

ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ С ПРОГНОЗОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер

Рассматриваются модели и методы оперативного управления технологическими процессами (ТП) с прогнозом текущих значений показателей энергетической эффективности, предложена схема системы оперативного управления ТП с контуром оптимального управления по показателям энергетической эффективности, имеющая достаточно общий характер, позволяющая оптимизировать режимы ТП широкого класса.

Ключевые слова: оперативное управление, технологические процессы, энергетическая эффективность, прогноз показателей.

Автоматизированные системы мониторинга и управления технологическими процессами (ТП) играют ключевую роль в повышении эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) [1-3]. В настоящее время данный класс автоматизированных систем управления строится на основе распределенных вычислительных сетей, оснащенных на нижнем уровне датчиками параметров режимов ТП, интегрированных на верхнем уровне в корпоративные системы предприятий [3]. Несмотря на большие успехи, достигнутые в настоящее время при построении АСУ ТП, существует целый ряд нерешенных проблем, связанных непосредственно с оперативным управлением экономичностью ТП. Дело в том, что в рамках АСУ хорошо решены задачи, связанные с непрерывным мониторингом параметров режимов и диспетчеризацией режимов ТП. Задачи же управления экономичностью ТП решаются в основном на основе обработки статистики, поэтому носят неоперативный характер. Отсутствие информации о текущих значениях показателей энергетической эффективностью управляемых процессов снижает эффективность управления ими. Поэтому актуальна задача разработки моделей и методов оперативного управления ТП с прогнозом текущих значений показателей энергетической эффективности.

Базовыми показателями эффективности ТП являются следующие:

- прямой показатель энергетической эффективности - количество выпущенной продукции, соотнесенной на единицу затраченных энергетических ресурсов

$$\omega^{cp} = P^{cp} / W^{cp}; \quad (1)$$

- инверсный показатель - энергоемкость выпускаемой продукции

Казаринов Лев Сергеевич - д.т.н., профессор, декан приборостроительного факультета ЮУрГУ, заведующий кафедрой автоматизации и управления ЮУрГУ; kazarinov@ait.susu.ac.ru.

Шнайдер Дмитрий Александрович - к.т.н., доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; shnyder@ait.susu.ac.ru.

$$\omega^{cp} = W^{cp} / P^{cp}. \quad (2)$$

Здесь P^{cp} – средний объем выпущенной продукции за период наблюдения; W^{cp} – средний объем потребленных ТЭР за период наблюдения.

Средний объем потребленных ТЭР определяются по формуле:

$$W^{cp} = \sum_{i=1}^n \alpha_i u_i^{cp}, \quad (3)$$

где u_i^{cp} - среднее значение i -го потребленного ресурса; α_i - переводной коэффициент к единой размерности объема потребляемого ресурса (обычно тонн условного топлива).

Используемый оператор усреднения, используемый в формулах (1)-(3) обычно имеет вид:

$$(\cdot)^{cp} = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} (\cdot) dt, \quad (4)$$

где T_n – интервал наблюдения.

Недостаток соотношений (1)-(4) состоит в том, что они дают усредненные значения показателей эффективности за определенный период наблюдения, в то время как для оперативного управления, целесообразно знать текущие значения показателей эффективности.

При этом непосредственное использование формул (1)-(3) не позволяет оценивать показатели в реальном времени, так как они ориентированы на решение задач статистической отчетности. Применение же этих формул для оценки текущих показателей эффективности приводит к некорректной постановке задачи оценки, при которой отклонения в исходных данных вызывают большие отклонения оцениваемых показателей.

Действительно, подача импульса ТЭР на вход технологического объекта управления (ТОУ) не приводит к мгновенному изменению выпускаемой продукции на выходе, вследствие инерционности ТП. Поэтому расчет по формулам (1)-(3) при подаче импульса ТЭР будет показывать резкое ухудшение эффективности технологического процесса в начальный период, что в общем случае не соответ-

ствует действительности. Реальная же ситуация состоит в том, что импульс ТЭР вследствие инерционности ТП «не дошел» еще до выхода. Поэтому для корректного вычисления текущей оценки показателей эффективности необходимо осуществить динамическое приведение импульса ТЭР на входе ТООУ к его выходу. Для динамического приведения можно использовать переходные функции по импульсу ТЭР на объем выходной продукции.

Предположим, что для импульсов по видам ТЭР $\{\Delta u_i\}$ получено множество переходных функций $\{h_i^H(t)\}$. Тогда оператор динамического приведения i -го импульса к выходу объекта будет иметь вид:

$$\Delta u_i^{np}(t) = \int_0^{\infty} \Delta u_i(t-\lambda) dh_i^H(\lambda), \quad i=1, \dots, n, \quad (5)$$

где h_i^H – i -я нормированная переходная функция.

Нормированные переходные функции вычисляются по формулам:

$$h_i^H(t) = h_i(t)/h_i(\infty). \quad (6)$$

Формула (5) характеризует условную динамику «прохождения» импульса ТЭР на выход ТООУ при условии отсутствия потерь ТЭР.

Соотношение (5) справедливо для линеаризованных стационарных динамических систем и представляет собой вид реакции стационарной динамической системы на входное воздействие.

Используя операции динамического приведения, можно рассчитать текущий объем потребляемых ТЭР, приведенных к выходу ТООУ:

$$\Delta W^{np}(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta u_i^{np}(t), \quad (7)$$

где $\Delta W^{np}(t)$ – приращение импульса потребляемых ТЭР.

В этом случае показатели эффективности ТП (1), (2) формулируются в виде:

$$\varphi^{(-)}(t) = P(t)/W^{np}(t); \quad (8)$$

$$\omega^{(-)}(t) = W^{np}(t)/P(t), \quad (9)$$

где $W^{np}(t) = W^6 + \Delta W^{np}(t)$, W^6 – базовое значение потребляемых ТЭР.

Оценки показателей энергетической эффективности ТП в соответствии с формулами (8), (9) являются запаздывающими. Для цели оперативного управления необходимо иметь прогнозные оценки показателей эффективности.

Для вычисления прогнозных оценок показателей эффективности воспользуемся идеей динамического приведения импульса ТЭР на входе ТООУ к его выходу, но в инверсном смысле – динамического приведения импульса выпуска продукции на выходе ко входу ТООУ.

Обратная задача динамического приведения импульса выпуска продукции на выходе ко входу ТООУ может быть выполнена на основе решения интегрального уравнения:

$$\int_0^{\infty} \Delta P^{np}(t-\lambda) dh_p^H(\lambda) = \Delta P(t). \quad (10)$$

Здесь $\Delta P(t)$ – текущее приращение объема выпуска продукции; $\Delta P^{np}(t)$ – приращение приведенного значения объема выпуска продукции ко входу ТООУ; $h_p^H(t)$ – агрегированная нормированная переходная функция по суммарному импульсу ТЭР $\Delta W(t)$ на входе ТООУ.

Нормирование переходной функции $h_p^H(t)$ происходит по формуле

$$h_p^H(t) = h_p(t)/h_p(\infty). \quad (11)$$

Исходным уравнением при выводе формулы (10) является уравнение реакции ТООУ на импульсы ТЭР на его входах:

$$\Delta P(t) = \sum_{i=1}^n \int_0^{\infty} \Delta u_i(t-\lambda) dh_i(\lambda), \quad i=1, \dots, n. \quad (12)$$

Эквивалентные преобразования уравнения (12) осуществляется на основе соотношений:

- перевода объема потребленного топлива из натуральных показателей в условное топливо:

$$u_i^{yT} = \alpha_i u_i, \quad i=1, \dots, n; \quad (13)$$

- долевой составляющей i -го вида ТЭР в объем P выпускаемой продукции:

$$u_i^{yT} = \omega_i^6 P, \quad i=1, \dots, n, \quad (14)$$

где ω_i^6 – базовая энергоемкость выпускаемой продукции по i -му виду ТЭР.

В результате агрегированная переходная функция ТООУ будет иметь вид:

$$h_p(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i^6 / \alpha_i h_i(t). \quad (15)$$

На основе решения уравнений (10) в реальном времени можно оценить прогнозные значения показателей энергетической эффективности:

$$\varphi^{(+)}(t) = P^{np}(t)/W(t); \quad (16)$$

$$\omega^{(+)}(t) = W(t)/P^{np}(t). \quad (17)$$

Рассмотрим условия эквивалентности определения текущих показателей эффективности ТП и средних показателей (1), (2). С этой целью будем полагать, что

$$W^{cp} = W^6 + \Delta W^{cp}; \quad (18)$$

$$P^{cp} = P^6 + \Delta P^{cp}; \quad (19)$$

$$W^{np}(t) = W^6 + \Delta W^{np}(t); \quad (20)$$

$$P(t) = P^6 + \Delta P(t), \quad (21)$$

где P^6 – базовое значение объема выпущенной продукции; W^6 – базовое значение объема потребленных ТЭР; ΔP^{cp} – отклонение среднего значения объема выпущенной продукции от соответствующего базового значения; ΔW^{cp} – отклонение среднего значения объема потребленных ТЭР от соответствующего базового значения; ΔP – отклонение текущего значения объема выпущенной продукции от соответ-

ствующего базового значения; ΔW^{np} – отклонение текущего значения приведенного объема потребленных ТЭР от соответствующего базового значения.

С учетом (18)–(21) отклонения показателей эффективности от базовых значений будут определяться по следующим аналитическим соотношениям:

$$\Delta \varphi = (\Delta P - \varphi^6 \Delta W)(W^6)^{-1}; \quad (22)$$

$$\Delta \omega = (\Delta W - \omega^6 \Delta P)(P^6)^{-1}, \quad (23)$$

где φ^6 – базовое значение прямого показателя эффективности ТП; ω^6 – базовое значение энергоемкости ТП. Применяя (4) к (22), (23), получим

$$\Delta \varphi^{cp} = (\Delta P^{cp} - \varphi^6 \Delta W^{cp})(W^6)^{-1}; \quad (24)$$

$$\Delta \omega^{cp} = (\Delta W^{cp} - \omega^6 \Delta P^{cp})(P^6)^{-1}. \quad (25)$$

Для текущих значений отклонений показателей эффективности (8), (9) получим соотношения:

$$\Delta \varphi^{(-)}(t) = (\Delta P(t) - \varphi^6 \Delta W^{np}(t))(W^6)^{-1}; \quad (26)$$

$$\Delta \omega^{(-)}(t) = (\Delta W^{np}(t) - \omega^6 \Delta P(t))(P^6)^{-1}. \quad (27)$$

Применим операцию усреднения к (26), (27):

$$\Delta \varphi^{cp} = (\Delta P^{cp} - \varphi^6 (\Delta W^{np})^{cp})(W^6)^{-1}; \quad (28)$$

$$\Delta \omega^{cp} = ((\Delta W^{np})^{cp} - \omega^6 \Delta P^{cp})(P^6)^{-1}. \quad (29)$$

Для равенства соотношений (24), (25) и (28), (29) необходимо, чтобы

$$(\Delta W^{np})^{cp} = \Delta W^{cp}. \quad (30)$$

Можно показать, если для динамического приведения (5) использовать переходные функции, нормированные по формуле (6), то $\lim_{T_n \rightarrow \infty} (\Delta W^{np})^{cp} =$

$= \Delta W^{cp}$. Таким образом, соотношения (5) и (30) определяют условия динамического приведения входных процессов потребления ТЭР к выходу ТООУ.

Аналогичным образом можно показать, что условиями динамического приведения (10) выходного ТП производства продукции ко входу ТООУ является условие:

$$(\Delta P^{np})^{cp} = \Delta P^{cp}. \quad (31)$$

Условие (31) выполняется при нормированной переходной функции (11).

Вычисление прогнозной оценки на основе решения уравнения (10) могут представлять серьезные вычислительные трудности. Особенно это относится к ТООУ с запаздывающими динамическими процессами. В этих случаях целесообразно использовать упреждающие оценки показателей эффективности.

Упреждающие оценки показателей эффективности можно построить на основе введения такта запаздывания τ при построении оценок.

В этом случае осуществляется частичное динамическое приведение процессов подачи ТЭР на входе объекта с задержкой на такт запаздывания τ :

$$\Delta u_i^{np}(t) = \frac{1}{A} \int_0^\tau \Delta u_i(t - \lambda) d h_i(\lambda), \quad i = 1, \dots, n, \quad (32)$$

где A – коэффициент нормирования: $A = h(\tau)$.

Для процесса выработки продукции $P(t)$ также осуществляется частичное динамическое приведение с интервалом прогноза $(T_p - \tau)$, где T_p – время переходного процесса по агрегированной переходной функции $h_p(t)$. В этом случае осуществляется решение уравнения

$$\int_\tau^\infty \Delta P^{np}(t - \lambda) d h_p^H(\lambda) = \Delta P(t). \quad (33)$$

Упреждающие оценки показателей энергетической эффективности определяются на основе соотношений:

$$\varphi^{(+\tau)}(t) = P^{np}(t) / W^{np}(t); \quad (34)$$

$$\omega^{(+\tau)}(t) = W^{np}(t) / P^{np}(t). \quad (35)$$

Выбор такта запаздывания τ осуществляется из условий разрешимости уравнения (33), а также эффективности процесса оперативного управления.

Для решения уравнения (10) в реальном времени можно также воспользоваться процедурой регуляризации.

В этом случае уравнение (10) имеет вид

$$\int_0^\infty \Delta P^{np}(t - \lambda) d h_p^H(\lambda) + K_R^{-1} \Delta P^{np}(t) = \Delta P(t), \quad (36)$$

где K_R^{-1} – коэффициент регуляризации.

Уравнение (36) можно интерпретировать как систему автоматического регулирования. Структура указанной системы регулирования представлена на рис. 1.

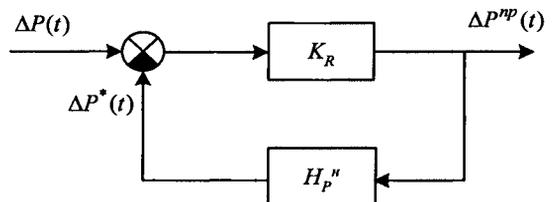


Рис. 1. Структура системы регулирования

Здесь H_p^H – передаточная функция, соответствующая переходной функции $h_p(t)$.

Схему на рис. 1 можно рассматривать как структуру прогнозирующего фильтра, вычисляющего прогнозные оценки $\Delta P^{np}(t)$ по результатам измерений $\Delta P(t)$. Интерпретация прогнозирующего фильтра (рис. 1) как системы регулирования с обратной связью позволяет применить весь арсенал средств обеспечения качества процессов регулирования, разработанный в рамках теории автоматического управления, для синтеза указанного фильтра.

Построенные оценки текущих значений показателей эффективности ТП могут быть использованы в системах автоматизированного мониторинга для оперативного контроля энергетической эффективности технологических процессов.

Рассмотрим задачу текущей оптимизации режимов ТП. Рабочие характеристики ТП будем представлять в виде:

$$u_i = f_i^6(p_1, p_2, \dots) + \sum_{j=1}^m a_{ij}(x_j - x_{j, \text{ном}}) + \sum_{k=1}^l b_{ik}(z_k - z_{k, \text{ном}}). \quad (37)$$

Здесь $f_i^6(p_1, p_2, \dots)$ – базовые рабочие характеристики ТП, определяющие зависимость объема u_i потребляемого ТЭР i -го вида от объемов выпускаемой продукции p_1, p_2, \dots при номинальных значениях режимных параметров x_j и возмущающих факторов z_k .

Рабочие характеристики ТП обычно определяются на основе испытаний. Типичный вид рабочей характеристики для двухмерной задачи приведен на рис. 2. Коэффициенты a_j зависимости (37) характеризуют поправки рабочей характеристики на отклонения от номинальных режимов.

При оперативном управлении ТП требуемый объем производимой продукции, как правило, задан, исходя из производственной программы предприятия, и задача оперативного управления состоит в оптимизации расхода ресурсов на производство требуемого объема выпускаемой продукции.

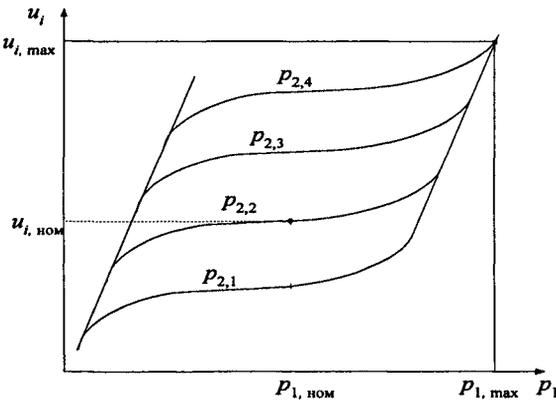


Рис. 2. Рабочие характеристики ТП

Формально постановка задачи оптимального управления следующая. Найти минимум энергоемкости выпускаемой продукции на основе выбора оптимальных значений потребляемых ресурсов и режимных факторов:

$$\min_{\{u_i, x_{ij}\}} W(t), p_i^{\text{пр}}(t) \geq p_{i, \tau}, W(t) = \sum_i \alpha_i u_i(t), u_i(t) = f_i^6(p_1(t), p_2(t), \dots) + \sum_{j=1}^m a_{ij}(x_j(t) - x_{j, \text{ном}}) + \sum_{k=1}^l b_{ik} \times (z_k(t) - z_{k, \text{ном}}), x_i^{\text{мин}} \leq x_i \leq x_i^{\text{макс}}, 0 \leq u_i \leq u_i^{\text{макс}}, \quad (38)$$

где $p_{i, \tau}$ – требуемое значение объема i -й выпускаемой продукции.

Задача (38) решается известными методами математического программирования [4]. При нелинейном характере зависимости (37) от режимных факторов задача оптимизации решается итерационно с линеаризацией в окрестности текущего решения.

В результате решения задачи (38) определяются оптимальные значения необходимых объемов ресурсов $u_{\text{опт}}(t)$ и режимных факторов $x_{\text{опт}}(t)$.

Схема системы оперативного управления ТП с контуром оптимального управления по показателям энергетической эффективности представлена на рис. 3, где введены следующие обозначения: ТОУ – технологический объект управления; R – блок регуляторов параметров ТП; Опт – подсистема оптимизации, вырабатывающая оптимальные значения уставок системы автоматического регулирования режимных параметров технологического объекта; Мон – подсистема мониторинга показателей эффективности ТП.

Построенная схема оперативного управления ТП (см. рис. 3) имеет достаточно общий характер и может быть использована для оптимизации управления технологическими процессами широкого класса по критериям энергетической эффективности.

Литература

1. Казакевич, В. В. Системы автоматической оптимизации / В. В. Казакевич, А. Б. Родов. - М.: Энергия. - 1977. - 288 с.
2. Стефанин, Е. П. Основы построения АСУ ТП / Е. П. Стефанин. - М.: Энергоиздат, 1982. - 352 с.
3. Глишков, Г. М. АСУ ТП в черной металлургии / Г. М. Глишков. - М.: Металлургия, 1999.
4. Цыпкин, Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Я. З. Цыпкин. - 1968.

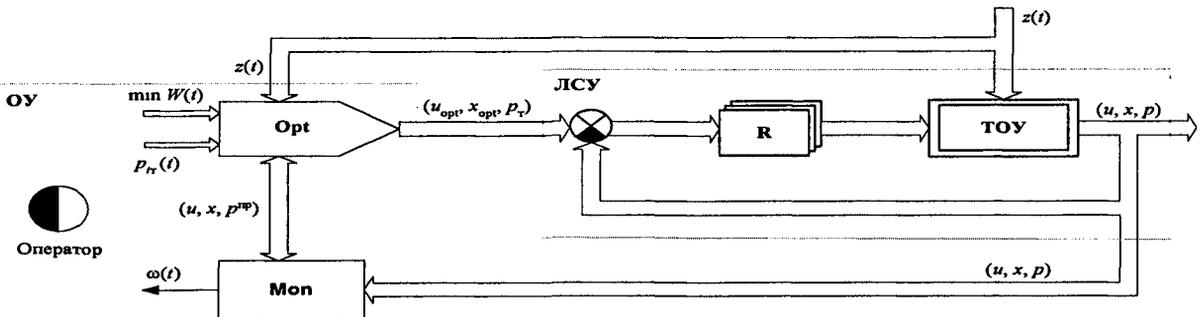


Рис. 3. Схема оперативного управления ТП