

DOI:

АДАПТИВНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ НОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Цыганов В.В.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва
ул. Профсоюзная д.65
bbc@ipu.ru*

Аннотация: Исследуются механизмы энергосбережения в двухуровневой системе, на верхнем уровне которой находится центр, а на нижнем – производственное предприятие. При этом центру неизвестны возможности энергосбережения предприятия. Найдены условия синтеза процедур нормирования и стимулирования, обеспечивающие адаптивную идентификацию потенциала энергосбережения предприятия. Эти условия проиллюстрированы на примере энергосбережения в холдинге «РЖД».

Ключевые слова: железная дорога, энергозатраты, управление, активность, нормирование, стимулирование.

Введение

В условиях роста затрат на энергию, крупномасштабному холдингу необходима система снижения энергозатрат его предприятий. Например, в холдинге «РЖД» создана многоуровневая система энергетического менеджмента (СЭнМ), интегрированная в общую систему управления производственной деятельностью [1]. Цель - максимально рациональное использование топливно-энергетических ресурсов во всех сферах деятельности холдинга для повышения экономической эффективности железнодорожных перевозок на основе использования возможностей снижения энергозатрат и внедрения инновационных технических средств и технологий, при обеспечении надежности энергоснабжения и снижении негативного воздействия на окружающую среду.

На корпоративном уровне холдинга «РЖД» функционирует Управление планирования и нормирования материально-технических ресурсов, а на региональном – топливно-энергетические центры железных дорог (кратко - ТЭЦ), осуществляющие функции управления энергозатратами подчиненных региональных предприятий железнодорожного транспорта (кратко - линейных предприятий). На каждом уровне назначены руководители, ответственные за СЭнМ, реализацию Энергетической стратегии холдинга «РЖД» [2], выполнение программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности ОАО «РЖД» [3], с учетом указаний Федеральной службы тарифов. Первое направление работ - снижение энергозатрат перевозочного процесса за счет:

- совершенствования методов управления движением поездов;
- повышения показателей использования локомотивов и показателей системы тягового электроснабжения;
- улучшения технического состояния подвижного состава и путевого хозяйства;
- повышения уровня возврата энергии рекуперации на электрической тяге.

Второе направление работ - снижение затрат энергоресурсов в стационарной энергетике и на другие нетяговые нужды за счет:

- модернизации и оптимизации режимов работы систем отопления;
- оптимизации режимов работы систем освещения;
- снижения энергетической эффективности технологических процессов.

Важнейшим аспектом снижения энергозатрат является раскрытие внутренних резервов и ресурсов линейных предприятий в этой сфере. Это определяет актуальность математического моделирования организационных механизмов снижения энергозатрат с учетом человеческого фактора. Подобные проблемы отраслевого управления рассматривались в теории активных систем [4], ставшей основой для соответствующих прикладных исследований. Так, иерархические и сетевые структуры внедрения энергоэффективных технологий на железнодорожном транспорте рассматривались в работе [5]. Механизмы их функционирования предложены в работе [6]. Комплекс механизмов управления разработкой и внедрением энергоэффективных средств и технологий на железнодорожном транспорте разработан в [7].

В последние годы все большее значение приобретают механизмы функционирования организационных систем с элементами искусственного интеллекта, предназначенные для воспроизведения простых ментальных и поведенческих функций человека в условиях неопределенности. В работе [8] рассматривался важный их подкласс – механизмы наставничества,

основанные на обучении с учителем. В работе [9] этот подход использовался для обучения энергоэффективности на цифровом железнодорожном транспорте.

В настоящей работе рассматриваются другой важный подкласс механизмов функционирования организационных систем с элементами искусственного интеллекта, использующих процедуры адаптивной идентификации в условиях неопределенности. При этом исследуются проблемы энергосбережения в двухуровневой активной системе, на верхнем уровне которой находится управляющий орган (центр), а на нижнем – производственное предприятие, как активный элемент (АЭ).

1 Состояние и потенциал активной системы

Рассмотрим двухуровневую активную систему, на верхнем уровне которой находится центр, а на нижнем - АЭ. Состояние (энергозатраты) АЭ в периоде t характеризует величина $y_t \in R^1$. На вход АЭ в периоде t подается известное воздействие (например, ресурс инновационных технических средств и технологий энергосбережения) $r_t \in Q_t \subset R^M$. Кроме того, АЭ подвергается неизвестному центру воздействию внешней среды (например, случайные помехи погоды). При этом

$$(1) \quad y_t \in Y_t(p_t) = [z_t, \infty), \quad z_t = W_t(p_t), \quad p_t = (\zeta_t, r_t), \quad \zeta_t \in \Xi_t \subset R^S, \quad p_t \in P_t = \Xi_t \cup Q_t, \quad t=1,2,\dots,$$

где $Y_t(p_t)$ - множество допустимых состояний АЭ, $p_t = (\zeta_t, r_t)$ - параметр множества допустимых состояний АЭ, z_t^i — минимальное энергопотребление (потенциал) АЭ, ζ_t - эндогенный параметр АЭ, характеризующий влияние внешней среды.

1.1 Настройка модели потенциала системы

Как следует из вышесказанного, потенциал z_t зависит от параметра АЭ ζ_t , неизвестного центру. Поэтому, чтобы управлять АЭ, центру нужна настраиваемая модель потенциала АЭ. Модели такого рода широко используются в технических системах [10].

Предположим вначале, что центру известен потенциал z_t (например, АЭ раскрывает свой потенциал: $y_t = z_t$, так что наблюдаемое центром состояние АЭ y_t совпадает с z_t). Для настройки модели потенциала АЭ центр может воспользоваться типовыми алгоритмами, разработанными в теории оптимальной идентификации [10]. Именно, полагая, что АЭ функционирует в стационарном режиме (или режиме нормальной работы) [10], рассмотрим настраиваемую модель его потенциала:

$$\hat{z}_t = c_{t-1} q(r_t), \quad c_0 = c^0, \quad 0 < q(r_t) \leq 1, \quad t = 1, 2, \dots,$$

где c_t — настраиваемый параметр модели потенциала АЭ в периоде t , $q(r_t)$ - монотонно убывающая функция r_t .

Предположим, что целью центра является минимизация средних потерь идентификации $L(c) = M_\zeta \{ \Phi_z(t) \}$, где функция потерь $\Phi_z(t) \equiv \Phi(z_t - \hat{z}_t)$ - выпуклая дважды дифференцируемая функция невязки $\delta_t = z_t - \hat{z}_t$ в периоде t , M_ζ — оператор математического ожидания – усреднения по всем реализациям случайного параметра АЭ ζ_t . В соответствии с общим подходом [10], обозначим

через $L_t(c, z^t) = (\sum_{\tau=1}^t \Phi_z(\tau) |_{c_{\tau-1}=c}) / t$ эмпирические средние потери, характеризующие качество

идентификации, $z^t = (z_1, \dots, z_t)$. Тогда оптимальная выборочная оценка параметра модели потенциала АЭ

$$(2) \quad \hat{c}_t = \arg \min_c L_t(c, z^t) = \hat{c}_{t-1} - \gamma_t \frac{\partial \Phi_z(t)}{\partial c} \equiv I_t(\hat{c}_{t-1}, r_t, z_t), \quad t = 1, 2, \dots, \quad \hat{c}_0 = c^0,$$

где γ_t - коэффициент усиления, выбираемый так, чтобы оценка (2) сходилась к оптимальной оценке c^* :

$$(3) \quad \hat{c}_t = \arg \min_c L_t(c, z^t) \rightarrow_t c^* = \arg \min_c L(c), \quad 0 < \gamma_{t+1} < \gamma_t < 1.$$

1.2 Активность и проблема идентификации потенциала

В принципе, оценки, получаемые с помощью процедуры (2), могут использоваться для определения параметров модели потенциала энергосбережения предприятия. Однако, на практике, управляющий орган отнюдь не всегда имеет полную информацию о всех возможностях энергосбережения на подведомственном предприятии. Вследствие этого, центр вынужден опираться на информацию, поступающую от самого предприятия. Этим может воспользоваться дальновидный персонал предприятия, чтобы увеличить свои доходы.

Соответственно, предположим, что АЭ может влиять на оценку, получаемую с помощью процедуры (2), манипулируя своим выходным показателем y_t . При этом наблюдаемый центром показатель y_t может не совпадать с потенциалом z_t (т.е. $y_t \neq z_t$). Тогда центр, использующий процедуру (2), получает, вместо параметра c_t , его оценку a_t :

$$(4) \quad a_t = \arg \min_a L_t(a, y^t) = a_{t-1} - \gamma_t \nabla_a \Phi_y(t) \equiv I_t(a_{t-1}, r_t, y^t), \quad \Phi_y(t) \equiv \Phi(y_t - \hat{y}_t),$$

где $\hat{y}_t = a_{t-1} q(r_t)$ – настраиваемая функция энергозатрат АЭ в периоде t . $y^t = (y_1, \dots, y_t)$, $t = 1, 2, \dots$, $a_0 = c^0$.

Суммарное энергопотребление АЭ характеризует скаляр y_t , $t = 1, 2, \dots$. При $y_t \neq z_t$, оценка a_t не сходится к оптимальному параметру c^* . Возникает задача построения механизма функционирования АЭ, обеспечивающего такую сходимость:

$$(5) \quad a_t = I_t(a_{t-1}, r_t, y^t) \xrightarrow{t} c^*$$

2 Механизм Функционирование активной системы

Для управления энергосбережением АЭ, центр создает соответствующий механизм функционирования (рис.1).

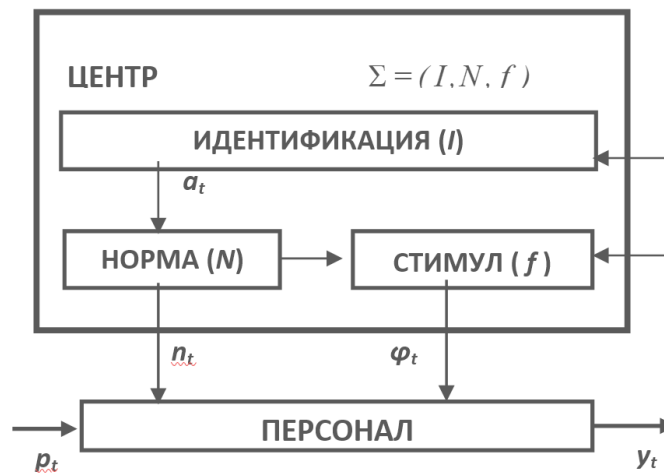


Рис.1. Механизм функционирования активной системы

Рассмотрим порядок функционирования АЭ в периоде t , $t = 1, 2, \dots$. В начале этого периода центру и АЭ становится известна оценка a_{t-1} , ресурс r_t и настраиваемая функция энергозатрат $\hat{y}_t = a_{t-1} q(r_t)$. На основе этого центр назначает норму энергозатрат АЭ:

$$(6) \quad n_t = k_t \hat{y}_t, \quad k_t \in K_t \subset (0, 1], \quad t = 1, 2, \dots$$

где k_t – коэффициент снижения нормы энергозатрат в периоде t . Процедуру определения нормы энергозатрат АЭ (6) будем называть процедурой нормирования, и обозначать символом N .

Далее, АЭ становится известна реализация - конкретное значение параметра ζ_t в периоде t . Тем самым, ему становится известен параметр множества допустимых состояний АЭ (p_t). Исходя из этого, АЭ выбирает состояние $y_t \in Y_t(p_t)$, которое становится известно центру. Далее, в зависимости от выполнения нормы n_t , центр назначает АЭ стимул

$$(7) \quad \varphi_t = f(n_t, y_t) \in R^1, \quad \frac{\partial f(n_t, y_t)}{\partial y_t} \leq 0, \quad \frac{\partial f(n_t, y_t)}{\partial n_t} > 0,$$

где $f(n_t, y_t)$ - процедура стимулирования АЭ за снижение энергозатрат.

В конце периода t центр формирует оценку a_t с помощью рекуррентной процедуры (4):

$$(8) \quad a_t = I_t(a_{t-1}, r_t, y^t), \quad a_0 = c^0, \quad y^t = (y_1, \dots, y_t), \quad t = 1, 2, \dots$$

Совокупность процедур идентификации (8), нормирования (6) и стимулирования (7) называется адаптивным механизмом функционирования АЭ (кратко - АМФ) и обозначается $\Sigma = (I, N, f)$.

3 Решение игры активного элемента с центром

Рассмотрим игру АЭ с центром, как некооперативную дискретную игру с ненулевой суммой и неполной информацией. Именно, будем предполагать, что в периоде t АЭ стремится к увеличению суммы дисконтированных стимулов (7):

$$(9) \quad V_t = \sum_{\tau=t}^{t+T} \rho^{\tau-t} \varphi_\tau, \quad 0 < \rho < 1, \quad t = 1, 2, \dots,$$

где ρ - коэффициент дисконтирования, T - дальновидность АЭ. Однако в периоде t АЭ не знает будущих стимулов φ_τ , $\tau = \overline{t+1, t+T}$.

Предположим, что для оценки величины (9) в периоде t , в условиях неопределенности стимулов φ_τ в будущих периодах τ , $\tau = \overline{t+1, t+T}$, АЭ использует свои прогнозы множеств возможных параметров P_τ , коэффициентов усиления норм энергозатрат k_τ и состояний АЭ $Y_\tau(p_\tau)$, $\tau = \overline{t+1, t+T}$. Тогда при выборе состояния y_t , в условиях неопределенности, АЭ ориентируется на максимальную гарантированную величину целевой функции (9) при этих прогнозах:

$$(10) \quad v_t(n_t, y_t) = \min_{p_{t+1} \in P_{t+1}} \min_{k_{t+1} \in K_{t+1}} \max_{y_{t+1} \in Y_{t+1}(p_{t+1})} \dots \min_{p_{t+T} \in P_{t+T}} \min_{k_{t+T} \in K_{t+T}} \max_{y_{t+T} \in Y_{t+T}(p_{t+T})} V_t$$

В качестве решения игры АЭ, рассмотрим равновесие Нэша. Тогда множество решений игры, как состояний АЭ, максимизирующих гарантированную величину целевой функции АЭ (10), имеет вид

$$(11) \quad R_t(\Sigma, p_t) = \{ y_t^* \in Y(p_t) / v_t(x_t, y_t^*) \geq v_t(x_t, y_t), \quad y_t \in Y_t(p_t) \}.$$

Будем также предполагать справедливость гипотезы благожелательности АЭ по отношению к центру: если $z_t \in R_t(\Sigma, p_t)$, то $y_t^* = z_t$, $t = 1, 2, \dots$. Содержательно она означает, что АЭ не занижает свои показатели, если ему это не выгодно.

4 Условия идентификации потенциала энергосбережения

В силу (3) и (4), если $y_t^* = z_t, t=1,2,\dots$, то АМФ $\Sigma = (I, N, f)$ решает задачу (5), обеспечивая идентификацию параметров модели потенциала энергосбережения АЭ. Но для этого центру надо предварительно установить подходящий АМФ $\Sigma = (I, N, f)$.

Без ограничения общности, будем считать период, в котором центр устанавливает АМФ $\Sigma = (I, N, f)$, нулевым, и обозначать как $t=0$. Чтобы выбрать подходящий АМФ $\Sigma = (I, N, f)$, центру необходимо иметь прогноз последствий его установления, в виде будущих решений игры АЭ с центром (11). В свою очередь, как видно из (10), для этого нужно устранить неопределенности в отношении норм энергозатрат, параметров и состояний АЭ, в каждом из будущих периодов $t, t=1,2,\dots$.

Введем оператор $D_t y_t$, осуществляющий последовательно следующие операции с дифференцируемой функцией $A(\dots, y_t)$ (такой, как V_t):

- дифференцирование функции $A(\dots, y_t)$ по переменной y_t ;

- устранение неопределенности полученной производной $\frac{\partial A(\dots, y_t)}{\partial y_t}$ в отношении норм

энергозатрат, параметров и состояний АЭ, предшествующих назначению a_t , на основе принципа гарантированного результата.

Формально этот оператор имеет следующий вид:

$$(12) \quad D_t y_t = \max_{p_t \in P_t} \max_{k_t \in K_t} \max_{y_t \in Y_t(p_t)} \dots \max_{p_1 \in P_1} \max_{k_1 \in K_1} \max_{y_1 \in Y_1(p_1)} \frac{\partial}{\partial y_t}, \quad t=1,2,\dots$$

Введем также оператор $B_t u$, сконструированный подобно (12):

$$(13) \quad B_t u = \max_{\tau=t+1, t+T} \max_{p_\tau \in P_\tau} \max_{k_\tau \in K_\tau} \max_{y_\tau \in Y_\tau(p_\tau)} \dots \max_{p_1 \in P_1} \max_{k_1 \in K_1} \max_{y_1 \in Y_1(p_1)} \frac{\partial}{\partial u},$$

Содержательно, оператор $B_t u$ устраняет неопределенность производной по u на всем горизонте дальновидности T . Эта неопределенность обусловлена неизвестностью норм энергозатрат, параметров и состояний АЭ, следующих за выбором u_t , на этом горизонте.

Используя операторы (12) и (13), обозначим:

$$(14) \quad g_t = D_t y_t \left[- \frac{\partial \Phi_{y(t)}}{\partial a_{t-1}} \right], \quad F_t = B_t n_t \varphi_\tau, \quad h_t = B_t a_{\tau-1} \left[- \frac{\partial \Phi_{y(\tau)}}{\partial a_{\tau-1}} \right]$$

Теорема. АМФ $\Sigma = (I, N, f)$ решает задачу идентификации потенциала АЭ, если

$$(15) \quad k^t b_t \leq u_t, \quad k^t = \max_{\tau=t+1, t+T} k_\tau, \quad b_t = g_t q_t \gamma_t \rho \{ 1 - [\rho(1 + \gamma_t h_t)]^T \} / [1 - \rho(1 + \gamma_t h_t)],$$

$$q_t = \max_{\tau=t+1, t+T} \max_{r_\tau \in Q_\tau} q(r_\tau), \quad u_t = - D_t y_t \varphi_t / F_t, \quad t=1,2,\dots$$

Доказательство. Дифференцируя V_t по y_t , согласно (9), получаем:

$$(16) \quad \frac{\partial V_t}{\partial y_t} = \frac{\partial \varphi_t}{\partial y_t} + \sum_{\tau=t+1}^{t+T} \rho^{\tau-t} \frac{\partial \varphi_\tau}{\partial n_\tau} \frac{\partial n_\tau}{\partial a_{\tau-1}} \frac{\partial a_{\tau-1}}{\partial y_t}.$$

Подставляя выражение для a_t из (4) в (16), и используя (4) как рекуррентное соотношение, нетрудно получить, что

$$(17) \quad \frac{\partial V_t}{\partial y_t} = \frac{\partial \varphi_t}{\partial y_t} + \gamma_t W_t \sum_{\tau=t+1}^{t+T} \rho^{\tau-t} \frac{\partial \varphi_\tau}{\partial y_\tau} k_\tau q(r_\tau) \prod_{\sigma=t+1}^{\tau-1} (1 - \gamma_\sigma S_\sigma),$$

где $S_\sigma = \frac{\partial^2 \Phi_y(\sigma)}{\partial a_{\sigma-1}^2}$, - вторая производная функции $\Phi_y(\sigma) = \Phi(y_\sigma - \hat{y}_\sigma)$ по $a_{\sigma-1}$, определяемая

$$\text{согласно (4), } W_t = -\frac{\partial^2 \Phi_y(t)}{\partial a_{t-1} \partial y_t}.$$

Рассмотрим знаки и оценки слагаемых в (17). Согласно (7), первое слагаемое $\frac{\partial \varphi_t}{\partial y_t} \leq 0$. В соответствии с (12) и (14), при любых допустимых предшествующих параметрах $p_\mu \in P_\mu$, коэффициентах $k_\mu \in K_\mu$ и состояниях $y_\mu \in Y_\mu(p_\mu)$, $\mu = \overline{1, t}$, выполняется

$$(18) \quad \frac{\partial \varphi_t}{\partial y_t} \leq D_t y_t \varphi_t.$$

Определим теперь знак второго слагаемого в (17). В силу (3), $\gamma_t > 0$. Далее, $\Phi_y(\sigma) = \Phi(y_\sigma - \hat{y}_\sigma)$ - выпуклая дважды дифференцируемая функция невязки $\beta_\sigma = (y_\sigma - \hat{y}_\sigma)$, где $\hat{y}_\sigma = a_{\sigma-1} q(r_\sigma)$. Поэтому $W_t = -\frac{\partial^2 \Phi_y(t)}{\partial a_{\sigma-1} \partial y_\sigma} = q(r_\sigma) \frac{\partial^2 \Phi(\beta_t)}{\partial \beta_t^2} > 0$. Кроме того, $S_\sigma = \frac{\partial^2 \Phi(\sigma)}{\partial a_{\sigma-1}^2} = q^2(r_\sigma) > 0$. В силу (6) $\frac{\partial n_\tau}{\partial a_{\tau-1}} > 0$, а в силу (7) $\frac{\partial \varphi_t}{\partial n_t} > 0$. Далее, поскольку $0 < q(r_\sigma) \leq 1$, имеем $q^2(r_\sigma) \leq 1$, так что $S_\sigma \leq 1$. Учитывая, что

$\gamma_\sigma < 1$, получаем, что все произведения $\prod_{\sigma=t+1}^{\tau-1} (1 - \gamma_\sigma S_\sigma)$ положительны при $\tau = \overline{t+1, t+T}$.

Следовательно, учитывая знаки всех этих сомножителей, получаем, что второе слагаемое в (17) положительно.

Отсюда, используя определения (12)-(14) и условие $\gamma_t > \gamma_{t+1}$ (3), нетрудно показать, что при любых допустимых предшествующих параметрах $p_\mu \in P_\mu$, коэффициентах $k_\mu \in K_\mu$ и состояниях $y_\mu \in Y_\mu(p_\mu)$, $\mu = \overline{1, t}$, а также при любых допустимых будущих параметрах $p_l \in P_l$, коэффициентах $k_l \in K_l$ и состояниях $y_l \in Y_l(p_l)$, $l = \overline{t+1, t+T}$, справедливо:

$$(19) \quad \gamma_t W_t \sum_{\tau=t+1}^{t+T} \rho^{\tau-t} \frac{\partial \varphi_\tau}{\partial n_\tau} k_\tau q(r_\tau) \prod_{\sigma=t+1}^{\tau-1} (1 - \gamma_\sigma S_\sigma) \leq F_t k^t b_t, \quad t = 1, 2, \dots$$

где b_t определяется согласно (15). Суммируя неравенства (18) и (19), получаем, с учетом (17):

$$(20) \quad \frac{\partial V_t}{\partial y_t} \leq D_t y_t \varphi_t + F_t k^t b_t.$$

С другой стороны, из условия теоремы (15) $-u_t + k^t b_t \leq 0$. Умножая обе части последнего неравенства на F_t и учитывая, что $F_t > 0$ согласно (7) и (14), получаем $D_t y_t \varphi_t + F_t k^t b_t \leq 0$. Отсюда, с учетом (20), получаем $\frac{\partial V_t}{\partial y_t} \leq 0$. Поэтому V_t - невозрастающая функция y_t при любых прошлых и будущих допустимых состояниях и параметрах. Поэтому, согласно (10), максимум $v_t(x_t, y_t)$ достигается при $y_t = z_t$. Поэтому, в соответствии с (11), $z_t \in R_t(\Sigma, p_t)$. Но тогда, в силу гипотезы благожелательности АЭ по отношению к центру, имеем $y_t^* = z_t$, $t = 1, 2, \dots$. Следовательно, АМФ $\Sigma = (I, N, f)$ решает задачу (5), обеспечивая идентификацию параметров модели потенциала АЭ, ч.т.д.

Содержательно, использованный при доказательстве теоремы метод поиска точки равновесия Нэша основан на том, что целевая функция АЭ монотонно возрастает по его состоянию y_t на

множествах возможных текущих и будущих параметров и состояний АЭ, если выполняется неравенство (15). Поскольку условия (13)-(15) налагают конкретные ограничения на процедуры идентификации (I), нормирования (N) и стимулирования (f) в АМФ $\Sigma = (I, N, f)$, теорема создает основу для практической реализации (5), т.е. идентификации параметров модели потенциала АЭ. Таким образом, теорема позволяет решать задачи построения процедур нормирования энергозатрат.

5 Процедура нормирования при квадратичной функции потерь

Рассмотрим, какими свойствами должна обладать процедура нормирования энергозатрат (N) для удовлетворения условиям теоремы, при заданных процедурах идентификации (I) и стимулирования (f). Если функция потерь квадратична: $\Phi(t) = (y_t - \hat{y}_t)^2 / 2$, то процедура идентификации, согласно (4), линейна:

$$(21) \quad a_t = a_{t-1} + \gamma_t q(r_t) [y_t - a_t q(r_t)], \quad a_0 = c^0, \quad t = 1, 2, \dots$$

Тогда, используя (6) и (12)-(14), нетрудно показать, что условие (15) в рассматриваемом случае можно преобразовать к виду:

$$(22) \quad k^t d_t \leq u_t, \quad d_t = q_t \hat{q}_t \gamma_t \rho \{ 1 - [\rho(1 - \gamma_t \underline{q}_t^2)]^T \} / [1 - \rho(1 - \gamma_t \underline{q}_t^2)],$$

$$\hat{q}_t = \max_{r_t \in Q_t} q(r_t), \quad \underline{q}_t^2 = \min_{\tau=t+1, t+T} \min_{r_\tau \in Q_\tau} q^2(r_\tau), \quad t = 1, 2, \dots$$

Таким образом, справедливо

Следствие. При квадратичной функции потерь, АМФ $\Sigma = (I, N, f)$ с линейной процедурой (21) решает задачу идентификации потенциала АЭ, если выполняется (22).

Содержательно, это следствие устанавливает ограничения на коэффициенты усиления k_t , $t = 1, 2, \dots$, в виде неравенств (22).

Учитывая, что

$$\gamma_{t+1} < \gamma_t < 1, \quad q(r_t) \leq 1, \quad \underline{q}_t^2 = \min_{\tau=t+1, t+T} \min_{r_\tau \in Q_\tau} q^2(r_\tau),$$

полезно рассмотреть случай малости параметров $\gamma_t \underline{q}_t^2$: $\gamma_t \underline{q}_t^2 \ll 1$, $t = 1, 2, \dots$. Последнее сильное неравенство возможно, в частности, при малых коэффициентах γ_t в процедуре идентификации (21), недостатке ресурсов r_t или неэффективном их использовании, т.е. малости функции $q(r_t)$. В предельном случае, полагая в (22) $\gamma_t \underline{q}_t^2 = 0$, получаем достаточные условия идентификации потенциала АЭ в виде:

$$(23) \quad k^t w_t \leq u_t, \quad w_t = q_t \hat{q}_t \gamma_t \rho (1 - \rho^T) / (1 - \rho), \quad t = 1, 2, \dots$$

Предположим, что процедура стимулирования (7) линейна:

$$(24) \quad f(n_t, y_t) = s(n_t - y_t) + const, \quad s > 0, \quad t = 1, 2, \dots$$

Тогда, учитывая (12)-(14), получаем, что условие (23) приобретает вид:

$$(25) \quad k^t w_t \leq 1, \quad t = 1, 2, \dots$$

Содержательно, для синтеза идентификации потенциала АЭ достаточно выбрать коэффициенты усиления k_t , удовлетворяющие (25).

6 Пример: нормирование энергозатрат на региональной железной дороге

В условиях неопределенности, реальные механизмы энергосбережения СЭнМ основаны, как правило, на адаптивных процедурах нормирования «от достигнутого» [6,7]. При этом важно, чтобы эти механизмы учитывали человеческий фактор, заинтересовывали производственный персонал в сокращении энергозатрат.

Теорема и следствие определяют принципиальные условия для стремления производственного персонала к раскрытию потенциала энергосбережения. Именно, при выполнении условия (14), (22), (23) и (25), гарантированные величины стимулов (7) и целевой функции (10) производственного персонала растут при экономии энергоресурсов. Таким образом, при выполнении условий теоремы и следствия, персонал заинтересован в снижении энергозатрат до минимального уровня. Это дает возможность идентификации и прогнозирования потенциала энергосбережения предприятия.

При этом условия (14), (22), (23) и (25) ограничивают параметры процедур идентификации (I), нормирования (N) и стимулирования (f). В частности, при заданных процедурах идентификации (I) и стимулирования (f), эти условия налагают конкретные ограничения на процедуру нормирования N . Содержательно это означает, что указанные условия требуют ограниченных темпов снижения норм при уменьшении фактических энергозатрат. Ведь, при слишком высоких темпах снижения норм «от достигнутого», теряется заинтересованность персонала в снижении энергозатрат. Таким образом, Центр должен задавать нормы энергозатрат, которые, однако, не должны слишком быстро снижаться при успешной работе персонала. Например, при квадратичной функции потерь идентификации, эти ограничения могут иметь вид (22), (23) или (25).

Рассмотрим применение такого подхода к снижению энергозатрат на региональной железной дороге, осуществляемому согласно Программе энергосбережения и повышения энергетической эффективности ОАО «РЖД» [3]. При этом управляющие решения принимает руководитель ТЭЦ, ответственный за достижения показателей указанной программы в регионе [5,6]. Он выступает в роли центра, наблюдая фактическую величину энергозатрат на подведомственном предприятии (y_i). В его распоряжении имеется механизм энергосбережения на этом предприятии $\Sigma = (I, N, f)$ с линейной процедурой идентификации (21), нормирования (6) и стимулирования (24).

В соответствии с Программой [3], снижение энергозатрат на региональной железной дороге проводится, в основном, за счет раскрытия внутренних резервов. Соответственно, можно предположить малость централизованно выделяемых ресурсов r_i на снижение энергозатрат. В предельном случае $\gamma_i q_i^2 = 0$, получаем достаточные условия идентификации в виде (23). Если же процедура стимулирования линейна, то эти условия приобретают вид (25). Теперь руководитель ТЭЦ, зная численные значения $a^0, r_i, s, k^t, q_t, q_t, \rho, T$, и используя коэффициенты γ_i из подходящего алгоритма идентификации [10], может рассчитывать нормы и стимулы АЭ, позволяющие идентифицировать потенциал энергозатрат. Этот пример иллюстрирует прозрачность предлагаемых процедур идентификации, нормирования и стимулирования энергосбережения предприятия, а также практическую применимость разработанных условий идентификации (14), (22), (23) и (25).

Заключение

В работе рассмотрена задача идентификации потенциала энергосбережения в случае, когда управляющему органу (центру) неизвестны случайные его характеристики. Исследован случай асимметричной осведомленности центра и производственного персонала о стохастическом потенциале энергосбережения. Для определения оптимального параметра правила принятия решения центром, предлагается использовать соответствующую оптимальную процедуру идентификации. При этом персонал, как дальновидный элемент, может выбирать свои показатели так, чтобы максимизировать собственную целевую функцию. Такая нежелательная активность персонала может приводить к неиспользованию имеющегося потенциала энергосбережения. Следствием этого является искажение оценок, получаемых при использовании даже оптимальной процедуры идентификации. Решение этих проблем рассмотрено при линейной процедуре адаптивного нормирования. Предложен механизм энергосбережения, регламентирующий поведение и взаимодействие управляющего органа и предприятия в условиях неопределенности. Результатами их функционирования являются количественные оценки, нормативы и стимулы. Найдены достаточные условия синтеза механизма с линейной процедурой адаптивного нормирования, при котором центр может определить оптимальные параметры правила принятия решения и потенциал энергосбережения. Эти условия

проиллюстрированы на примере энергосбережения при реализации программы экономии топливно-энергетических ресурсов при железнодорожных перевозках холдинга «РЖД».

Литература

1. Стандарт ОАО «РЖД» «Система управления энергоэффективностью производственных процессов. Основные положения СТО РЖД 08.017-2012»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 24 декабря 2012 г. № 2674р.
2. Стандарт ОАО «РЖД» «Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р.
3. Программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности ОАО «РЖД» на 2016-2018 годы. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 29 апреля 2016 года № 807р.
4. *Цыганов В. В.* Адаптивные механизмы в отраслевом управлении. – М.: Наука, 1991. – 166с.
5. *Цыганов В.В., Адамец Д.Ю.* Иерархические и сетевые структуры внедрения энергоэффективных технологий на железнодорожном транспорте / Труды XII Международной конференции «Современные сложные системы управления». Липецк: ЛГТУ, 2017. – Т. 2. – С. 194–199.
6. *Цыганов В.В., Басыров С.К.* Структуры и механизмы внедрения средств и технологий энергозатрат на железнодорожном транспорте / Труды 6-й конф. «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование». М.: ОАО НИИАС. 2017. – С. 185–190.
7. *Цыганов В.В., Адамец Д.Ю.* Комплекс механизмов управления разработкой и внедрением энергоэффективных средств и технологий на железнодорожном транспорте / Труды 7-й конф. «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование». М. : ОАО НИИАС. 2018. – С. 214–219.
8. *Цыганов В.В., Федянин Д.Н.* Механизмы наставничества в организационных системах и повышение энергоэффективности железнодорожного транспорта // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2019. № 3 (43). – С. 55-66.
9. *Цыганов В.В., Басыров С.К., Ковалев С.М.* Механизм обучения энергоэффективности на цифровом железнодорожном транспорте / Труды 8-й конф. «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование». М.: НИИАС, 2019. – С. 203–207.
10. *Цыткин Я. З.* Основы информационной теории идентификации. – М.: Наука, 1984. – 320 с.