

## Методические рекомендации к расчету экономической эффективности от внедрения тренажеров для подготовки оперативного персонала тепловых электрических станций

Рабенко В. С., канд. техн. наук, Мошкарин А. В., доктор техн. наук,  
Битеряков В. Ф., канд. экон. наук

Ивановский государственный энергетический университет

*Изложен методический подход к оценке экономической эффективности непрерывной подготовки оперативного персонала ТЭС на компьютерных тренажерах.*

**Введение.** Функционирование и развитие федерального (общероссийского) оптового рынка электрической энергии (мощности) (далее именуется – ФОРЭМ) повысило интерес ТЭС к оснащению системы подготовки операторов компьютерными противоаварийными тренажерами энергоблоков-прототипов. Подготовка специалистов на таких тренажерах позволяет не только сократить количество отказов и аварий в работе оборудования по вине персонала, но и снизить возможные финансовые потери поставщиков энергии и мощности.

Эффективность подготовки заключается в том, что дает возможность:

- 1) снизить затраты в связи с предотвращением аварийных ситуаций.
- 2) снизить финансовые потери при продаже энергии на оптовом рынке.

Согласно результатам исследований соотношений причин и последствий аварийных технологических ситуаций [1] можно принять долю аварийных остановов по вине персонала  $z=0,13$ .

При выработке электроэнергии одним блоком 800 МВт  $W_{\text{год}} = 24,5 \cdot 10^5$  МВт·ч/год [2] и тарифной ставке за электроэнергию  $T_э = 459,14$  руб/(МВт·ч) [3] затраты на проведение плановых ремонтов оборудования блока (5 %, см. табл. 1)  $Z_p = 0,05 \cdot W_{\text{год}} \cdot T_э = 0,05 \cdot 24,5 \cdot 10^5 \cdot 459,14 = 56244,65$  тыс. руб/год.

Затраты на проведение восстановительного ремонта после аварийного останова блока установим как  $C_p = 0,05 \cdot A Z_p = 5624,465$  тыс. руб/год, где  $A=2$  – среднегодовое количество аварийных остановов блока по вине персонала.

Таблица 1. Структура тарифа на электроэнергию, %

Топливо	53
Заработная плата	3
Амортизация	3
Ремонтный фонд	5
Прочие затраты	6
Прибыль предприятия	18
Налоги из прибыли	12
Итого	100

Приведенная в [1] классификация типов ошибок (табл. 2), допускаемых оперативным персоналом в процессе эксплуатации энергоблока, свидетельствует о том, что они могут быть исключены путем непрерывной противоаварийной подготовки персонала на тренажере блока-прототипа.

Таблица 2. Соотношение типов ошибок, %

Информационные	41
Аналитические	38
Сенсомоторные	21
Итого	100

Подготовка на тренажере, воспроизводящем информационно-управляющие функции в темпе протекающих технологических процессов по отношению к блоку-прототипу, позволяет операторам получить:

- навыки ведения различных режимов работы энергоблока;
- чувство динамики протекающих процессов;
- знания предыстории событий;
- навыки действий по приведению условий работы оборудования в границы безопасного состояния;
- навыки достижения и поддержания оптимальных технико-экономических показателей во всем диапазоне нормальных режимов энергоблока.

Согласно [2] внедрение нового поколения АСУТП энергоблоков 800 МВт на базе ПТК КВИНТ, основанного на дисплейной системе контроля и управления (СКУ) с БЩУ технологическими параметрами энергоблока, позволяет снизить удельный расход топлива на 2,82 г/(кВт·ч) за счет следующего:

- уменьшения отклонений от нормативной температуры острого и перегретого пара ( $\Delta b_{\text{пп}} = \Delta b_{\text{оп}} + \Delta b_{\text{вп}} = 0,26 + 0,06 = 0,32$  г/(кВт·ч));
- поддержания оптимального сочетания «воздух-топливо» газоздушного тракта котлоагрегата ( $\Delta b_{\text{вт}} = 1,3$  г/(кВт·ч));
- уменьшения пережога топлива путем поддержания экономического вакуума ( $\Delta b_{\text{эв}} = 1,2$  г/(кВт·ч)).

Дисплейная СКУ направлена на исключение информационных (41%) и аналитических (38%) ошибок оперативного персонала [2]. Исключение названных типов ошибок (79%) операторов БЩУ и обучение эксплуатации оборудования блока с оптимальными ТЭП при помощи тренажерной подготовки позволит снизить удельный расход топлива до того же уровня.

Определим долю снижения удельного расхода топлива за счет тренажерной подготовки персонала по отношению к показателям использования нового поколения АСУТП блоков на уровне  $K_1 = 0,79z = 0,1$ .

Внедрение нового поколения АСУТП энергоблоков дает возможность снизить затраты на плановые ремонты основного тепломеханического оборудования до 17% ( $\Delta Z_p = 0,17$ ) за счет контроля его состояния в темпе технологических процессов [2].

Противоаварийная подготовка на тренажере объекта-прототипа в темпе протекающих процессов позволяет научить персонал быстро и безошибочно действовать в стрессовых ситуациях, когда необходимо в короткие сроки привести оборудования блока в границы безопасного состояния.

В то же время подготовка на тренажерах направлена на обучение, прежде всего, действиям при работе блока на мощности, когда ошибки операторов достигают 65 % [1] (из них 17 % ошибки при пуске-останове и ремонте оборудования; 18 % ошибки в процессе испытаний и опробований). Исходя из

этого долю снижения затрат на проведение плановых ремонтов оборудования за счет повышения безаварийности эксплуатации оценим следующим образом:  
 $K_2 = 0,65\Delta Z_p(1-z) = 0,1$ .

**Снижение финансовых потерь в связи с предотвращением аварийных остановов энергоблока по вине персонала** можно оценить следующим образом.

1. Снижение затрат на восстановительный ремонт оборудования

$$\Delta Z_1 = AzC_p = 2 \cdot 0,13 \cdot 5624,465 = 1462,36 \text{ тыс. руб/год.}$$

2. Экономия топлива (мазут) на пуски блока

$$\Delta Z_2 = AzV_{\text{пуск}}^{\text{бл}} \Pi_T = 2 \cdot 0,13 \cdot 599,3 \cdot 1500 = 233,727 \text{ тыс. руб/год.}$$

3. Экономия химобессоленной воды

$$\Delta Z_3 = AzG_{\text{пуск}} \Pi_{\text{хв}} = 2 \cdot 0,13 \cdot 4000,0 \cdot 57 = 59,28 \text{ тыс. руб/год.}$$

4. Экономия электроэнергии, расходуемой при пуске энергоблока

$$\Delta Z_4 = AzW_{\text{пуск}} b \Pi_T = 2 \cdot 0,13 \cdot 131,8 \cdot 0,310 \cdot 1500 = 15,935 \text{ тыс. руб/год.}$$

5. Экономия топлива вследствие использования возможностей оптимизации режимов эксплуатации энергоблока

$$\Delta Z_5 = \Delta b \Pi_T W_{\text{год}} K_1 = 0,00282 \cdot 1500 \cdot 24,5 \cdot 10^5 \cdot 0,103 = 1064,331 \text{ тыс. руб/год.}$$

6. Снижение затрат на плановый ремонт оборудования

$$\Delta Z_6 = Z_p K_2 = 56244,65 \cdot 0,096 = 5399,486 \text{ тыс. руб/год.}$$

**Снижение финансовых потерь от продажи электроэнергии на ФОРЭМ.**

Считаем, что замещающим оборудованием является аналогичное по технико-экономическим характеристикам и способное подхватить 50 % отключенной нагрузки аварийно остановленного энергоблока.

7. Потеря прибыли от снижения отпуска электроэнергии

$$\Delta \Pi_p = Az \cdot 0,5 \cdot [\Delta N_p \Delta T (T_g - T_t)] (1 - N_{\text{приб}}) = 2 \cdot 0,13 \cdot 0,5 \cdot [800 \cdot 24(459,14 - 0,5 \cdot 459,14)] \cdot 0,76 = 435,485 \text{ тыс. руб/год,}$$

где  $N_{\text{приб}} = 0,24$  – ставка налога на прибыль.

8. Плата за отклонения

$$\Delta \Pi_0 = Az \cdot 0,5 (\Delta N_p \Delta T T_0) K_3 = 2 \cdot 0,13 \cdot 0,5 \cdot (800 \cdot 24 \cdot 632,21) \cdot 2 = 3155,992 \text{ тыс. руб/год.}$$

**Суммарный экономический эффект от подготовки операторов энергоблока на тренажере объекта-прототипа составляет:**

$$\Theta = \sum_{i=1}^{i=6} \Delta Z_i + \Delta \Pi_p + \Delta \Pi_0 = 8235,12 + 435,485 + 3155,992 = 11826,597 \text{ тыс. руб/год.}$$

Здесь:

$A=2$  – среднегодовое количество аварийных остановов блока;  $z=0,13$  – доля аварийных остановов по вине персонала;  $C_p=5624,465$  – затраты на проведение восстановительного ремонта, тыс. руб;  $Z_p = 56244,65$  – затраты на проведение плановых ремонтов оборудования блока, тыс. руб/год;  $V_{\text{пуск}}^{\text{бл}} = 599,3$  – расход топлива на пуск блока, т у.т.;  $\Pi_T = 1500$  – цена топлива (мазут), руб/т у.т.;  $G_{\text{пуск}} = 4000,0$  – расход химобессоленной воды на пуск блока, т;  $\Pi_{\text{хв}} = 57$  – себестоимость подготовки химобессоленной воды, руб/т;  $W_{\text{пуск}} = 131,8$  – расход электроэнергии на пуск блока, МВт·ч;  $V=0,310$  – удельный расход топлива на выработку электроэнергии, т у.т./МВт·ч;  $\Delta b=0,00282$  – снижение удельного расхода топлива от оптимизации режимов эксплуатации блока, т у.т./МВт·ч;  $W_{\text{год}} = 24,5 \cdot 10^5$  – годовой отпуск электроэнергии от энергоблока, МВт·ч/год;  $K_1 = 0,103$  – доля снижения удельного расхода топлива за счет повышения качества подготовки персонала;  $K_2 = 0,096$  – доля снижения затрат на проведение

плановых ремонтов оборудования за счет повышения качества эксплуатации;  $N_y = 800$  – установленная мощность блока, МВт;  $N_p = 800$  – плановая рабочая мощность блока, МВт;  $\Delta N_p = 800$  – снижение величины рабочей мощности по вине персонала, МВт;  $\Delta T = 24$  – время снижения мощности по вине персонала, час;  $T_0 = 632,21$  – максимальный тариф на поставку электроэнергии участников оптового рынка, руб/(МВт·ч);  $T_3 = 459,14$  – тарифная ставка за электроэнергию, руб/(МВт·ч);  $I_t = 229,57$  – топливная составляющая себестоимости электроэнергии, руб/(МВт·ч);  $K_3 = 2$  – коэффициент платы за отклонения от объема отпуска электроэнергии.

В пересчете на 1 МВт установленной мощности ТЭС удельный экономический эффект от подготовки операторов на тренажере блока-прототипа при  $A=2$  и  $z=0,13$  составляет  $\mathcal{E}_{уд} = 14,783$  тыс. руб/(год·МВт).

Отчетные показатели надежности энергопроизводства РАО «ЕЭС России» свидетельствуют, что за последние годы количество технологических нарушений, вызванных ошибками персонала, составляет около 5% от общего числа технологических нарушений. Однако существующая система классификации аварийных событий, не исключая элементов субъективного характера, несовершенна и способствует занижению роли человеческого фактора. Проведенный нами анализ показал, что количество технологических нарушений, произошедших по вине персонала, по меньшей мере вдвое больше.

Если допустить, что  $z=0,05$ , то по вышеприведенной методике имеем  $\mathcal{E}_{уд} \approx 10,472$  тыс. руб/(год·МВт).

По экспертной оценке операторов энергоустановок с большим стажем оперативной работы, вина оперативного персонала в возникновении нештатных ситуаций достигает 50 %. Если принять, что  $z=0,5$ , то по оценочному расчету при тех же условиях получим  $\mathcal{E}_{уд} \approx 34,766$  тыс. руб/(год·МВт).

Для оценки экономического эффекта от непрерывной подготовки оперативного персонала на тренажере блока-прототипа мы предлагаем воспользоваться зависимостью (рис. 1).

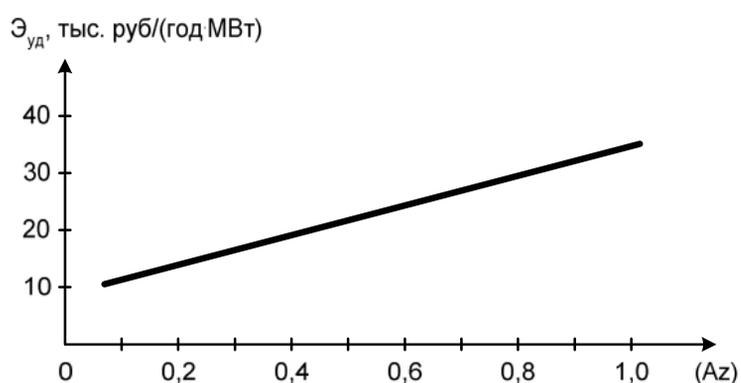


Рис. 1. Удельный экономический эффект от подготовки персонала на тренажере:  
 $A$  – среднегодовое количество остановов энергоустановки;  $z$  – доля остановов по вине персонала.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{уд} N_{уст} = 27(0,27 + Az) N_{уст} \cong 10 N_{уст}, \text{ тыс. руб/год.}$$

Здесь  $N_{уст}$  – установленная мощность энергоустановки, МВт;  $\mathcal{E}_{уд} \cong 10 \div 13$  – при  $A=2$  и  $z=0,05$ , тыс. руб/(год·МВт).

Более точная оценка может быть дана по результатам статистических сведений ТЭС о применении непрерывной тренажерной подготовки операторов энергоустановок

**Оценка стоимостных характеристик компьютерного тренажера (КТ) блока-прототипа.** В настоящее время энергетика идет по пути модернизации АСУТП энергоустановок на базе нового поколения программно-технических комплексов (ПТК), основанного на дисплейном способе управления энергоустановкой. Это позволяет объединить информационные и моторные поля операторов БЩУ с целью повышения надежности и экономичности управления оборудованием энергоустановки. Человеко-машинный интерфейс КТ в этом случае приближен к интерфейсу операторов БЩУ и позволяет имитировать реальную среду работы операторов путем достижения:

- соответствия информационно-управляющей модели КТ оперативному полю БЩУ;
- воспроизведения моделируемых на тренажере процессов в реальном масштабе времени по отношению к объекту-прототипу.

Безусловно, КТ не воспроизводит в полном объеме реальную среду работы операторов БЩУ. По нашей оценке объем модели КТ достаточен на уровне ~ 70% при воспроизведении до 100 % дисплейной системы контроля и управления объектом в различных режимах его работы.

По данным [1] стоимость полномасштабного тренажера (ПМТ) для подготовки операторов блочного щита управления (БЩУ) в США составляет 10÷15 млн. долларов. Общие требования к ПМТ подобного типа:

- имитация реальной среды работы операторов БЩУ;
- воспроизведение реальных информационных и моторных полей БЩУ.

На таких ПМТ можно задавать более 200 вводных и имитировать ~ 20 тыс. отказов оборудования.

При сложившейся на мировом рынке стоимости тренажеров как программно-технических средств ~ 85 % от общей стоимости составляют затраты на создание программного обеспечения тренажера, т.е. по сути – затраты на разработку динамической модели объекта-прототипа. Аппаратная база тренажера оценивается на уровне ~ 15 %.

Очевидно, что такая стоимость противоаварийных тренажеров для отечественной теплоэнергетики нереальна.

Официально утвержденная в 1977 г. «Методика определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений» не отвечает современным условиям экономических расчетов в полной мере. Так, например, в настоящее время нецелесообразно использовать в качестве главного показателя годовой экономической эффект.

Основным показателем эффективности проекта КТ объекта-прототипа для подготовки операторов следует считать чистый дисконтированный доход (ЧДД), характеризующий превышение денежных поступлений над суммарными затратами. ЧДД рассчитывается по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{i=1}^{i=\Gamma} (P_i - Z_i) a_i,$$

где  $P_i$  – ожидаемый приток средств за  $i$ -ый шаг расчета, тыс. руб;  $Z_i$  – затраты на производство, эксплуатацию и модернизацию продукции, тыс. руб;  $a_1 = 1/(1+R)$ , коэффициент дисконтирования первого года проекта (для каждого последующего года  $a_i = a_{i-1}a_1$ );  $R$  – ставка дисконта, выраженная в долях;  $T$  – нормативный расчетный период (горизонт расчета), 6 лет.

Примем  $P_i \approx 10000$  тыс. руб ( $z=0,05 \div 0,13$ ;  $A=2$ ).

Затраты на производство и эксплуатацию КТ определяются по формуле:

$$Z_i = \begin{cases} Z_{\text{КТ}} - \text{затраты на разработку КТ,} \\ \Theta - \text{эксплуатационные затраты.} \end{cases}$$

$$Z_{\text{КТ}} = M + 3П + Н + К + Л, \text{ тыс. руб.}$$

Здесь  $M$  – затраты на материалы, комплектующие изделия, услуги;  $3П$  – заработная плата;  $Н$  – налоги и отчисления;  $К$  – единовременные затраты и стоимость основных средств;  $Л$  – ликвидационная стоимость основных фондов ( $Л=0$ );  $\Theta$  – эксплуатационные затраты расчетного периода (обслуживание, модернизация КТ).

Энергоблоки мощностью 800 МВт морально не устареют еще 30÷40 лет. С учетом неизбежных модернизаций энергоблоков за этот период, оценим жизненный цикл тренажера до появления новой модели в 10 лет.

На разработку КТ, удовлетворяющего требованиям [1], затрачивается ~ 1,5÷2 года (~ 25%, информационная подготовка проекта; ~40%, создание модели объекта-прототипа; ~ 35%, отладка ПО модели и верификация тренажера). Оценивая фонд  $3П=30\%$  от  $Z_{\text{КТ}}$  (~ 10x18 человеко-месяцев) на уровне:  $3П = 3000$  тыс. руб. имеем  $Z_{\text{КТ}} = 10000$  тыс. руб. Последующие эксплуатационные затраты оцениваются как  $\Theta \approx 20\%$ .

ЧДД за расчетный период жизненного цикла проекта для трех ставок дисконта рассчитан по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{i=3}^{i=6} (P_i - \Theta_i) a_i - \sum_{i=1}^{i=2} (Z_{\text{КТ}})_i a_i$$

Результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3. Оценка ЧДД за жизненный цикл тренажера

Затраты на разработку тренажера, тыс. руб									
5000	5000	-	-	-	-	-	-	-	-
Затраты на эксплуатацию тренажера, тыс. руб									
-	-	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Ставка дисконта		15%							
Коэффициент дисконтирования (по годам)									
1-й год	2-й год	3-й год	4-й год	5-й год	6-й год	7-й год	8-й год	9-й год	10-й год
0,870	0,757	0,659	0,573	0,498	0,433	0,377	0,328	0,286	0,248
Дисконтированный отток: $(Z_{\text{КТ}})_i a_i$ ; $\Theta_i a_i$ , тыс. руб									
4350	3785	1318	1146	996	866	754	656	572	496
Дисконтированный приток: $P_i a_i$ , тыс. руб									
-	-	6590	5730	4980	4330	3770	3280	2860	2480
Приведенный дисконтированный поток, тыс. руб									
-4350	-3785	5272	4584	3984	3464	3016	2624	2288	1984
ЧДД за расчетный период					(6 лет): 9169 тыс. руб				
ЧДД за жизненный цикл тренажера: (10 лет): 19081 тыс. руб									

Окончание таблицы 3.

Ставка дисконта		20%							
Коэффициент дисконтирования (по годам)									
1-й год	2-й год	3-й год	4-й год	5-й год	6-й год	7-й год	8-й год	9-й год	10-й год
0,833	0,694	0,578	0,482	0,401	0,334	0,279	0,232	0,193	0,161
Дисконтированный отток, тыс. руб									
4165	3470	1156	964	802	668	558	464	386	322
Дисконтированный приток, тыс. руб									
-	-	5780	4820	4010	3340	2790	2320	1930	1610
Приведенный дисконтированный поток, тыс. руб									
-4165	-3470	4624	3856	3208	2672	2232	1856	1544	1288
ЧДД за расчетный период (6 лет): 6725 тыс. руб									
ЧДД за жизненный цикл тренажера: (10 лет): 13645 тыс. руб									
Ставка дисконта		25%							
Коэффициент дисконтирования (по годам)									
1-й год	2-й год	3-й год	4-й год	5-й год	6-й год	7-й год	8-й год	9-й год	10-й год
0,8	0,64	0,512	0,41	0,328	0,262	0,21	0,168	0,134	0,107
Дисконтированный отток, тыс. руб									
4000	3200	1024	820	656	524	420	336	268	214
Дисконтированный приток, тыс. руб									
-	-	5120	4100	3280	2620	2100	1680	1340	1070
Приведенный дисконтированный поток, тыс. руб									
-4000	-3200	4096	3280	2624	2096	1680	1344	1072	856
ЧДД за расчетный период (6 лет): 4896 тыс. руб									
ЧДД за жизненный цикл тренажера: (10 лет): 9848 тыс. руб									

Срок окупаемости проекта – 4 года от начала его осуществления, а период возврата единовременных затрат не превышает одного года эксплуатации тренажера.

### Выводы

1. Функционирование и развитие федерального оптового рынка электрической энергии (мощности) повышает значимость подготовки оперативного персонала ТЭС на тренажерах объектов-прототипов с целью соблюдения плановых объемов поставки электроэнергии.

2. Проведенные оценочные расчеты показывают, что суммарный годовой экономический эффект от внедрения компьютерных тренажеров объектов-прототипов в систему непрерывной подготовки операторов ТЭС превышает затраты на внедрение тренажеров и быстро окупается.

### Литература

1. Анохин А. Н., Острейковский В. А. Вопросы эргономики в ядерной энергетике. - М.: Энергоатомиздат, 2001.- 344 с.
2. Морозов В. В., Гурылев О. Ю. Полномасштабная АСУТП блоков 800 МВт ОАО «Рязанская ГРЭС» на базе ПТК «КВИНТ» // Датчики и системы. - 2003.-№12.- С. 5-7.
3. Постановление Федеральной энергетической комиссии Российской Федерации от 29 октября 2003 г. №89-э/1 «О тарифах на электрическую энергию (мощность), поставляемую на федеральный (общероссийский) оптовый рынок электрической энергии (мощности)».
4. Максимов Б. К., Молодюк В. В. Расчет экономической эффективности работы электростанций на рынке электроэнергии: Учеб. пособие.- 2-е изд. перераб. и доп.- М.: Изд-во МЭИ, 2002.- 122 с.
5. Нормативно-техническая документация по топливоиспользованию Рязанской ГРЭС.- М.: Изд-во ОРГРЭС, 2001.- 92 с.
6. Рекомендации по учету и стоимостной оценке прав на результаты интеллектуальной деятельности, финансируемой из федерального бюджета, в научно-технической сфере.- М.: Министерство науки и технологий РФ, 2000.- 39 с.