

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЭС¹ (Часть вторая)

Докт. техн. наук, проф. КУЛАКОВ Г. Т., КРАВЧЕНКО В. В., канд. техн. наук МАКОСКО Ю. В.

Белорусский национальный технический университет

Модернизация систем автоматического регулирования (САР) процесса горения, а также температуры перегретого первичного и вторичного пара приводит к улучшению условий работы металла энергооборудования за счет уменьшения уровня колебаний и отклонений фактических значений температур металла от расчетных. В результате повышается долговечность поверхностей нагрева, которая определяется сроком службы до полной замены. Поскольку модернизация САР производится после того, как энергоблок уже проработал определенное время, то вначале необходимо определить срок службы поверхностей нагрева с момента модернизации при базовом и новом вариантах. Его увеличение отодвигает сроки вложения капитальных затрат на замену разрушенных поверхностей нагрева. Возникающую при этом экономию $\Delta K_{\text{сл}}$ определяют по формуле [1]

$$\Delta K_{\text{сл}} = \alpha \sum_i^n c_{m,i} G_{m,i} (1,08^{-\tau_{\text{сл},i}^{\text{б}}} - 1,08^{-\tau_{\text{сл},i}^{\text{н}}}), \quad (1)$$

где α – коэффициент, учитывающий затраты на изготовление и монтаж узла ($\alpha = 1,8$); $c_{m,i}$ – удельная стоимость i -го участка поверхности нагрева; $G_{m,i}$ – масса i -го узла; $\tau_{\text{сл},i}^{\text{б(н)}}$ – время, которое остается до истечения срока службы i -го элемента, узла или агрегата в базовом «б» и модернизированном «н» вариантах; n – число участков поверхностей нагрева.

Экономия от изменения величины предотвращенного ущерба от недоотпуска электроэнергии ($\Delta Z_{\text{нед}}$) потребителям обусловлена повышением надежности работы технологического оборудования на ТЭС, что, в свою очередь,

повышает надежность электроснабжения потребителей в энергосистеме

$$\Delta Z_{\text{нед}} = \Delta W_{\text{нед}} c_{\text{н}}, \quad (2)$$

где $\Delta W_{\text{нед}}$ – изменение среднегодового недоотпуска электроэнергии потребителю; $c_{\text{н}}$ – стоимость 1 кВт·ч недоотпущенной электроэнергии.

Экономия от изменения надежности работы технологического оборудования, отказ которого ведет к останову блока, обусловлена изменением затрат на выработку электроэнергии в энергосистеме и на ТЭС, где проведена модернизация САР, на восстановительный ремонт, на пуски основного и резервного энергоблоков [2]

$$\Delta Z_{\text{нт}}^{\text{о}} = \Delta w_{\text{то}} [N_{\text{ср}} (\tau_{\text{н1}} - \tau_{\text{н}}^{\text{рез}}) (s_{\text{тс}} - s_{\text{т}}) + \tau_{\text{н1}} \Pi_{\text{р1}} + B_{\text{н1}} \Pi_{\text{т}} + B_{\text{рез}} \Pi_{\text{т}}^{\text{рез}}], \quad (3)$$

где $\Delta w_{\text{то}}$ – изменение среднегодового числа отказов технологического оборудования, приводящих к останову энергоблока, 1/год; $N_{\text{ср}}$ – средневзвешенная годовая нагрузка энергоблока; $\tau_{\text{н1}}$ – среднее время простоя блока из-за отказа технологического оборудования, ч; $\tau_{\text{н}}^{\text{рез}}$ – среднее время пуска резервного энергоблока, ч; $B_{\text{н1}}$ – расход топлива на пуск основного энергоблока после простоя в течение $\tau_{\text{н1}}$ часов, т у. т.; $B_{\text{рез}}$ – средний расход топлива на пуск резервного энергоблока, т у. т.; $\Pi_{\text{т}}$, $\Pi_{\text{т}}^{\text{рез}}$ – соответственно цена 1 т растопочного топлива (франко-станция назначения) основного и резервного энергоблоков; $\Pi_{\text{р1}}$ – средняя стоимость одного часа ремонтных работ на технологическом оборудовании ТЭС с учетом стоимости материалов, заменяемых деталей и зарплаты ремонтно-

¹ Часть первая опубликована в № 5/2012.

го персонала; $s_{тс}$, $s_{т}$ – соответственно средняя топливная составляющая себестоимости электроэнергии по маневренным электростанциям энергосистемы и топливная составляющая себестоимости на ТЭС, где произведена модернизация САР.

Изменение среднегодового числа остановов энергоблока вследствие отказа технологического оборудования определяют для дубль-блоков по формуле [1]

$$\Delta w_{то}^д = 0,2 \Delta w_{т}, \quad (4)$$

а для двухкорпусных моноблоков

$$\Delta w_{то}^м = 0,5 \Delta w_{т}, \quad (5)$$

где $\Delta w_{т}$ – изменение среднегодового числа отказов технологического оборудования, ведущих к останову блока, в результате модернизации САР процесса горения и температуры перегретого пара, 1/год.

При этом весь водопаровой тракт парогенератора разбивают на четыре участка в соответствии с методикой [1].

Экономии от изменения надежности работы технологического оборудования, отказ которого ведет к снижению нагрузки блока, определяют по формуле [2]

$$\Delta Z_{нт}^с = \Delta w_{тсн} \tau_{н2} [\Delta N (s_{тс} - s_{т}) + (N_{ср} - \Delta N) \times (s_{тсн} - s_{т}) + \Pi_{р}] + \Delta w_{тсн} B_{н2} \Pi_{т}, \quad (6)$$

где $\Delta w_{тсн}$ – изменение среднегодового числа отказов технологического оборудования, ведущих к снижению нагрузки на величину ΔN ; $\tau_{н2}$ – среднее время работы энергоблока на сни-

женной нагрузке из-за отказа части технологического оборудования, ч; $B_{н2}$ – расход условного топлива на пуск парогенератора после его простоя в течение $\tau_{н2}$ часов; $s_{тсн}$ – топливная составляющая себестоимости электроэнергии на блоке при сниженной нагрузке.

Вместе с тем определение изменения среднегодового числа отказов оборудования требует большого объема статистических данных, необходимых для построения семейств функций потоков отказов из-за повреждений поверхностей нагрева при различных средних значениях температур пара и уровней его дисперсии.

Экономии затрат от изменения других составляющих технического эффекта определяют по рекомендациям [2], а экономическую оценку уменьшения ущерба, причиняемого годовыми выбросами в атмосферный воздух при модернизации САР процесса горения, рассчитывают по формуле [3]

$$\Delta Y = \gamma \sigma f \Delta M, \quad (7)$$

где ΔY – сокращение ущерба от выбросов вредных веществ; γ – множитель, численное значение которого зависит от величины экологического налога; σ – безразмерный коэффициент, зависящий от типа загрязняемой территории; f – безразмерный коэффициент, учитывающий характер рассеивания примесей в атмосфере; ΔM – сокращение массы годового выброса загрязнений из источника за счет оптимизации процесса горения.

Значения величин коэффициента σ определяют по табл. 1 [4].

Таблица 1

Значения безразмерного коэффициента σ

№ п/п	Тип загрязняемой территории	σ
1	Курорты, санатории, заповедники; природные зоны отдыха, садовые и дачные кооперативы и товарищества	10
2	Территории промышленных предприятий (включая защитные зоны) и промышленных узлов	4
3	Леса: 1-я группа 2-я группа 3-я группа	0,200 0,100 0,025
4	Пашни: южные зоны (южнее 50° северной широты)	0,250
5	Сады, виноградники	0,500
6	Пастбища, сенокосы	0,050

Основными показателями эффективности инвестиционных проектов по внедрению новых или модернизации существующих САР ТЭС являются [5]:

- чистый дисконтированный доход ЧДД ($NPV > 0$);
- индекс доходности инвестиций (коэффициент эффективности проекта) ИД (PI);
- внутренняя норма дохода ВНД ($IRR > E_n$, где E_n – норма дисконта);
- срок окупаемости капиталовложений (минимум 2–3 года).

При этом чистый дисконтированный доход рассчитывают по формуле

$$NPV = \sum_{t=0}^{t=T} P_{rt} (1 + E_n)^{-t} - \sum_{t=0}^{t=T} I_t (1 + E_n)^{-t}, \quad (8)$$

где t – текущий год; T – расчетный период, включающий время строительства объекта и время его эксплуатации; P_{rt} – доход текущего года (Profit); I_t – инвестиции текущего года (Investment); E_n – норма дисконта.

Оценка проектов с учетом инфляции, когда трудно прогнозировать будущие инфляционные тенденции, производится в постоянных ценах, действующих на сегодняшний момент. При этом ставка доходности берется в реальном измерении, т. е. очищается от инфляции.

Формула для определения реальной ставки [5]

$$E_p = \frac{1 + E_n}{1 + E_{in}} - 1, \quad (9)$$

где E_n – номинальная ставка в относительных единицах; E_{in} – среднегодовой (ожидаемый) темп инфляции.

На практике в основном применяют реальную ставку, равную 10 % ($E_p = 0,1$), что соответствует расчетам в постоянных ценах и обеспечивает сопоставимость проектов.

За доход текущего t -го года принимают значение экономического эффекта на данном этапе внедрения инноваций $\mathcal{E}_{инт}$ за вычетом эксплуатационных затрат на данном этапе внедрения

$$P_{rt} = \mathcal{E}_{инт} - \mathcal{Z}_{инт},$$

где $\mathcal{Z}_{инт}$ – может быть повышена с учетом процентных отчислений на погашение кредитов

под данный инновационный проект. При этом под инвестициями текущего года I_t понимают величину капитальных затрат на данном этапе внедрения.

Внутренняя норма дохода (IRR) инновационного проекта определяется методом последовательного приближения, исходя из условия, что при равенстве нормы дисконта и внутренней нормы дохода запас доходов (накопленного дохода) проекта, приведенный к началу расчетного периода, и запас инвестиций (накопленных инвестиций) проекта, приведенных на начало расчетного периода, равны. В этом случае чистая дисконтированная стоимость равна нулю и соответственно можно использовать соотношение:

$$\sum_{t=0}^{t=T} P_{rt} - I_t \cdot 1 + IRR^{-t} = 0. \quad (10)$$

Для точного расчета внутренней нормы дохода в формулу или расчетную таблицу NPV подставляют грубое значение показателя IRR в качестве нормы дисконта и рассчитывают новое значение чистой дисконтированной стоимости. Если оно окажется больше 0, приблизительное значение IRR увеличивают на 0,01–0,02 (можно увеличение производить методом простой интерполяции). Затем вновь рассчитывают NPV , и процесс продолжается до получения нулевого значения. При отрицательном значении чистой дисконтированной стоимости приблизительное значение IRR уменьшают на 0,01–0,02. Затем вновь рассчитывают NPV , и процесс продолжают до получения нулевого значения. Окупаемость инновационного проекта характеризуется статическим и динамическим сроками окупаемости.

Статический срок окупаемости инвестиций T_c характеризует временной отрезок, в течение которого суммарная величина инвестиций, направленных в проект, будет возвращена за счет чистого дохода

$$\sum_{t=0}^{t=T} I_t - \sum_{t=0}^{t=T_c} P_{rt} = 0. \quad (11)$$

Динамический срок окупаемости инвестиций T_d характеризует временной отрезок, в течение которого инвестиции вместе с платой за их

использование на уровне барьерной ставки будут возвращены за счет чистого дохода. Инвестиции эффективны, если сроки окупаемости минимальны и меньше срока службы объекта.

Динамический срок окупаемости инвестиций определяют из выражения

$$\sum_{t=0}^{t=T} I_t(1 + E_p)^{-t} - \sum_{t=0}^{t=T} P_{rt}(1 + E_p)^{-t} = 0. \quad (12)$$

Для решения соотношения из суммы дисконтированных инвестиций последовательно вычитают дисконтированные годовые доходы. Год, в котором разность окажется нулевой, есть искомым динамический период возврата инвестиций.

Особый интерес представляет оценка эффективности проектов, связанных с использованием инноваций. В первую очередь это относится к лицензиям, т. е. к разрешениям на передачу одними физическими или юридическими лицами (лицензиарами) принадлежащих им прав на использование изобретения или промышленного образца другим физическим или юридическим лицам (лицензиатам) в течение установленного времени на указанной территории.

Кроме лицензий, большим спросом на мировом рынке пользуются ноу-хау, которые предоставляют знания и опыт, способы и навыки в проектировании, монтаже, наладке систем автоматизации. Передача лицензий происходит на основе подписания лицензионных соглашений (контрактов, договоров), которые оплачиваются в следующих формах:

- предварительный единовременный платеж согласованной цены лицензии;
- выплата вознаграждений частичными платежами в соответствии с согласованными расценками в указанные сроки;
- смешанная форма платежей.

Предварительные платежи предполагают сравнительно точное определение стоимости лицензии, а текущие выплачиваются из прибыли лицензиата в течение согласованного времени по условиям контракта. Вместе с тем при предварительной оплате лицензиар не разделяет риск лицензиата и не рискует своим доходом. При текущих платежах выплаты лицензи-

ару могут быть прекращены, если он не соблюдает договорных обязательств (например, не оказывает помощь лицензиату во внедрении новшеств). Поэтому часто условиями контракта предусматривается возможность перевода текущих платежей в единовременные.

В большинстве случаев применяют текущие платежи, а также сочетание единовременной выплаты и текущих платежей.

При сочетании предварительной единовременной выплаты и текущих платежей стоимость лицензии может быть определена по следующей формуле [5]:

$$C_{л} = П_{пр} + \frac{П_{тек} \alpha_T}{(1 + E_{л})^{t_1}}, \quad (13)$$

где α_T – дисконтирующий множитель; $П_{пр}$ – предварительный платеж при $t = 0$; $П_{тек}$ – постоянные годовые текущие платежи за период получения прибыли лицензиатом; t_1 – время от начала расчетного периода до того момента, когда лицензия начинает приносить прибыль, лет; $E_{л}$ – процентная ставка лицензирования по текущим платежам, которая устанавливается по соглашению сторон и может отличаться от нормы дисконта, принятой лицензиатом.

Для оценки выгоды приобретения лицензии лицензиатом, полностью оплачивающим все расходы по внедрению с учетом интереса лицензиара (определения максимальной процентной ставки от чистого дисконтированного дохода), необходимо знать величину капиталовложений (K) в проект без стоимости лицензии, постоянный годовой доход (D_T) от внедрения новшества, период выплаты текущих платежей (T), ликвидационную стоимость активов в конце расчетного периода (L), принятую лицензиатом процентную ставку (E), а также процентную ставку по деловым операциям лицензирования ($E_{л}$).

Вначале определяют ЧДД проекта при условии бесплатной передачи лицензии по формуле [5]

$$NPV = D_T \alpha_T + \frac{L}{(1 + E)^T} - K, \quad (14)$$

где D_T – постоянный годовой доход; L – ликвидационная стоимость активов в конце расчет-

ного периода; K – инвестиции в проект без стоимости лицензии; α_T – дисконтирующий множитель (коэффициент приведения постоянных по величине денежных сумм к началу расчетного периода), лет, который определяют по формуле

$$\alpha_T = \frac{1 - (1 + E)^{-T}}{E}, \quad (15)$$

равный, например, 4,0386 года при $T = 7$ лет и $E = 0,16$ и 4,5641 года – при $T = 7$ лет и $E = 0,12$.

Чистый дисконтированный доход используется для определения верхнего предела капиталовложений в проект и стоимости лицензии. При этом ежегодную выплату лицензиару рассчитывают по формуле

$$\Pi_{\text{л}} = \frac{C_{\text{л}}}{\alpha_{T_{\text{л}}}} = \frac{\gamma NPV}{\alpha_{T_{\text{л}}}}, \quad (16)$$

где $C_{\text{л}}$ – стоимость лицензии; γ – договорная доля лицензиара от величины чистого дисконтированного дохода, например равная по правилу золотого сечения 0,382; $\alpha_{T_{\text{л}}}$ – дисконтирующий множитель, например равный 4,5641 года при $T = 7$ лет и $E_{\text{л}} = 0,12$.

С учетом текущих выплат за лицензию (16) чистый дисконтированный доход (14) для лицензиата составит

$$NPV_{\text{л}} = (D_T - \Pi_{\text{л}})\alpha_T + \frac{L}{(1 + E)^T} - K. \quad (17)$$

Отметим, что при $E > E_{\text{л}}$ лицензиату более выгодны текущие платежи.

Вместе с тем платежи могут быть осуществлены за период, меньший срока инвестиционного проекта. Например, если реализация проекта с использованием лицензии обеспечивает получение дохода лицензиатом в течение 14 лет, чистый дисконтированный доход за этот период составит 5 млн у. е. при условии бесплатной передачи лицензии. Лицензия продается за (38,2 % от ЧДД) 1,91 млн у. е. При этом предварительная оплата составляет (9,0 % от ЧДД) 0,45 млн у. е. Остаток 1,46 млн у. е. может быть выплачен лицензиару в течение, например, 10 лет равными ежегодными платежами со ставкой 10 % по текущим платежам.

В этом случае величину текущего платежа рассчитывают по следующей формуле [5]:

$$\Pi_{\text{тек}} = \frac{(C_{\text{л}} - \Pi_{\text{пр}})(1 + E_{\text{л}})}{\alpha_{T_{\text{л}}}} = 261,3 \text{ тыс. у. е.}, \quad (18)$$

где $\alpha_{T_{\text{л}}} = 6,145$ года при ставке $E_{\text{л}} = 10$ % и сроке 10 лет.

В связи с планируемым вводом в 2018 г. в Белорусской энергосистеме первого энергоблока мощностью 1200 МВт на белорусской АЭС целесообразно провести модернизацию основных САР, включая систему автоматического управления мощностью четырех энергоблоков 300 МВт, которые будут работать в широком диапазоне изменения нагрузок от 30 до 100 %, покрывая пиковую и полупиковую части электрической нагрузки энергосистемы.

Составляющие экономического эффекта от внедрения системы автоматического управления мощностью энергоблока (САУМБ) 300 МВт Лукомльской ГРЭС распределились следующим образом [6]:

- экономия за счет изменения надежности работы оборудования – 57,0 %;
- экономия за счет увеличения срока службы металла поверхностей нагрева – 19,7 %;
- экономия от уменьшения ущерба от аварийного недоотпуска электроэнергии потребителям – 10,3 %;
- экономия от повышения экономичности процесса горения – 7,5 %;
- экономия за счет уменьшения ремонтного простоя – 6,0 %.

При этом среднегодовой экономический эффект от внедрения САУМБ на одном энергоблоке составил 262603 у. е., в том числе экономия условного топлива – 621 т у. т., что эквивалентно (при цене 1 т у. т. 260 у. е.) 161460 у. е. в год.

Проведенный численный эксперимент моделирования переходных процессов типовых и модернизированных САР энергоблока 300 МВт показал, что по сравнению с типовыми САР качество регулирования основных технологических параметров улучшается в среднем на 38,2 %. С учетом этого годовая экономия условного топлива на одном энергоблоке составит 858,2 т у. т., на четырех энергоблоках 300 МВт – 3432,8 т у. т., что эквивалент-

но 892450 у. е. в год при суммарном среднегодовом экономическом эффекте 1,45 млн у. е.

Как показали проведенные с использованием данной методики расчеты, модернизированные САР температуры перегретого пара экономически целесообразно внедрить на 60 котлах ТЭС Белорусской энергетической системы в количестве 296 шт. [7].

Общая экономическая эффективность от внедрения модернизированных САУМБ на четырех энергоблоках 300 МВт и 296 САР температуры перегретого пара на 60 котлах ТЭС Белорусской энергосистемы с учетом затрат на исследование и внедрение инновационных технологий автоматизации составит 5,2 у. е. на 1,0 у. е. затрат.

ВЫВОД

Разработана методика расчета экономической эффективности внедрения инновационных систем автоматического регулирования ТЭС, отличающаяся тем, что в ней рассмотрены составляющие технического эффекта от внедрения инноваций, влияющие на экономичность, надежность, долговечность и безопасность работы теплоэнергетического оборудования ТЭС и способствующие охране окружающей среды. Методика позволяет определить очередность внедрения предлагаемых технических решений, а также рассчитать экономический эффект от внедрения конкретного инновационного проекта, оценить выгодность приобретения лицензии, определить размер ежегодных выплат лицензиару и эффект лицензиата от реализации инновационных проектов в области автоматизации технологических процессов тепловых электрических станций.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Временные** методические указания по расчету технико-экономической эффективности систем автоматизации технико-экономических установок (Системы автоматического регулирования энергоблоков в стационарном режиме работы. Технологические защиты) / Ю. Д. Остер-Миллер [и др.]. – М.: СЦНТИ, 1973.
2. **Экономическая** эффективность внедрения новых и усовершенствования действующих систем автоматического регулирования на тепловых электростанциях / Г. Т. Кулаков [и др.] // Обзорная информация. Сер.: Энергетика и промэнергетика. – Минск: БелНИИЭТИ, 1975. – 52 с.
3. **Тепловые** электрические станции: укрупненный расчет котла, выбор тягодутьевых машин, охрана окружающей среды: учеб. пособие / Г. И. Жихар [и др.]. – Минск: Технопринт, 2004. – 380 с.
4. **Стриха, И. И.** Экологические аспекты энергетики: атмосферный воздух: учеб. пособие / И. И. Стриха, Н. Б. Карницкий. – Минск: Технопринт, 2001. – 375 с.
5. **Практическое** пособие по выбору и разработке энергосберегающих проектов / под общ. ред. О. Л. Данилова, П. А. Костюченко. – М.: Технопринт, 2006. – 668 с.
6. **Кулаков, Г. Т.** Теоретические основы экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации систем автоматического управления для повышения эффективности использования теплоэлектростанций в переменных режимах / Г. Т. Кулаков: автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Минск: БПИ, 1988. – 36 с.
7. **Кулаков, Г. Т.** Состояние, проблемы и перспективы внедрения информационных технологий и базисных инноваций в области автоматизации тепловых и атомных электростанций Республики Беларусь / Г. Т. Кулаков // Проблемы и перспективы инновационного развития экономики: материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф., Алушта, 10–15 сент. 2012 г. / НАН Украины, Центр исследований научно-технического потенциала и истории науки имени Г. М. Доброва [и др.]; редкол.: Б. А. Малицкий [и др.]. – Киев; Симферополь; Алушта, 2012. – С. 252–256.

Поступила 29.02.2012