

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ УПРЕЖДАЮЩИХ ОЦЕНОК ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер

METHOD OF DEVELOPING OF LOOK-AHEAD ENERGY EFFICIENCY ESTIMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

L.S. Kazarinov, D.A. Shnaider

В статье рассматриваются теоретические основы повышения энергетической эффективности технологических процессов на основе упреждающих оценок с использованием обратных моделей динамики технологических объектов управления, а также повышение эффективности теплоэнергетических комплексов на основе автоматизации мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса стареющего оборудования с использованием обобщенных показателей.

Ключевые слова: упреждающие оценки, упреждающее управление, энергетическая эффективность.

Theoretical foundations of obtaining process energy efficiency with predictive estimates are considered. Inverse dynamics models of control objects are applied. Monitoring and prediction of reliability estimates for energy systems using generalized indices also considered.

Keywords: predictive estimates, predictive control, energy efficiency.

Введение

Существующие теории и практика управления большими технологическими системами используют в основном методы централизованного диспетчерского управления в сочетании с локальными автоматическими регуляторами технологических параметров. При этом обеспечение качества и эффективности управления требует получения достоверной прогнозной информации о состоянии системы, позволяющей формировать оперативные управляющие воздействия в соответствии с заданными критериями управления. Решение данной задачи основано на создании автоматизированных систем управления на базе различных подходов, в том числе прогнозирующих моделей технологических объектов управления (ТОУ), описывающих динамику выработки, аккумулярования и потребления энергетических ресурсов (ЭР) (далее, прямые прогнозирующие модели), а также моделей развития аварийных ситуаций для энергетического оборудования.

Однако для энергетических комплексов построение точных прогнозирующих моделей явля-

ется крайне сложной и объемной задачей. Реально во многих случаях, подобные модели обладают недостаточной точностью оценки показателей эффективности, требуемой в соответствии с технологическими регламентами. Поэтому применение известных методов управления, основанных на построении прямых прогнозирующих моделей ТОУ, для эффективного управления энергетическими комплексами производства имеет определенные ограничения.

В этой связи актуальной проблемой является разработка подхода к управлению, который основывается на упреждающих оценках эффективности процессов, получаемых, исходя из непосредственных измерений двух сторон оценочного отношения: текущих расходов энергетических ресурсов, объемов выходной продукции, а также статистики отказов и аварийных ситуаций. Построение подобных оценок приводит к нетривиальным задачам, так как их решение должно существенно базироваться на комбинированных моделях прямой и обратной динамики управляемых процессов. При этом сам принцип управления, основанный на

Казаринов Лев Сергеевич - д-р техн. наук, профессор, декан приборостроительного факультета ЮУрГУ; kazarinov@ait.susu.ac.ru

Шнайдер Дмитрий Александрович - канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и управления ЮУрГУ; shnayder@ait.susu.ac.ru

Kazarinov Lev Sergeevich - PhD, professor, dean of Electronics Faculty of SUSU; kazarinov@ait.susu.ac.ru

Shnaider Dmitry Aleksandrovich - PhD, assistant professor of Automation and Control Department of SUSU; shnayder@ait.susu.ac.ru

упреждающих оценках эффективности использования ресурсов до того, как эти ресурсы будут реально использованы или исчерпаны, является естественным условием достижения функциональной и эксплуатационной эффективности в сложных технологических комплексах.

1. Теоретические основы повышения энергетической эффективности ТП на основе упреждающих оценок с использованием обратных моделей динамики ТООУ

На рис. 1 представлена предлагаемая общая схема оперативного упреждающего оценивания энергетической эффективности.

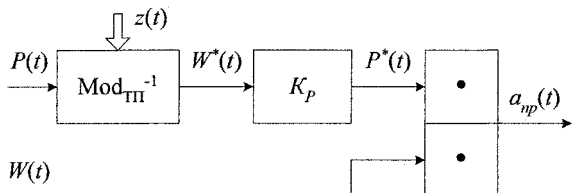


Рис. 1. Общая схема оперативного упреждающего оценивания энергетической эффективности

Здесь $P(t)$ – текущий объем производимой продукции; $W(t)$ – текущий расход ЭР; $W^*(t)$ – модельная оценка текущего расхода ЭР; Mod_{TP}^{-1} – обратная модель динамики технологического процесса; $z(t)$ – режимные факторы; K_P – нормирующий коэффициент, обеспечивающий статистически единичную передачу $P_{cp} \xrightarrow{1} P_{cp}^*$; $a_{np}(t)$ – упреждающая оценка энергетической эффективности

$$a_{np}(t) = \frac{P^*(t)}{W(t)}. \tag{1}$$

Для того чтобы понять существо подхода, приведем элементарный пример. Модель процесса характеризуется запаздыванием выработки продукции относительно потребления ресурсов

$$Mod_{TP}: P(t) = a_p(t)W(t-\tau). \tag{2}$$

При этом если энергетическую эффективность определять на основе отношения выработки продукции к потреблению ресурсов:

$$a_p(t) = \frac{P(t)}{W(t)}, \tag{3}$$

то оценка будет некорректной.

Запаздывающая оценка определяется на основе соотношения

$$a_p(t) = \frac{P(t)}{W(t-\tau)}. \tag{4}$$

Упреждающая оценка – на основе соотношения

$$a_{np}(t) = a_p(t+\tau) = \frac{P(t+\tau)}{W(t)}, \tag{5}$$

где $P(t+\tau)$ – плановое задание.

Условия корректного оценивания:

1. Оценки энергетической эффективности $a_{np}(t)$ должны основываться на реальных измерениях двух сторон отношения $P(t)$ и $W(t)$.

2. Оценки должны быть статистически несмещенными

$$M\{P^*(t)\} = M\{P(t)\} = P_{cp}$$

3. Стороны оценочного отношения должны быть синхронизированы в динамике

$$P^*(t) \sim W^*(t) \sim W(t)$$

При построении упреждающего управления могут быть использованы частично упреждающие оценки, схемы построения которых представлены ниже.

Модель технологического процесса представлена на рис. 2.

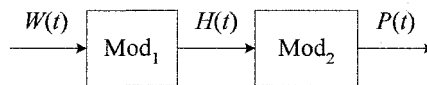


Рис. 2. Модель технологического процесса

Схема частично упреждающего оценивания приведена на рис. 3.

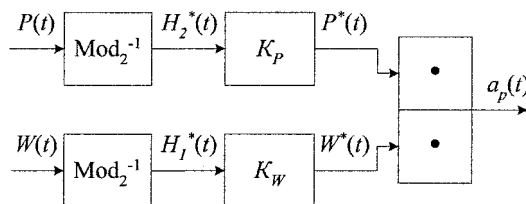


Рис. 3. Схема частично упреждающего оценивания

Учет режимных факторов и обратная модель приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

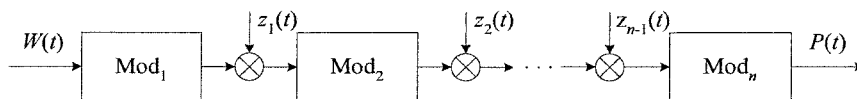


Рис. 4. Учет режимных факторов

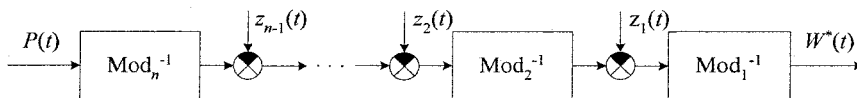


Рис. 5. Обратная модель

Таким образом, центральным моментом предлагаемой методики является построение обратных моделей динамики технологических процессов. Математически данная задача сводится к решению обратной задачи

$$\text{Mod}(W_i) = P_{i,0}, \quad (6)$$

где $P_{i,0}$ - заданный процесс; W_i - искомый процесс.

Данная задача является некорректно поставленной. Регуляризация некорректно поставленной задачи может быть выполнена двумя способами. Первый способ основан на использовании специального регуляризирующего оператора α_R :

$$\text{Mod}(W_i) + \alpha_R W_i = P_{i,0}. \quad (7)$$

Второй способ основан на использовании методов экспоненциальной фильтрации. Решение первой задачи осуществляется по структурной схеме, приведенной на рис. 6, при использовании известных методов теории автоматического управления.

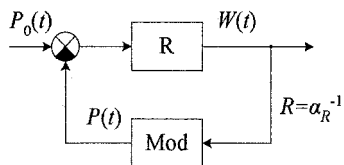


Рис. 6. Структурная схема решения первой задачи

Решение второй задачи осуществляется с использованием структурной схемы обратного оператора, представленной на рис. 7.

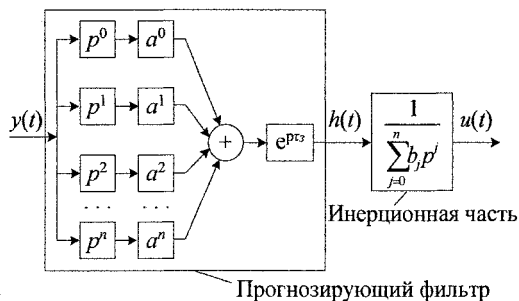


Рис. 7. Структурная схема обратного оператора

Рассмотрим построение прогнозирующего фильтра.

Пусть дано разложение входного сигнала в полиномиальном базисе:

$$y(t - \lambda) = \sum_{i=0}^n g_i(t) \lambda^i, \quad (8)$$

где λ - интервал ретроспективы.

Экспоненциально-средняя квадратичная ошибка разложения

$$E^2(t) = \frac{1}{\tau_\Phi} \int_0^\infty \left[y(t - \lambda) - \sum_{i=0}^n g_i(t) \lambda^i \right]^2 e^{-\frac{\lambda}{\tau_\Phi}} d\lambda, \quad (9)$$

где τ_Φ - постоянная времени фильтра.

Условия оптимальности

$$\frac{\partial E^2(t)}{\partial g_i(t)} = 0; \quad i = \overline{0, n}. \quad (10)$$

Структура оптимального фильтра представлена на рис. 8.

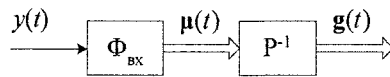


Рис. 8. Структура оптимального фильтра

Здесь $\mu(t) = (\mu_0(t), \mu_1(t), \dots, \mu_n(t))^T$ - вектор моментов входного сигнала; $g(t)$ - вектор координатных функций разложения.

Выход дифференциальной части с прогнозом

$$h(t + \tau_{np}) \approx \sum_{i=0}^n i! a_i g_i(t) \tau_{np}^i. \quad (11)$$

Применение методов экспоненциальной фильтрации позволяет построить общую структуру обратного оператора (рис. 9).

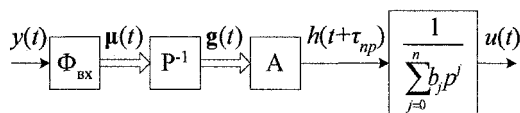


Рис. 9. Общая структура обратного оператора

В работе задача построения обратного оператора была решена в общем случае на фоне белого шума и цветных помех.

Выходная реакция прогнозного фильтра

$$h(t + \tau_{np}) = \int_0^\infty y(t - \lambda) \omega(\lambda) d\lambda = \sum_{i=0}^n g_i(t) \int_0^\infty \lambda^i \omega(\lambda) d\lambda. \quad (12)$$

Сравнивая (11) и (12), можем записать

$$\int_0^\infty \lambda^i \omega(\lambda) d\lambda = i! a_i \tau_{np}^i, \quad i = \overline{0, n}. \quad (13)$$

На фоне белого шума оптимальное решение определяется выражением

$$\omega(\tau) = \sum_{i=0}^n \gamma_i \tau^i e^{-c\tau}, \quad (14)$$

где γ_i - неизвестные множители Лагранжа, значения которых определяются из условий (13).

На фоне цветных помех оптимальное решение определяется интегральным уравнением

$$\int_0^\infty K_z(t - \lambda) \omega(\lambda) d\lambda + \alpha \omega(\tau) = \sum_{i=0}^n \gamma_i \tau^i e^{-c\tau}, \quad (15)$$

где $K_z(t - \lambda)$ - корреляционная функция помехи; α - коэффициент регуляризации.

Решение уравнения (15) в частотной области

$$W(s) = \frac{\sum_{i=0}^n \gamma_i L\{\tau^i e^{-c\tau}\}}{F_z(s) + \alpha}, \quad (16)$$

где $L\{\cdot\}$ - преобразование Лапласа; $F_z(s)$ - передаточная функция формирующего фильтра помехи.

Соотношение (16) представляет собой передаточную функцию оптимального прогнозирующего фильтра.

Структурная схема АСУ с контуром упреждающего управления по критерию энергетической эффективности приведена на рис. 10.

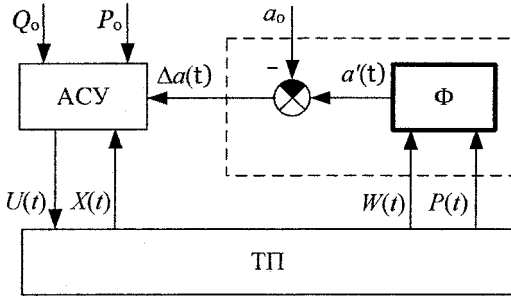


Рис. 10. Структурная схема АСУ с контуром упреждающего управления по критерию энергетической эффективности

2. Теоретические основы повышения эффективности теплоэнергетических комплексов на основе автоматизации мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса стареющего оборудования с использованием обобщенных показателей

Рассмотрение вопроса прогнозирования остаточного ресурса стареющего оборудования энергетического комплекса имеет прямое отношение к задаче повышения энергетической эффективности. Дело в том, что прямые потери энергетических ресурсов как раз возникают при авариях в энергетическом комплексе. При чем потери ресурсов могут достигать значительных масштабов. Ущерб здесь может перекрывать эффект от использования АСУ.

Оценка ресурса энергетического оборудования основывается на понятии режимных и параметрических частных ресурсов, определяемых соответственно соотношениями (17), (18):

$$r_i(t) = \frac{|\Pi_{\text{доп}}^{\text{ав}} - \Pi_i(t)|}{|\Pi_{\text{доп}}^{\text{ав}} - \Pi_{\text{ном}}|}, \quad (17)$$

$$\rho_j(t) = 1 - b \int_{t_k}^t \varphi_j(\tau) d\tau, \quad (18)$$

$$\varphi_j = \begin{cases} |P_{\text{доп}}^{\pm} - P_j|, & P_j \notin [P_{\text{доп}}^-, P_{\text{доп}}^+] \\ 0, & P_j \in [P_{\text{доп}}^-, P_{\text{доп}}^+] \end{cases};$$

где Π_i – текущее значение i -го параметрического показателя работоспособности; $\Pi_{\text{доп}}^{\text{ав}}$ – предельное (аварийное) значение Π_i ; $\Pi_{\text{ном}}$ – номинальное (рабочее) значение Π_i ; r_i – частный параметрический ресурс контролируемого агрегата по Π_i ; P_j – j -й режимный показатель работоспособности; ρ_j –

частный режимный ресурс контролируемого агрегата по показателю P_j ; φ_j – функция отклонения P_j от диапазона допустимых значений $[P_{\text{доп}}^-, P_{\text{доп}}^+]$; b – нормирующий коэффициент; $[t_k, t]$ – интервал времени с момента окончания k -го рассматриваемого ремонта до текущего момента времени.

Типовой подход к оценке текущего ресурса агрегата основан на выявлении критических мест, где возникает аварийная ситуация. Однако использование только частных оценок, несмотря на их чрезвычайную важность, не закрывает полностью проблему оценки состояния оборудования. В рамках АСУ ТП наряду с частными оценками целесообразно использовать обобщенные оценки, которые интегрально характеризуют эволюцию состояния объекта контроля во времени.

Приведем основные соотношения, по которым можно вводить обобщенные показатели работоспособности. При введении обобщенных показателей используются веса частных показателей работоспособности, которые характеризуют относительную величину потерь энергетических ресурсов при возникновении аварии по соответствующему частному показателю:

$$\alpha_i = \frac{c_i}{\sum_j c_j}, \quad i, j = \overline{1, n},$$

$$\alpha_i \geq 0; \quad \sum_i \alpha_i = 1, \quad i = \overline{1, n},$$

где c_i – потери энергетических ресурсов при возникновении аварийной ситуации на энергетическом объекте.

Вводятся следующие обобщенные показатели:

- средневзвешенный показатель работоспособности:

$$R_{\text{ср}}(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i R_i(t);$$

- средневзвешенное квадратичное отклонение показателей работоспособности:

$$\sigma_{\text{ср}}^2(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i (R_i(t) - R_{\text{ср}}(t))^2;$$

- взвешенный мультипликативный показатель по критическим ресурсам:

$$R_{\text{кр}}(t) = \prod_{i \in I_{\text{кр}}} R_i^{\alpha_i}(t).$$

На рис. 11 приведена типовая диаграмма эволюции обобщенных показателей. Данная диаграмма дает обзор эволюции состояния объекта контроля по средневзвешенному показателю, по средневзвешенному квадратичному показателю и выбросы по мультипликативному показателю, характеризующего аварийные состояния.

Для прогноза траектории эволюции обобщенных показателей используется специализирован-

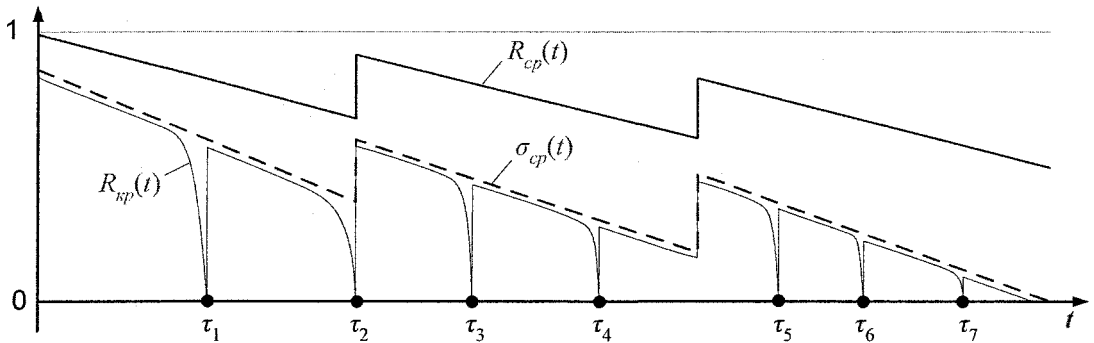


Рис. 11. Типовая диаграмма эволюции обобщенных показателей

ная прогнозная модель, для которой цена ошибки зависит от ее знака.

Общий вид прогнозной модели:

$$y = f[\mathbf{a}](\mathbf{x}), \quad (19)$$

где y – объем потребления ресурса; \mathbf{x} – вектор технологических факторов, \mathbf{a} – вектор структурных параметров прогнозирующих моделей.

Ошибка прогнозирования:

$$e_k = y_k - f[\mathbf{a}](\mathbf{x}_k), \quad k \in I_n, \quad (20)$$

где k – индекс статистического наблюдения, принимающий значение из индексного множества I_n .

На рис. 12 представлена зависимость цены ошибки прогнозирования потерь ресурса.

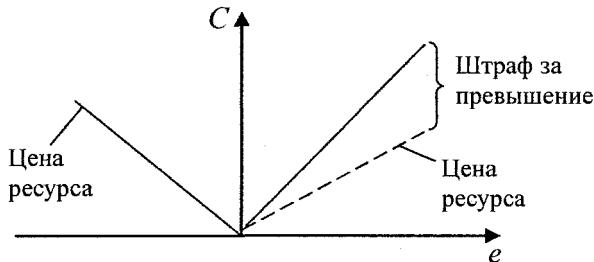


Рис. 12. Цена ошибки прогнозирования потерь ресурса

Суммарный штраф за неточный прогноз

$$C = \sum_k c_r |e_k^-| + \sum_k c_{ш} |e_k^+|, \quad (21)$$

где c_r , $c_{ш}$ – цена ресурса и величина штрафа соответственно; e_k^- , e_k^+ – отрицательные и положительные значения ошибки, определяемые выражением (20).

Предположим, что зависимость (19) имеет линейный характер

$$y = \sum_{j=0}^n a_j x_j, \quad x_0 \equiv 1. \quad (22)$$

Решение задачи будем осуществлять на основе модифицированного критерия

$$S = 0,5 \sum_k s_r^2 |e_k^-|^2 + 0,5 \sum_k s_{ш}^2 |e_k^+|^2, \quad (23)$$

где s_r , $s_{ш}$ – некоторые весовые коэффициенты; e_k^- , e_k^+ – отрицательные и положительные значения ошибки соответственно,

$$e_k = y_k - \sum_{j=0}^n a_j x_{jk}. \quad (24)$$

Условие минимума критерия (23)

$$\frac{\partial S}{\partial a_i} = -s_r^2 \sum_k I(|e_k^-|) \left(y_k - \sum_{j=0}^n a_j x_{jk} \right) x_{ik} - s_{ш}^2 \sum_k I(|e_k^+|) \left(y_k - \sum_{j=0}^n a_j x_{jk} \right) x_{ik} = 0, \quad (25)$$

где $I(|e_k^-|)$, $I(|e_k^+|)$ – характеристические функции, определяемые выражением

$$I(e) = \begin{cases} 1, & \text{при } e > 0, \\ 0, & \text{при } e \leq 0. \end{cases}$$

Характеристические функции $I(|e_k^-|)$, $I(|e_k^+|)$

определяют входжение соответствующих слагаемых в состав выражения критерия (23) в зависимости от знака ошибок (24) и удовлетворяют условию

$$I(|e_k^-|) \cdot I(|e_k^+|) = 0.$$

Соотношения (25) определяют систему алгебраических уравнений, которые на основе эквивалентных преобразований можно привести к каноническому виду

$$\sum_{j=0}^n g_{ij} a_j = d_i, \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad (26)$$

$$g_{ij} = s_r^2 \sum_k I(|e_k^-|) x_{ik} x_{jk} + s_{ш}^2 \sum_k I(|e_k^+|) x_{ik} x_{jk},$$

$$d_i = s_r^2 \sum_k I(|e_k^-|) y_k x_{ik} + s_{ш}^2 \sum_k I(|e_k^+|) y_k x_{ik}.$$

При фиксированных значениях характеристических функций $I(|e_k^-|)$, $I(|e_k^+|)$ система уравнений (26) будет линейной и может быть решена известными методами. В результате для полученного решения значения характеристических функций $I(|e_k^-|)$, $I(|e_k^+|)$ могут быть пересчитаны.

Дальнейшее решение нелинейной задачи осуществляется итерационно на основе последовательных

решений системы линейных алгебраических уравнений (26) с последующим пересчетом значений характеристических функций. Описанный решающий процесс реализует метод наискорейшего спуска минимизации целевой функции (23). Если решающий процесс сходится, то он сходится к искомому решению.

Выводы

1. Разработан метод построения оперативных упреждающих оценок показателей энергетической эффективности процессов, основанный на использовании обратных моделей динамики технологических объектов управления. Использование указанных оценок в системах адаптивного управления технологическими процессами позволяет в оперативном режиме организовать оптимизацию управления по критериям максимума показателей энергетической эффективности с учетом динамики процессов потребления энергетических ресурсов и выработки продукции.

2. Для решения задач прогнозирования состояния технологического оборудования с пози-

ции системного подхода наряду с используемыми частными показателями работоспособности объектов контроля предложено дополнительно использовать показатель обобщенного остаточного ресурса, который интегрально оценивает текущее состояние объектов контроля. Исследование динамики обобщенного остаточного ресурса по данным эксплуатации позволяет прогнозировать предаварийные состояния объектов контроля и организовать ремонтно-профилактические работы объектов по текущему состоянию.

Литература

1. Горелик, С.И. Прогнозирование случайных колебательных процессов на основе метода экспоненциального сглаживания / С.И. Горелик, Л.С. Казаринов // *Автоматика и телемеханика. РАН.* — 1994. - №10. - С. 27-34.

2. *Автоматизированные системы управления в энергосбережении (опыт разработки): моногр. / под ред. Л.С. Казаринова.* — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ: Издатель Т. Лурье, 2010.

Поступила в редакцию 6 июня 2010 г.