРОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ ЗАДАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЯ НА МАКСИМАЛЬНЫЙ ВЫБЕГ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ОРГАНА

В практике автоматизации теплоэнергетических процессов широкое распространение получили пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы с передаточными функциями вида

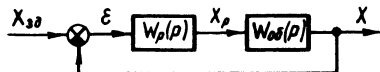
$$W_p(p) = k_p \frac{T_i p + 1}{T_i p} \quad (1)$$

где  $k_p$  – коэффициент усиления;  $T_i$  – время изодрома.

Опыт наладки и эксплуатации автоматических регуляторов на тепловых электрических станциях [1] показывает, что при оптимальной настройке регулятора переходные процессы при отработке задающих воздействий должны удовлетворять следующим требованиям: максимальное отклонение  $\Delta X_{\max}$  регулируемой величины не должно превышать 10% от величины нового установившегося значения; максимальный относительный выбег  $X_p$  регулирующего органа не должен превышать величины 1,5; время регулирования  $t_p$  (время, в течение которого, начиная с момента приложения воздействия на систему, регулируемая величина войдет в зону, составляющую  $\pm 2\%$  от величины нового установившегося значения) не должно превышать пяти-семи значений времени изодрома регулятора.

Следует отметить, что известные методы расчета параметров настройки регуляторов теплоэнергетических процессов [2, 3] не учитывают ограничения на допустимую величину регулирующего воздействия. В связи с этим расчетные параметры настройки регулятора при отработке задания экспериментальным методом проб и ошибок корректируются до получения требуемого ограничения максимального выбега регулирующего органа.

Рис. 1. Структурная схема одноконтурной автоматической системы регулирования.



Анализ переходных процессов одноконтурных АСР (рис. 1), полученных с помощью электронной вычислительной машины (ЭВМ), при настройках ПИ-регулятора, рассчитанных по известным методам [3, 4] для объекта с передаточной функцией

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{(T_1 p + 1)(\sigma + 1)}, \quad (2)$$

где  $k_{об}$  – коэффициент усиления объекта;  $T_1$  – большая постоянная времени объекта;  $\sigma$  – малая постоянная времени объекта, показывает, что для объектов с  $T = \frac{T_1}{\sigma} \geq 4$  максимальный относительный выбег регулирующего органа при отработке задания превышает допустимое значение 1,5. При этом настройки регулятора по методу [3] обеспечивают максимальный относительный выбег регулирующего органа  $\bar{X} \geq 2,5$ , а при настройках по методу [4] –  $\bar{X}_p \geq 2,0$  (рис. 2,б)<sup>p</sup>. Максимальное отклонение  $\Delta X_{max}$  регулируемого параметра составляет 22 и 4,3% соответственно для настроек, рассчитанных по методам [3] и [4] (рис. 2,а).

В связи с этим становится очевидной необходимость разработки инженерных методов расчета настройки ПИ-регуляторов, которые учитывали бы ограничения на максимальный выбег регулирующего органа при соблюдении остальных требований к параметрам переходных процессов.

В [4] предложен инженерный метод расчета параметров динамической настройки ПИ-регулятора для отработки задающих воздействий путем полной компенсации большей инерционности объекта (МПК). МПК обеспечивает оптимальную отработку задания АСР с объектами, динамические характеристики которых аппроксимированы передаточными функциями вида

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об} e^{-\sigma p}}{T_1 p + 1}. \quad (3)$$

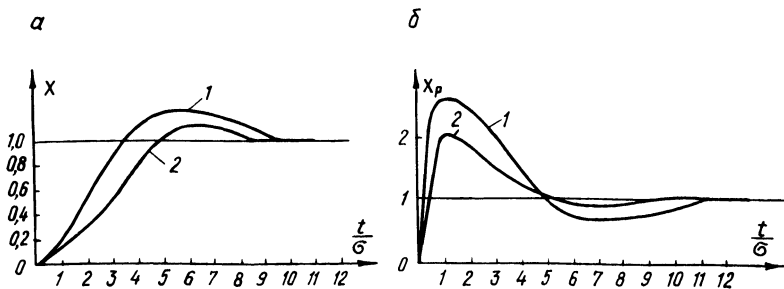


Рис. 2. Переходные процессы одноконтурной АСР с ПИ-регулятором при отработке задающего воздействия и настройках: 1 — по методу [3]; 2 — по методу [4]; а — по каналу  $X - X_{зд}$ ; б — по каналу  $X_p - X_{зд}$ .

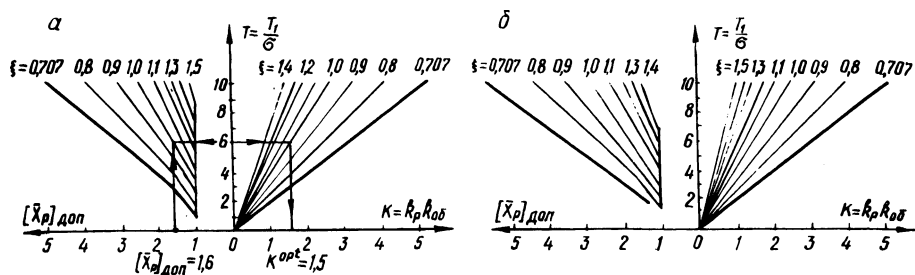


Рис. 3. Номограммы для определения параметров настройки ПИ-регуляторов на оптимальную отработку задающих воздействий с учетом ограничения на величину максимального выбега регулирующего органа: а, б — для объектов без запаздывания и с запаздыванием соответственно.

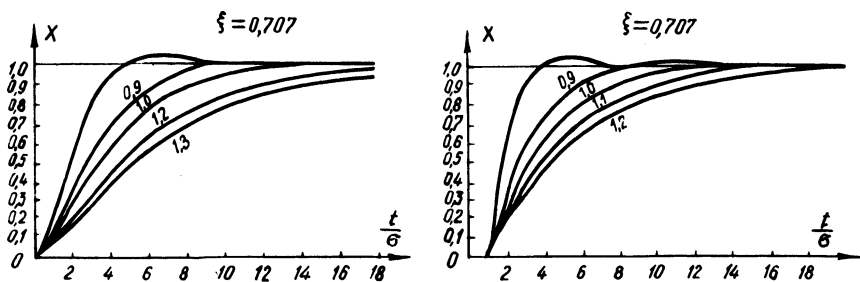


Рис. 4. Стандартные нормированные кривые переходных процессов одноконтурной АСР с ПИ-регулятором, настроенным по МПК с учетом ограничения на максимальный выбег регулирующего органа при различных значениях коэффициента  $\xi$ : а, б — для объектов без запаздывания и с запаздыванием соответственно.

В соответствии с МПК параметры настройки ПИ-регулятора рассчитываются по формулам

$$T_{и} = T_1 ; \quad (4)$$

$$K = k_{об} k_p = \frac{T_1}{4 \xi_2^2 \sigma} , \quad (5)$$

где  $\xi_2$  - коэффициент затухания системы.

При этом минимизация принятого критерия качества

$$I = \int_0^{\infty} [\epsilon^2(t) + \lambda \dot{\epsilon}^2(t)] dt$$

достигается при выборе значения коэффициента затухания системы  $\xi_2 = 0,707$ . Здесь  $\epsilon(t)$  - ошибка регулирования;  $\dot{\epsilon}(t)$  - скорость изменения ошибки регулирования;  $\lambda$  - весовой коэффициент, равный удвоенной сумме малых постоянных времени объекта регулирования.

При этом значении коэффициента  $\xi_2$  переходный процесс АСР с объектом (2) или (3) и настройках ПИ-регулятора, рассчитанных по формулам (4) и (5), полностью определяется величиной  $\sigma$  и не зависит от отношения  $T_1/\sigma$ , характеризующего динамические свойства объекта. Причем, полное время регулирования  $t_p = 8,4\sigma$  или  $6,6\sigma$  для АСР с объектами (2) или (3) соответственно, а максимальное перерегулирование  $\Delta X_{max} = 4,3\%$  от величины нанесенного возмущения в обоих случаях. Однако для объектов с отношением  $\frac{T_1}{\sigma} \geq 3$  максимальный выбег регулирующего органа превышает значение  $[\bar{X}_p]_{доп} = 1,5$  и возрастает по мере увеличения этого отношения.

Предложенный метод расчета параметров ПИ-регуляторов позволяет непосредственно определять настройку с учетом заданного ограничения на максимальный выбег регулирующего органа.

Для уменьшения максимальной величины выбега регулирующего органа при обработке АСР задающих воздействий необходимо уменьшить коэффициент усиления регулятора. Это, в свою очередь, приведет к отклонению переходного процесса от оптимального при  $\xi_2 = 0,707$  и некоторому увеличению времени регулирования. Таким образом, задача состоит в выборе коэффициента  $\xi_2$ , подстановка которого в (5) давала бы искомый коэффициент усиления регулятора с учетом требуемого ограничения на максимальный выбег регулирующего органа.

На рис. 3 приведены графики для определения оптимального относительного коэффициента усиления регулятора  $K$  с учетом ограничения на допустимую величину выбега регулирующего органа. Порядок определения оптимального коэффициента усиления регулятора  $k_p$  следующий:

1) по заданной величине  $[\bar{X}_p]_{\text{доп}}$  и отношению  $T_1/\sigma$  определяем соответствующее значение коэффициента  $\xi$ ;

2) по найденному значению коэффициента  $\xi$  и отношению  $T_1/\sigma$  находим по графику относительный коэффициент усиления  $K$ ;

3) оптимальное значение коэффициента усиления регулятора определяется по формуле

$$k_p^{\text{opt}} = K/k_{\text{об}};$$

4) оптимальное значение времени изодрома регулятора находим из условия (4)

$$T_i^{\text{opt}} = T_1. \quad (6)$$

Графики, приведенные на рис. 3, позволяют определять динамическую настройку с учетом требуемого ограничения на максимальный выбег регулирующего органа.

Эти графики были получены следующим образом.

На ЭВМ ЕС-1022 был проведен ряд расчетов переходных процессов АСР, настроенной по МПК с объектами, аппроксимированными передаточными функциями (2) по каналу  $X - X_{\text{эд}}$ . Параметры объектов, характеризующиеся отношением  $T_1/\sigma$ , изменялись в пределах 1-10. Для каждого из десяти объектов проводилось по восемь расчетов переходных процессов при различных значениях коэффициентов усиления регулятора, получаемых за счет варьирования коэффициента  $\xi$  в пределах  $0,707 \leq \xi \leq 1,5$ . При этом фиксировалось максимальное значение величины перемещения регулирующего органа  $X_p$ . Аналогичным образом были проведены расчеты переходных процессов АСР при управлении объектом (3).

На основе графиков рис. 3 получены аналитические выражения для расчета относительных коэффициентов усиления ПИ-регуляторов при заданном ограничении выбега регулирующего органа. Если максимальный выбег регулирующего органа ограничен величиной 1,5, то коэффициент  $K$  рассчитывается по формулам

$$K = 1,47 \frac{T - 0,77}{T - 0,47} \quad (7)$$

и

$$K = 1,695 \frac{T + 14,3}{T + 26,4} \quad (8)$$

для объектов с передаточными функциями (2) и (3) соответственно.

При ограничении максимального выбега регулирующего органа величиной 1,7 получаем соответственно

$$K = 2,55 \frac{T + 14,297}{T + 26,4} \quad (9)$$

и

$$K = 0,423 (\sqrt{T^2 + 7,522 T} - T). \quad (10)$$

На рис. 4 приведены рассчитанные на ЭВМ нормированные стандартные кривые переходных процессов по каналу  $X-X_{эд}$  при настройках ПИ-регулятора по МПК и различных значениях  $\xi_{эд}$  коэффициента  $\xi$ . Они позволяют определять прямые показатели качества переходных процессов АСР с оптимальными настройками ПИ-регуляторов с учетом ограничения на максимальный выбег регулирующего органа. Рассмотрим пример определения оптимального коэффициента усиления регулятора для АСР с объектом

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{(T_1 p + 1)(\sigma + 1)} = \frac{1}{(120p + 1)(20p + 1)} \quad (11)$$

при заданном значении  $[\bar{X}_p]_{доп} = 1,6$  (рис. 3,а). Соответствующие оптимальные настройки регулятора

$$\left. \begin{aligned} T_i^{opt} &= T_1 = 120; \\ k_p^{opt} &= K/k_{об} = 1,5/1 = 1,5 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

определяются из условия  $T = \frac{T_1}{\sigma} = \frac{120}{20} = 6$  и  $\xi = 1$ . Так как искомый коэффициент  $k_p^{opt}$  получен при  $\xi = 1$ , то переходный процесс АСР при установке параметров настройки регулятора (12) определяется кривой рис. 4, а соответствующей  $\xi = 1$ . Видно, что обработка задания осуществляется системой без перерегулирования. При этом время регулирования соизмеримо с переходным процессом при  $\xi = 0,707$ .

Таким образом, предложенный метод позволяет существенно упростить процесс определения параметров динамической настройки ПИ-регуляторов с учетом ограничения на максимальный выбег регулирующего органа.

## Л и т е р а т у р а

1. Временные методические указания по наладке автоматических регуляторов на тепловых электрических станциях. - М. : ОРГРЭС, 1976, с. 109. 2. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. - М.: Энергия, 1972. 3. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. - М.: Госэнергоиздат, 1960. 4. Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т. Определение оптимальных настроек регуляторов теплоэнергетических объектов при отработке задающего воздействия. - Изв. вузов СССР. Сер. Энергетика, 1980, № 4, с. 119 - 124.

УДК 628.78.014.5

Л.Н.Смурага, А.И. Козлов

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ В ПЕЧИ В СЛУЧАЕ ВІ САДКИ СТРЕМИТСЯ К НУЛЮ

Для оценки теплообмена в печах необходимо знать величину коэффициента теплоотдачи. В настоящее время известен ряд методик по определению  $\alpha$ , однако в одних случаях требуется знание теплофизических величин садок, в других - тепловых потоков.

Данная методика основана на косвенном получении значения  $\alpha$  с использованием теории регулярного режима.

На рис. 1 изображена схема печи с садкой, представляющая собой насыпной слой из чугунных отливок.

В случае охлаждения садки вместе с печью, когда критерий Био мал ( $Bi \rightarrow 0$ ), распределение температур внутри тела принимает равномерный характер и описывается простой экспонентой [1]. Отсюда легко определяется коэффициент теплопередачи системы "садка-окружающая среда"  $K$ , численное значение которого от температуры для конкретного случая приводится на рис. 2.

Для определения коэффициента теплоотдачи в печи записывают систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \alpha (t_c - t_{\Pi}) F_c; \\ Q_2 &= \frac{\lambda}{\delta} (t_{\Pi} - t_{н.с}) \sqrt{F_1 F_2}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$