

## ЭКСПРЕСС-МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ КОТЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАГРУЗКАХ\*

Докт. техн. наук, проф. КУЛАКОВ Г. Т., канд. техн. наук, доц. МАКОСКО Ю. В.,  
ассистент КОРЗУН М. Л., студ. САЛЕЙ А. А.

*Белорусский национальный технический университет*

Современные энергетические блоки, участвующие в регулировании частоты и перетоков мощности в энергосистеме, должны работать в широком диапазоне изменения нагрузок. При этом динамические характеристики пароперегревателей котлов этих энергоблоков существенно зависят от уровня нагрузки.

Для создания систем автоматического регулирования (САР), обеспечивающих качественное регулирование температуры перегретого пара, повышающих экономичность, надежность и долговечность работы теплоэнергетического оборудования ТЭС при переменных режимах, необходимо знать динамические характеристики пароперегревательных участков котлов в рабочем диапазоне изменения нагрузок. Динамические характеристики пароперегревателей котлов можно определить экспериментально [1] или расчетным путем [2]. Первый способ трудоемок, так как эксперимент необходимо проводить как минимум на трех уровнях нагрузок энергоблока.

Методика МО ЦКТИ позволяет по конструктивным размерам и значениям теплового расчета для данной нагрузки котла определить переходные характеристики пароперегревателя на основе его характерных параметров  $K$ ,  $T$ ,  $t_0$  [2]:

$$K = \frac{\alpha_2^* F_{\text{вн}}}{D c_p}; \quad (1)$$

$$T = 3600 \frac{c_m G_m}{\alpha_2^* F_{\text{вн}}}; \quad (2)$$

$$t_0 = \frac{l}{\omega}, \quad (3)$$

где  $\alpha_2^*$  – условный коэффициент теплоотдачи от стенки к пару, учитывающий термическое сопротивление стенки, ккал/(м<sup>2</sup>·ч·°С);  $F_{\text{вн}}$  – внутренняя поверхность змеевиков пакета, омываемая паром, м<sup>2</sup>;  $D$  – расход пара через пакет при нагрузке, для которой определяются разгонные характеристики, кг/ч;  $c_p$  – усредненная теплоемкость пара, проходящего через пакет, ккал/кг;  $c_m$  – теплоемкость металла змеевиков, ккал/(кг·°С);  $G_m$  – масса металла змеевиков, кг;  $l$  – длина пути пара от выхода обогреваемой поверхности нагрева, м;  $\omega$  – средняя скорость пара, м/с;  $t_0$  – время прохода пара через пакет, с.

---

\* Работа выполнена при содействии Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Коэффициенты, входящие в три характерных параметра, берутся из статических тепловых расчетов котлов.

Для сокращения объема расчетов в [3] предложен метод расчета динамических характеристик пароперегревателей при нагрузках, отличных от номинальной, позволяющий определить численные значения характерных параметров пароперегревателей в виде соответствующих графиков для любой нагрузки энергоблока по данным одной нагрузки. Это даст возможность рассчитать алгоритм изменения параметров динамической настройки САР температуры перегретого пара во всем диапазоне изменения нагрузок энергоблока. Однако в этом случае для определения численных значений передаточных функций пароперегревателя согласно методике [1] требуется вначале построить соответствующий график переходной характеристики пароперегревателя, который затем необходимо аппроксимировать соответствующей передаточной функцией.

Так, в [4] предложено передаточную функцию пароперегревателя по каналу регулирующего воздействия  $W_{об_1}(p)$  аппроксимировать в виде инерционного звена третьего порядка

$$W_{об_1}(p) = \frac{k_o}{1 + a_1 + a_2 p^2 + a_3 p^3}, \quad (4)$$

где  $k_o$  – коэффициент передачи инерционного участка пароперегревателя;  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  – коэффициенты, зависящие от численных значений характерных параметров  $K$ ,  $T$ ,  $t_0$ .

Метод, предложенный в [4], позволяет определить коэффициенты передаточных функций пароперегревателей котлов при различных нагрузках по исходным значениям  $K$ ,  $T$ ,  $t_0$  для одной нагрузки.

Вместе с тем для расчета параметров оптимальной динамической настройки САР температуры перегретого пара котлов используют передаточные функции различных видов. При этом передаточная функция инерционного участка пароперегревателя может быть представлена в следующих видах [5]:

$$W_{об_2}(p) = \frac{k_o}{(T_0 p + 1)^n}; \quad (5)$$

$$W_{об_3}(p) = \frac{k_o e^{-\tau p}}{T_a p + 1}; \quad (6)$$

$$W_{об_4}(p) = \frac{k_o}{1 + a_1 p + a_2 p^2}, \quad (7)$$

где  $\tau$  – запаздывание по каналу регулирующего воздействия;  $T_a$  – время разгона;  $a_1$ ,  $a_2$  – коэффициенты, определяемые из экспериментальных графиков передаточных характеристик опережающего и главного участков пароперегревателя;  $n$  – порядок модели объекта с одинаковыми постоянными времени  $T_0$ .

В [6] обосновано применение передаточной функции объекта регулирования в виде инерционного звена второго порядка с условным запаздыванием

$$W_{\text{обс}}(p) = \frac{k_0 e^{-\tau_y p}}{(T_1 p + 1)(\sigma p + 1)}, \quad (8)$$

где  $\tau_y$  – условное запаздывание по каналу регулирующего воздействия;  $T_1, \sigma$  – соответственно большая и меньшая постоянная времени передаточной функции объекта.

В этом случае расчетный график переходной характеристики объекта регулирования совпадает с экспериментальным с достаточной степенью точности.

В связи с вышеизложенным актуальной становится задача разработки универсального экспресс-метода определения коэффициентов передаточных функций пароперегревателя участков котлов при различных нагрузках, позволяющего по экспериментальным или расчетным данным одной нагрузки определять динамику пароперегревателя для любой другой нагрузки с использованием передаточной функции любого вида (5), (6), (7) или (8).

**1. Метод аппроксимации модели  $n$ -го порядка при одинаковых постоянных времени.** Если исходной является экспериментально снятая реакция объекта на единичный скачок, то вначале отыскивают точку перегиба переходной характеристики  $h(t)$ , время ее появления  $t_n = OD$  на графике переходного процесса (рис. 1).

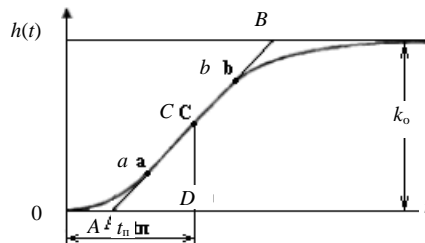


Рис. 1. График переходной характеристики объекта по каналу регулирующего воздействия:  $AB$  – касательная к экспериментальной кривой;  $ab$  – участок, общий для прямой  $AB$  и переходной характеристики  $h(t)$ ;  $C$  – условная точка перегиба переходной характеристики, равная половине отрезка  $ab$ ;  $k_0$  – коэффициент передачи объекта

Далее определяют постоянную времени объекта  $T_{\text{уч}}$ , равную

$$T_{\text{уч}} = a_1 = nT_0, \quad (9)$$

численное значение которой представляет частное от деления площади  $S_1$ , заключенной между графиком переходной характеристики  $h(t)$  и ее установившимся значением, на коэффициент передачи объекта  $k_0$  [5]:

$$T_{\text{уч}} = \frac{\int_0^{\infty} [k_0 - h(t)] dt}{k_0} = \frac{S_1}{k_0}. \quad (10)$$

Для модели с  $n$  одинаковыми постоянными времени  $T_0$  численное значение времени появления точки перегиба  $C$  графика переходной характеристики зависит только от численного значения порядка модели [7]

$$\frac{t_n}{T_0} = n - 1, \quad (11)$$

откуда находят численное значение постоянной времени  $T_0$  объекта с учетом (9) и (10):

$$T_0 = a_1 - t_n = \frac{S_1}{k_0} - t_n. \quad (12)$$

Затем из (11) с учетом (12) определяют порядок модели объекта регулирования  $n$

$$n = \frac{k_0 t_n}{S_1 - k_0 t_n}. \quad (13)$$

**2. Метод аппроксимации модели объекта инерционным звеном второго порядка.** Если исходными являются характерные параметры пароперегревателя  $K$ ,  $T$ ,  $t_0$ , то вначале определяют постоянные коэффициенты передаточной функции (7) по формулам, приведенным в [4], с учетом [5]:

$$a_1 = t_0 + TK = nT_0; \quad (14)$$

$$a_2 = \frac{a_1^2}{2} - KT^2 = \frac{n(n-1)T_0^2}{2}, \quad (15)$$

откуда находят порядок модели объекта

$$n = \frac{1}{1 - 2 \frac{a_2}{a_1^2}}. \quad (16)$$

Определив порядок модели передаточной функции объекта регулирования из равенства (14), находим постоянную времени  $T_0$  передаточной функции объекта [5]

$$T_0 = \frac{a_1}{n} = \frac{t_0 + TK}{n}. \quad (17)$$

**3. Метод аппроксимации динамики объекта передаточной функцией инерционного звена первого порядка с запаздыванием.** Численные значения запаздывания и времени разгона модели объекта с передаточной функцией (6) на основе аппроксимации Купфмюллера [8] определяют по следующим формулам [7]:

$$\tau = \alpha T_0; \quad (18)$$

$$T_a = \beta T_0, \quad (19)$$

где

$$\alpha = (n-1) - \frac{(n-2)!}{(n-1)^{n-2}} \left[ e^{n-1} - \sum_{v=0}^{n-1} \frac{(n-1)^v}{v!} \right], \quad (20)$$

$$\beta = \frac{(n-2)!e^{n-1}}{(n-1)^{n-2}}. \quad (21)$$

**4. Метод аппроксимации модели объекта инерционным звеном второго порядка с запаздыванием.** Так как условное запаздывание передаточной функции (8) определяется следующей разностью [8]:

$$\tau_y = \tau - 0,104T_a = \tau - \sigma, \quad (22)$$

то его относительное значение примет вид

$$\frac{\tau_y}{T_0} = \frac{\tau}{T_0} - \frac{0,104T_a}{T_0}, \quad (23)$$

откуда с учетом (18) и (19) получим

$$\frac{\tau_y}{T_0} = \alpha - 0,104\beta. \quad (24)$$

Поскольку малую постоянную времени  $\sigma$  передаточной функции (8) объекта находят по следующей формуле [6]:

$$\sigma = 0,104T_a, \quad (25)$$

то ее относительное значение с учетом (19) примет вид

$$\frac{\sigma}{T_0} = 0,104 \frac{T_a}{T_0} = 0,104\beta. \quad (26)$$

Обозначив сумму постоянных времени знаменателя передаточной функции (8) через  $T_k = T_1 + \sigma$ , а отношение  $T_k/T_0$  – через  $\gamma$ , получим согласно [7]

$$\gamma = \frac{T_k}{T_0} = \frac{T_1 + \sigma}{T_0} = \frac{(n-2)!}{(n-1)^{n-2}} \sum_{v=0}^{n-1} \frac{(n-1)^v}{v!}. \quad (27)$$

Так как большая постоянная времени передаточной функции объекта (8) равна разности [6]

$$T_1 = T_k - \sigma, \quad (28)$$

то ее относительное значение с учетом (26) и (27) примет следующий вид:

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{T_k}{T_0} - \frac{\sigma}{T_0} = \gamma - 0,104\beta. \quad (29)$$

На основе полученных соотношений разработана универсальная номограмма, позволяющая экспресс-методом определять численные значения параметров передаточных функций пароперегревателей в требуемом виде как на стадии проектирования котла, так и на основе экспериментальных переходных характеристик (рис. 2).

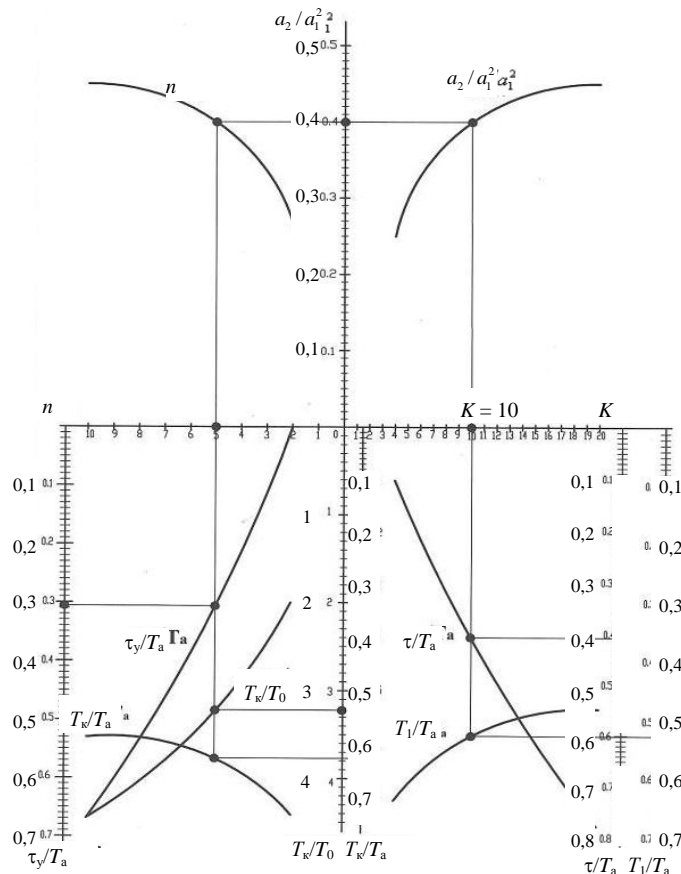


Рис. 2. Универсальная номограмма для определения численных значений относительных параметров передаточных функций пароперегревателя

Например, если для пятой ступени пароперегревателя котла ПП-1600/250 для 70 % нагрузки численные значения характерных параметров равны:  $K = 10$ ;  $T = 12,7$  с;  $t_0 = 3,08$  с [3], а требуется получить численные значения параметров пароперегревателя в виде передаточных функций (5) и (7), то вначале по номограмме находят отношение  $\frac{a_2}{a_1^2} = 0,4$ , затем определяют порядок модели объекта  $n = 5$ .

После этого по формулам (14) и (15) рассчитывают постоянные коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  передаточной функции (7) объекта регулирования:

$$a_1 = t_0 + TK = 130,08 \text{ с}; \quad (30)$$

$$a_2 = \frac{a_1^2}{2} - KT^2 = 64,4 \cdot 10^2 \text{ с}^2, \quad (31)$$

затем определяют численное значение постоянной времени  $T_0$  передаточной функции (5) из равенства (14)

$$T_0 = \frac{a_1}{n} = 26,02 \text{ с}. \quad (32)$$

Полученным значениям  $n = 5$  и  $K = 10$  соответствуют следующие относительные величины:

$$\frac{T_k}{T_0} = 3,219; \quad (33)$$

$$\frac{T_k}{T_a} = 0,629; \quad (34)$$

$$\frac{\tau_y}{T_a} = 0,306; \quad (35)$$

$$\frac{\tau}{T_a} = 0,41; \quad (36)$$

$$\frac{T_1}{T_a} = 0,525. \quad (37)$$

С учетом найденного значения  $T_0$  (32) определяют постоянную времени  $T_k$  из равенства (33)

$$T_k = 3,219T_0 = 83,8 \text{ с.} \quad (38)$$

Далее из равенств (34) и (25) вначале находят время разгона  $T_a$  передаточной функции (6)

$$T_a = \frac{T_k}{0,629} = 133,2 \text{ с,} \quad (39)$$

потом определяют малую постоянную времени  $\sigma$  передаточной функции (8)

$$\sigma = 0,104T_a = 13,8 \text{ с} \quad (40)$$

и с учетом (36) – большую постоянную времени  $T_1$  (8)

$$T_1 = 0,525T_a = 69,9 \text{ с,} \quad (41)$$

а также с учетом (35) – условное запаздывание  $\tau_y$

$$\tau_y = 0,306T_a = 12,5 \text{ с.} \quad (42)$$

В результате искомая передаточная функция пароперегревателя (8) примет следующий вид:

$$W_{обс}(p) = \frac{k_o e^{-12,5p}}{(69,9p+1)(13,8p+1)}. \quad (43)$$

Для оценки точности аппроксимации коэффициентов передаточной функции (6) на основе номограммы с учетом (36) определим запаздывание  $\tau$

$$\tau = 0,41T_a = 54,6 \text{ с.} \quad (44)$$

Так как численное значение запаздывания  $\tau$  для данного пароперегревателя, определенное традиционным методом МО ЦКТИ, составило 55 с,

а время разгона  $T_a = 135$  с [3], то относительная погрешность определения  $\tau$  по номограмме составит 0,7 %, а по времени разгона  $T_a$  будет 1,3 %.

Для определения динамики пароперегревателя для любой нагрузки котла по значениям одной нагрузки с использованием данной номограммы относительные величины характерных параметров пароперегревателя определяют по следующим формулам [3]:

$$\frac{K}{K_n} = \frac{(1+C) \frac{D_n}{D_i}}{C + \left(\frac{D_n}{D_i}\right)^{0,8}}; \quad (45)$$

$$\frac{T}{T_n} = \frac{C + \left(\frac{D_n}{D_i}\right)^{0,8}}{1+C}; \quad (46)$$

$$\frac{t_{0,i}}{t_{0,n}} = \frac{D_n V_n}{D_i V_i}, \quad (47)$$

где индекс «н» соответствует номинальной нагрузке котла, «i» – расчетной нагрузке;  $V_n$ ,  $V_i$  – соответственно удельные объемы пара при нагрузках  $D_n$  и  $D_i$ .

При этом вспомогательный коэффициент  $C$  рассчитывают по формуле [2]

$$C = \frac{0,2d_{\text{вн}}\alpha_{2н}}{\lambda_m} \ln \frac{d_n}{d_{\text{вн}}}, \quad (48)$$

где  $\alpha_{2н}$  – коэффициент теплоотдачи от стенки к пару при номинальной нагрузке, ккал/(м<sup>2</sup>·ч·°С);  $d_{\text{вн}}$ ,  $d_n$  – соответственно внутренний и наружный диаметр трубки пароперегревателя, м;  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности металла, ккал/(м<sup>2</sup>·ч·°С).

## ВЫВОДЫ

1. Предложены экспресс-методы определения коэффициентов передаточных функций пароперегревательных участков при различных нагрузках с использованием универсальной номограммы на основе исходных данных одной нагрузки.

2. Универсальная номограмма позволяет определять динамические характеристики пароперегревателей котлов как на стадии проектирования, так и на основе экспериментальных переходных характеристик.

3. Экспресс-методы дают возможность получить аналитические нелинейные зависимости изменения параметров передаточных функций пароперегревателей по каналу регулирующего воздействия, что позволяет оптимизировать параметры динамической настройки регуляторов впрысков во всем диапазоне изменения нагрузки энергоблоков. Это повышает экономичность, надежность, долговечность и безопасность работы теплоэнергетического оборудования.



## ЛИТЕРАТУРА

1. В л а с о в-В л а с ю к, О. Б. Экспериментальные методы в автоматике / О. Б. Власов-Власюк. – М.: Машиностроение, 1969. – 412 с.
2. А й з е н ш т а т, И. И. Методика расчета динамических характеристик пароперегревательных участков котельных агрегатов / И. И. Айзенштат, И. Г. Полумордвинова, Е. П. Фельдман // Труды ЦКТИ. – 1967. – Вып. 15.
3. К у л а к о в, Г. Т. Метод расчета динамических характеристик пароперегревателей при нагрузках, отличных от номинальной / Г. Т. Кулаков // Теплоэнергетика. – 1970. – № 2. – С. 51–54.
4. К у л а к о в, Г. Т. К вопросу определения коэффициентов передаточных функций пароперегревательных участков котлов при различных нагрузках / Г. Т. Кулаков, А. Н. Вексин // Теплоэнергетика. – 1972. – № 9. – С. 54–56.
5. С т е ф а н и, Е. П. Основы расчетов настройки регуляторов теплоэнергетических процессов / Е. П. Стефании. – 2-е изд. перераб. – М.: Энергия, 1972. – 376 с.
6. К у л а к о в, Г. Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования / Г. Т. Кулаков. – Минск: Технопринт, 2003. – 135 с.
7. Г у р е ц к и й, Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием / Х. Гурецкий. – М.: Машиностроение, 1974. – 329 с.
8. К ü p f m ü l l e r, K. Über die Dynamik der selbsttätigen Verstärkungsregler / K. Kűpfműller // Elektrische Nachrichtentechnik. – 1928. – Vol. 5, No 11. – P. 459–467.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 05.01.2012