

Э.М. Фархадзаде, д-р техн. наук, **А.З. Мурадалиев**, д-р техн. наук,
Т.К. Рафиева, канд. техн. наук, **А.А. Рустамова**, аспирантка
Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт энергетики
(Азербайджанская Республика, Az1012 Баку, пр-т Г. Зардаби, 94,
тел (+99412) 4316407, e-mail: elmeht@ Rambler.ru)

Бенчмаркинг энергоблоков теплоэлектростанций

Разработан метод и алгоритм расчета граничных значений фидуциального интервала при реализации показателей эффективности работы объектов электроэнергетических систем. Показано, что возможность объективной оценки граничных значений фидуциального интервала позволяет перейти к нормированным значениям реализаций показателей эффективности работы объектов ТЭС, оценить интегральный показатель, сравнить и ранжировать сопоставляемые объекты, провести бенчмаркинг. Риск ошибочного решения при более совершенной организации эксплуатации, технического обслуживания и ремонта у этих объектов существенно снижается, что приводит к повышению эффективности работы. Традиционно эффективность работы новых энергоблоков тепловых электростанций определяется по величине удельного расхода условного топлива. При этом предполагается, что надежность работы и безопасность технического обслуживания полностью обеспечиваются при выполнении соответствующих заводских инструкций и правил. Однако по мере увеличения срока службы объектов необходимость учета фактической надежности и безопасности становится все более актуальной. К сожалению, в правилах эксплуатации технического обслуживания и ремонта нет рекомендаций, как это делать. Оценка граничных значений фидуциального интервала интегральных показателей эффективности работы и бенчмаркинг проведены по технико-экономическим показателям котельных установок энергоблоков 300 МВт тепловых электростанций на газомазутном топливе.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бенчмаркинг, фидуциальный подход, пригринь, ранжирование, эффективность, надежность, экономичность, безопасность.

Термины и определения. Бенчмаркинг (branch — высокий, mark — отметка) — системный метод сопоставления эффективности работы объектов, который впервые использован в США в 1980-е годы и постепенно принят компаниями всего мира. В настоящее время он известен как самый популярный инструмент управления [1]. Наилучшие результаты бенчмаркинга наблюдаются при реализации его в виде непрерывного процесса. Методология бенчмаркинга представлена в ГОСТ Р50779.100-2017 [2].

© Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Рафиева Т.К., Рустамова А.А., 2020

Внутренний бенчмаркинг предусматривает сравнение и ранжирование однотипных объектов одного предприятия, например энергоблоков электростанции. Внешний бенчмаркинг предусматривает сравнение и ранжирование однотипных предприятий энергосистемы. Бенчмаркинг в ЭЭС позволяет существенно повысить уровень организации эксплуатации, технического обслуживания и ремонта.

Особенностью бенчмаркинга является разработка технологии применения алгоритмов сравнения и ранжирования для методической поддержки руководства объектов при организации эксплуатации, технического обслуживания и ремонта. В настоящее время процесс сравнения в бенчмаркинге проводится по множеству количественных и качественных показателей. В некоторых случаях, сравнение проводится только по показателям экономической эффективности, в частности по величине удельного расхода условного топлива, что приводит к значительному риску ошибочного решения. Бенчмаркинг совместно с системой комплексного управления качеством TQM (Total Quality Management) составляют корпоративную культуру повышения эффективности работы.

Фидуциальные распределения предложены Р.А. Фишером в 1935 г. По мнению Фишера [3]:

следует доверять лишь решениям, которые основаны на эмпирических данных, точнее, — распределению наблюдаемой выборки;

приемлемым способом построения фидуциальных интервалов является вычисление распределения вероятностей возможных значений показателя;

доверительный и фидуциальный интервалы одинаковы тогда, когда оценивается единичный показатель, если оценивается комплексный показатель по двум и большему числу единичных показателей, то результаты могут различаться.

В 1942 г. А.Н. Колмогоров отмечал, что при малом объеме выборки, наилучшие интервальные оценки дают именно фидуциальные вероятности [4].

Трудности аналитической оценки распределения комплексных показателей для малочисленных выборок многомерных данных известны [5]. Применение фидуциального подхода осуществляется на основе метода статистического моделирования. Появление компьютерной техники и развитие компьютерных технологий создало неограниченные возможности для применения фидуциального подхода.

Фидуциальный интервал вводится для характеристики интервала изменения технико-экономических показателей (ТЭП). Различие между ТЭП и нижним граничным значением фидуциального интервала опре-

деляет величину износа, а различие между верхним граничным значениями и ТЭП — величину остаточного ресурса.

Ранжирование — размещение возможных реализаций ТЭП в установленном порядке (в порядке возрастания и убывания).

Пригрины — приграничные интервалы (с фидуциальным интервалом). Различают левый и правый пригрины. Они состоят из реализаций ТЭП для режимов пуска и останова, а также из «грубых ошибок» при подготовке и занесении ТЭП в базу данных автоматизированных систем синтеза ТЭП.

Синтез ТЭП — это алгоритм оценки интегрального показателя $I_{п}$ эффективности работы по ТЭП стационарных режимов энергоблоков тепловых электростанций (ТЭС).

Интегральный показатель эффективности работы включает эффективность экономичности, надежности и безопасности объектов электроэнергетических систем (ЭЭС).

Объекты ЭЭС — это оборудование, устройство и установки, например турбогенераторы, распределительные устройства, котельные установки (КУ).

Актуальность проблемы. К числу важнейших проблем ЭЭС относятся разработка методов и алгоритмов сравнения и ранжирования и проведение бенчмаркинга однотипных объектов. Возможность безошибочного бенчмаркинга позволяет оценить эффективность работы конкретного объекта и тем самым оценить соответствие его технического состояния предъявляемым требованиям. Ранжирование объектов позволяет перейти к группам (кластерам) объектов со случайно различающимися показателями эффективности (ПЭ) работы и обеспечить соответствие системы технического обслуживания и ремонта объектов их техническому состоянию.

Актуальность проблемы обусловлена наблюдаемой трансформацией понятия эффективности. В соответствии с [6] понятие эффективность было введено в 1912г. и означало экономическую эффективность. С начала 50-х годов разрабатывается проблематика надежности в отличие от эффективности. Уже в 80-х годах считается, что эффективность является многоаспектным понятием. Вводится понятие целевой эффективности, которое, по сути, соответствует понятию надежности. Отмечается взаимосвязь экономической и целевой эффективности. В последние годы роль надежности и безопасности в обеспечении эффективности работы объектов ЭЭС существенно возросла. Именно поэтому в настоящее время при характеристике эффективности работы важно одновременно учесть экономичность, надежность и безопасность.

Необходимо заметить следующее:

- Показатели эффективности конкретного объекта не равны ПЭ соответствующего кластера, так как первые рассчитывают по значимым разновидностям заданных признаков, а вторые – по значимым разновидностям каждого признака.

- Сегодня, как и много лет назад, эффективность работы объектов ЭЭС оценивают по одному из показателей, характеризующих экономичность работы. Считается, что выполнение заводских инструкций и правил технической эксплуатации и безопасности обслуживания обеспечивает необходимый уровень надежности и безопасности.

- В условиях, когда срок службы объектов приблизительно равен нормативному значению или даже превышает его (относительное число таких объектов в настоящее время превышает 50%), качественная характеристика надежности и безопасности при оценке эффективности работы становится недостаточной, так как приводит к недопустимому риску ошибочного решения.

- Такое увеличение риска известно и находит свое отражение в систематически уточняемых Правилах технической эксплуатации и безопасности обслуживания в виде рекомендаций учета технического состояния объектов. В связи с отсутствием методологии учета остаточного износа эти рекомендации выполняются интуитивно.

Разработанная методология количественной оценки эффективности работы реализована на таких объектах: котельная установка энергоблока [7], энергоблок 300 мВт на газомазутном топливе [8], газопоршневая электростанция [9], паротурбинная установка энергоблока [10]. В основе рекомендуемой методологии лежит оценка интегрального показателя, отражающего фактическую надежность, экономичность и безопасность работы.

Кажущаяся простота решения этой проблемы обманчива. Трудности решения ряда задач еще не преодолены и вытекают из основных требований к исходным данным и, прежде всего, к многочисленным ТЭП. Это — независимость, идентичность размерности и масштаба, безошибочность и однородность.

Очевидно, что:

- использование при оценке показателя I_{Π} многочисленных взаимосвязанных ТЭП приводит к искажению его значения;

- расчет I_{Π} возможен лишь при одинаковой размерности и одинаковом масштабе ТЭП;

- необходимость распознавания и изъятия из множества ТЭП ошибочных реализаций, обусловленных «человеческим фактором», не вызывает сомнения;

- обеспечение однородности реализаций ТЭП уменьшает интервал изменения I_n и тем самым снижает риск ошибочного решения.

Несмотря на то, что последствия пренебрежения этими требованиями действительно очевидны, выполнение их требует ответа на ряд вопросов, например:

- как оценить взаимосвязь реализаций ТЭП при том, что это многомерные данные, закон распределения которых неизвестен?
- как выбрать метод нормирования ТЭП, учитывая, что они определяются не по среднему значению, а по величине разброса?
- как распознать и исключить ошибочные реализации ТЭП, «грубость» которых не явна?
- какие факторы обуславливают значимое различие ТЭП?

Это далеко не полный перечень трудностей, сопутствующих проведению достоверного расчета I_n эффективности работы. Наиболее важные из них следующие:

1. Отсутствует не только метод расчета I_n эффективности работы объектов ЭЭС, но и методы расчета I_n надежности, экономичности и безопасности работы объектов. Более того, безопасность обслуживания сегодня характеризуется лишь качественными показателями.

2. Возможность статистического анализа реализаций ТЭП ограничена их зависимостью от большого числа факторов (признаков) и их разнообразием, т.е. выборки возможных реализаций ПЭ являются частью совокупности многомерных данных, а не частью генеральной совокупности. Поэтому традиционные методы статистического анализа выборки из генеральной совокупности здесь неприемлемы.

3. Предположения о характере распределения случайных величин в традиционных методах статистического анализа многомерных данных существенно отличаются от фактических закономерностей распределения возможных реализаций ТЭП и фактического числа возможных реализаций

Преодоление перечисленных трудностей осуществляется на основе фидуциального подхода, разработанных критериев проверки гипотез и снижающих наукоемкость и трудоемкость статистического анализа компьютерных технологий. В свою очередь, компьютерные технологии позволяют перейти от информационной поддержки персонала к методической [11], а это является существенной поддержкой интеллектуальных систем управления.

Постановка задачи. Одно из основных требований, предъявляемых к ТЭП, — их однородность. Под однородными будем понимать ТЭП, различие реализаций которых обусловлено изменением стационарного режима работы энергоблока. Нарушение однородности приводит к существенному увеличению ширины фидуциального интервала и риска

ошибочного решения (вследствие возрастания величины ошибки второго рода). В [7] показано следующее:

- Фидуциальный интервал изменения возможных реализаций ТЭП КУ энергоблоков 300 МВт на газомазутном топливе для однородных данных значительно меньше интервала изменения возможных реализаций ТЭП по данным формы ЗТЕХ (энерго) [12].

- Распознавание приграничных (с фидуциальным интервалом) интервалов (пригринов) наглядно реализуется графо-аналитическим методом на основе сопоставления скорости изменения различия смежных реализаций. Случайный характер возможных реализаций ТЭП обуславливает флуктуации их статистической функции распределения (СФР). Компенсацию случайных отклонений предлагается проводить методом «скользящей средней». Относительная скорость изменения реализаций ТЭП пригринов не превышает единицы, в то время как для реализаций ТЭП фидуциального интервала она значительно выше.

Переход к компьютерным технологиям предусматривает возможность количественной оценки этих соотношений. В конечном итоге, необходимо знать, какие реализации ТЭП без вмешательства специалистов должны быть устранены.

Метод и алгоритм оценки граничных значений фидуциального интервала. Знание фидуциального интервала изменения ТЭП позволяет перейти к нормированным значениям как неперемемному условию перехода к I_n . Пригрины позволяют уточнить условия возникновения реализаций, нарушающих однородность реализаций ТЭП, и принять меры к их устранению. При формировании исходных массивов возможных реализаций ТЭП КУ необходимо учесть следующее:

- Реализации ТЭП КУ подвержены влиянию внешних факторов, поэтому рекомендуется проводить анализ распределения возможных реализаций ТЭП в течение последнего года работы, т.е. за последние 12 месяцев.

- Даже если будут безошибочно установлены реализации пригринов, анализ причин их возникновения требует знания «адреса» каждой реализации. Таким адресом являются месяц года и условный номер КУ. Эти данные размещаются в коде ТЭП.

- Ранжирование ТЭП в порядке возрастания их количественных значений должно проводиться совместно с кодами.

- Если реализациям ранжированного ряда ПЭ сопоставить вероятности $F^*(\Pi_{i,j}) = \frac{j}{N^{\exists}(\Pi_i)}$, где $N^{\exists}(\Pi_i)$ — экспериментальное число воз-

можных реализаций i -го ТЭП, то можно получить графическое изображение СФР i -го ТЭП. Если интервал изменения i -го ТЭП, $\Delta\Pi_i = (\Pi_{i,\max} - \Pi_{i,\min})$, представить для $r = 7 \div 10$ равными разрядами, раз-

местить реализации ТЭП в этих разрядах и оценить вероятность $P_v(\Pi_i) = \frac{m(n_i)_v}{N^{\exists}(\Pi_i)}$, где $v = 1, r$, то можно получить графическое изображение гистограммы.

• СФР $F^*(\Pi_i)$ подвержены флуктуациям, которые частично компенсируются применением метода «скользящей средней» (СС) с периодом p . Малое число реализаций ТЭП в пригрингах позволило установить, что оптимальным значением периода является $p = 3$. Расчет k -й реализации СС $M_k^* = (\Pi_i)$ выполняется по формуле [10].

$$M_{k+1}^*(\Pi_i) = M_k^*(\Pi_i) + \frac{\Pi_{i,(k+p)} - \Pi_{i,k}}{p}.$$

Следовательно, отклонение смежных оценок СС имеет вид

$$\Delta M_k^*(\Pi_i) = M_{k+1}^*(\Pi_i) - M_k^*(\Pi_i) = \frac{\Pi_{i,(k+1)} - \Pi_{i,k}}{p},$$

где $k = 1, (N^{\exists}(\Pi_i) - p + 1)$; $M_k^*(\Pi_i) = p^{-1} \sum_{j=1}^p \Pi_{i,j}$.

Критерием проверки принадлежности j -й реализации i -го ТЭП левому пригрину является следующее условие:

$$\Delta M_k^*(\Pi_i) > \delta \Pi_i, \quad (1)$$

где $\delta \Pi_i = \frac{(\Pi_{i,\max} - \Pi_{i,\min})}{N_i^{\text{CC}}(\Pi_i)}$; $N_i^{\text{CC}}(\Pi_i)$ — число реализаций СС ТЭП,

$$N_i^{\text{CC}}(\Pi_i) = N_i^{\exists}(\Pi_i) - p + 1; \quad k = 1, N_i^{\text{CC}}(\Pi_i).$$

Если условие (1) не выполняется, это означает, что левый пригрин отсутствует и необходимо перейти к распознаванию реализаций правого пригринга. Если же $\Delta M_1^*(\Pi_i) > \delta \Pi_i$, то это означает, что $\Pi_{i,1}$ относится к левому пригрину и необходимо перейти к контролю соотношения $\Delta M_2^*(\Pi_i) > \delta \Pi_i$. Если и это условие выполняется, то к левому пригрину относится и реализация $\Pi_{i,2}$, и переходим к контролю соотношения $\Delta M_3^*(\Pi_i) > \delta \Pi_i$. Контроль выполнения соотношения (1) продолжается до его нарушения. Пусть это будет при $k = l$.

Тогда:

ТЭП $\Pi_{i,\ell} = \underline{\Pi}_i^f$, где $\underline{\Pi}_i^f$ — нижнее граничное значение фидуциального интервала i -го ТЭП;

ТЭП $\Pi_{i,(p-1)} = \overline{\Pi_i^{\text{лп}}}$, где $\overline{\Pi_i^{\text{лп}}}$ — верхнее граничное значение левого пригрини;

число реализаций i -го ТЭП в левом пригрине равно первым $m^{\text{лп}}(\Pi_i) = (\ell - 1)$.

Для уменьшения громоздкости вычислений при переходе к правому пригрину предлагается контроль превышения величины $\Delta M_k^*(\Pi_i)$ начать с $\Pi_{i,k}$, т.е. считать, что

$$\Delta M_k^*(\Pi_i) = M_k^*(\Pi_i) - M_{k-1}^*(\Pi_i) = \frac{\Pi_{i,k} - \Pi_{i,(k-p)}}{p}, \quad (2)$$

где $k = N_i^{\text{CC}}(\Pi_i)$; $M^*(\Pi_i) = p^{-1} \sum_{j=1}^p \Pi_{i,(N^{\text{CC}}(\Pi_i)-j+1)}$.

Следовательно, если условие (2) не выполняется при $k = l$, то:

ТЭП $\Pi_{i,\ell} = \overline{\Pi_i^f}$, где $\overline{\Pi_i^f}$ — верхнее граничное значение фидуциального интервала i -го ТЭП;

ТЭП $\Pi_{i,(p-1)} = \underline{\Pi_i^{\text{пп}}}$, где $\underline{\Pi_i^{\text{пп}}}$ — нижнее граничное значение правого пригрини;

число реализаций i -го ТЭП в правом пригрине $m^{\text{пп}} = (\ell + 1)$.

Зная фидуциальные интервалы однородных ТЭП, можем перейти к их нормированным значениям и оценить $I_{\text{п}}$, сравнить и ранжировать техническое состояние объектов, степень соответствия ТЭП предъявляемым требованиям.

Некоторые результаты расчетов граничных значений фидуциальных интервалов ТЭП. Определим граничные значения фидуциального интервала по статистическим данным температуры воздуха $T_{\text{в}}$ после подогрева в регенеративном воздухоподогревателе (РВП). Предположим, что известна совокупность возможных реализаций среднемесячных значений $T_{\text{в}}$ в течение года для восьми энергоблоков. Проведем ранжирование реализаций $T_{\text{в}}$ в порядке возрастания, исключим из рассмотрения случаи, когда в течение месяца энергоблок был отключен на ремонт, а также реализации ТЭП в интервале пуска или остановки энергоблока (по данным о нагрузке и длительности эксплуатации в форме ЗТЭП). Рассматриваем первые и последние шесть реализаций ранжированного ряда. В соответствии с изложенным необходимо определить

разность каждой j и $(j+3)$ реализаций T_B для выявления случаев превышения фактической разности $\Delta M^*(T_{B,j})$ и предельно допустимой

$$\Delta M^*(T_B) = \frac{[M^*(T_B)_{\max} - M^*(T_B)_{\min}]P}{N^{CC}(T_B)} = 2,95 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 1, из которой следует, что нижнее граничное значение фидуциального интервала возможных типовых реализаций составляет $\underline{T_B^f} = 269,4 \text{ } ^\circ\text{C}$, а верхнее — $\overline{T_B^f} = 293,6 \text{ } ^\circ\text{C}$. Исключение ложных для стационарного режима реализаций T_B позволило уменьшить ширину фидуциального интервала в δT_B^f раз,

$$\delta T_B^f = \frac{(T_{B,\max}^f - T_{B,\min}^f)}{(\overline{T_B^f} - \underline{T_B^f})} = 2,45;$$

в левом пригоне четыре реализации, а в правом — две. Нетиповые реализации составляют $\delta m^{\Pi}(\Pi_i) = 7,2 \%$.

Аналогичные расчеты проведены и для других независимых ТЭП, характеризующих эффективность работы КУ. Результаты этих расчетов приведены в табл. 2, в которой приняты следующие обозначения: $T_{\text{пит}}$ — температура питательной воды; $T_{y.g}$ — температура уходящих газов; K_B — коэффициент избытка воздуха; ΔS — присосы воздуха на тракте; η_6 и η_H — к.п.д. брутто и нетто; \mathcal{E}_e и \mathcal{E}_T — расход электро- и тепловой энергии в системе собственных нужд (СН) КУ; b_T — удельный расход условного топлива в КУ; $\Delta \Pi_i^f$ — ширина фидуциального интервала, $\Delta \Pi_i^f = \overline{\Pi_i^f} - \underline{\Pi_i^f}$; $\delta \Pi^f$ — соотношение интервала изменения ТЭП

Таблица 1. Граничные значения фидуциального интервала T_B ($^\circ\text{C}$)

j	$T_{B,j}$	$T_{B,(j+3)}$	$(T_{B,(j+3)} - T_{B,j})$	j	$T_{B,j}$	$T_{B,(j+3)}$	$(T_{B,(j+3)} - T_{B,j})$
1	214,2	267,0	52,8	82	293,2	297,7	4,5
2	231,2	269,4	38,2	81	292,8	296,1	3,3
3	264,0	270,3	6,3	80	292,5	293,6	1,1
4	267,0	270,7	3,7	79	291,1	293,2	1,1
5	269,4	271,6	2,2	78	292,0	292,8	0,8
6	270,3	272,8	2,5	77	291,3	292,5	1,2

$(\Pi_{i,\max} - \Pi_{i,\min})$ и ширины фидуциального интервала $\Delta\Pi_i^f$; $m^{\text{лп}}(\Pi_i)$ и $m^{\text{пп}}(\Pi_i)$ — число реализаций ТЭП левого и правого пригринов. Относительная величина числа нетиповых реализаций ТЭП $\delta m_i^{\text{п}} = (\overline{m_i^{\text{п}}} + \overline{m_i^{\text{лп}}}) / m_i^{\Sigma}$, где m_i^{Σ} — общее число реализаций i -го ТЭП вычисляется по формуле $\delta m^{\text{п}}(\Pi_i) = [m^{\text{лп}}(\Pi_i) + m^{\text{пп}}(\Pi_i)]$.

Как следует из табл. 2, переход к однородным реализациям ТЭП приводит к уменьшению ширины фидуциального интервала от 1,51 до 5,56 раз. В среднем фидуциальный интервал ТЭП уменьшается приблизительно в три раза, что подтверждает целесообразность уточнения реализаций ТЭП. Наибольший разброс реализаций наблюдается у ТЭП \mathcal{E}_τ , а наименьший — у $T_{y,r}$, η_6 и η_n . Число изымаемых из рассмотрения реализаций ТЭП изменяется от 3,4 до 10,8%. Меньше всего ошибочных реализаций наблюдается у \mathcal{E}_τ , а больше всего — у $T_{y,r}$, \mathcal{E}_ω и η_n . В среднем правый пригрин содержит в 1,28 раз больше реализаций, чем левый (37/29). В общем случае это соотношение зависит от направленности изменения ТЭП.

Бенчмаркинг КУ. Рассмотрим методологию сравнения эффективности работы КУ энергоблоков 300 МВт электростанции, т.е. проведем бенчмаркинг КУ энергоблоков [1]. Предположим, что текущий месяц — октябрь. Характеризующие эффективность работы КУ за октябрь фактические значения ТЭП приведены в табл. 3.

Таблица 2. Граничные значения фидуциальных интервалов ТЭП

j	Π_i	$\underline{\Pi}_i^f$	$\overline{\Pi}_i^f$	$\Delta\Pi_i^f$	$\delta\Pi_i^f, \%$	$\overline{m_i^{\text{лп}}(\Pi_i)}$	$\overline{m_i^{\text{пп}}(\Pi_i)}$	$\delta\Pi, \%$
1	$T_{\text{пит}}, \text{ }^\circ\text{C}$	228,5	244,4	15,9	4,0	7	0	8,4
2	$T_{\text{в}}, \text{ }^\circ\text{C}$	269,4	293,6	24,2	3,45	4	2	7,06
3	$T_{y,r}, \text{ }^\circ\text{C}$	103,8	125,7	21,9	1,51	4	5	10,60
4	$K_{\text{в}}, \text{ о.е.}$	1,069	1,227	0,158	1,90	0	7	8,97
5	$\Delta S, \%$	36,2	45,9	9,7	1,61	3	2	6,4
6	$\eta_6, \%$	90,80	92,31	1,51	1,66	2	5	8,54
7	$\mathcal{E}_\omega, \%$	1,92	2,88	0,96	4,80	1	8	10,7
8	$\mathcal{E}_\tau, \%$	1,12	1,90	0,78	5,56	0	3	3,40
9	$\eta_n, \%$	84,21	86,48	2,27	3,86	8	1	10,8
10	$V_{\tau}, \text{ Г/(кВт} \cdot \text{ч)}$	319,8	345,81	26,0	4,23	0	4	4,71

Нормирование ТЭП проводится в соответствии со следующим алгоритмом: если $A = 1$, то

$$\varepsilon (П_{i,j}) = \frac{\overline{П_{i,j}^f} - П_{i,j}}{\overline{П_{i,j}^f} - \underline{П_{i,j}^f}},$$

если $A = 0$, то

$$\varepsilon (П_{i,j}) = \frac{П_{i,j} - \underline{П_{i,j}^f}}{\overline{П_{i,j}^f} - \underline{П_{i,j}^f}},$$

где A — коэффициент направленности изменения ТЭП. Если с увеличением ТЭП эффективность работы возрастает, то $A = 1$, в противном случае $A = 0$.

Прежде всего, уточним перечень реализаций ТЭП. Для этого воспользуемся граничными значениями фидуциальных интервалов соответствующих ТЭП (см. табл. 2). Реализации пригринов в табл. 3 выделены полужирным шрифтом. Далее, чтобы устранить различие размерностей и масштаба, приводим нормирование ТЭП в соответствии с [13].

Таблица 3. Среднемесячные значения ТЭП энергоблоков 300 МВт

Узел котла	Параметр	A	ТЭП для энергоблоков						
			1	2	3	4	5	6	7
ВЭ	$T_n, ^\circ\text{C}$	1	238,5	243,3	235	242,1	244,2	236,8	244,3
РВП	$T_b, ^\circ\text{C}$	1	279,8	300,2	276	286,6	297,8	284,3	291,2
ГВТ	$T_{y,r}, ^\circ\text{C}$	0	107,6	129,8	107,1	112,1	124,5	116,4	114,8
ГВТ	$K_b, \text{о.е.}$	0	1,18	1,09	1,079	1,129	1,09	1,079	1,079
ГВТ	$\Delta S, \%$	0	38,6	43,1	40	41,3	39	42,1	44,1
К	$\eta_b, \%$	1	91,5	91,64	91,47	91,78	91,8	91,63	91,66
К	$\eta_n, \%$	1	85,469	85,745	85,351	85,219	86,098	85,745	85,96
К	$b_r, \text{г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$	0	337,2	336,45	341,36	336,82	332,21	335,73	334,9
СН	$\varepsilon_s, \%$	0	2,25	2,18	2,27	2,59	2,03	2,14	2,07
СН	$\varepsilon_r, \%$	0	1,33	1,24	1,48	1,3	1,17	1,33	1,17
Время работы энерго-блока	$t_p, \text{ч}$		514	665	430	310	709	700	744

Примечание: при классификации узлов КУ приняты следующие обозначения: ВЭ — водяной экономайзер; РВП — регенеративный воздухоподогреватель; ГВТ — газовоздушный тракт; К — котел; СН — собственные нужды; восьмой энергоблок в ремонте.

Результаты расчетов нормированных значений ТЭП приведены в табл. 4. Используя эти данные, переходим к усредненным значениям ТЭП и интегральным показателям для узлов и КУ в целом. Результаты этих расчетов приведены в последнем столбце и последней строке табл. 4. Как видно из табл. 4, из семи работающих в рассматриваемом интервале времени КУ (восьмой энергоблок в ремонте) наибольшее значение $I_{п}(П_j)$, $j = 1, 7$, а следовательно, и наихудшая эффективность работы, зафиксирована на третьем КУ. Наилучшая эффективность работы была отмечена на седьмом КУ. Ряд из семи КУ, размещенных в порядке ухудшения технического состояния следующий: 7, 5, 2, 4, 6, 1, 3. При ранжировании ряда диспетчерских номеров по величине удельного расхода условного топлива b_T получим следующий ряд КУ: 5, 7, 6, 2, 4, 1, 3.

Проанализировав данные табл. 4, видим следующее:

- Указанные ряды КУ существенно различаются. Совпадают лишь КУ с наибольшими значениями $I_{п}$: $П_3$ и $b_{T,3}$. Следовательно, принимаемые решения по улучшению технического состояния наихудшей КУ при обоих способах распознавания будут идентичны. По распределению нагрузки между КУ решения будут различны, а ориентация распределения нагрузки на величину b_T приводит к ошибочному решению и к дополнительным затратам. Напомним, что риск ошибочного решения при

Таблица 4. Интегральные показатели эффективности работы КУ энергоблоков 300 МВт на газомазутном топливе

Узел котла	ТЭП	Значение $I_{п}$ для энергоблоков							Нормированное значение $I_{п}$
		1	2	3	4	5	6	7	
ВЭ	$T_{п}, ^\circ\text{C}$	0,3711	0,0692	0,5912	0,1447	0,0126	0,4780	0,0063	0,2390
РВП	$T_{в}, ^\circ\text{C}$	0,5702	—	0,7273	0,2893	—	0,3843	0,0992	0,4140
ГВТ	$T_{у.г}, ^\circ\text{C}$	0,1735		0,1507	0,3790	0,9452	0,5753	0,5023	0,4543
ГВТ	$K_{в}, \text{о.е.}$	0,7030	0,1329	0,0633	0,3797	0,1329	0,0633	0,0633	0,2198
ГВТ	$\Delta S, \%$	0,2474	0,7113	0,3918	0,5258	0,2887	0,6082	0,8144	0,5125
ГВТ	$I_{п}, \text{о.е.}$	0,3746	0,4221	0,2019	0,4282	0,4556	0,4156	0,4600	0,3770
К	$\eta_{б}, \%$	0,5364	0,4437	0,5563	0,3510	0,3377	0,4503	0,4305	0,4437
К	$\eta_{п}, \%$	0,4454	0,3238	0,4974	0,5555	0,1683	0,3238	0,2291	0,3633
К	$b_T, \text{г}/(\text{кВт ч})$	0,6692	0,6404	0,8292	0,6546	0,4773	0,6127	0,5808	0,6377
К	$I_{п}, \text{о.е.}$	0,5503	0,4693	0,6276	0,5204	0,3278	0,4623	0,4134	0,4816
СН	$\Xi, \%$	0,3438	0,2708	0,3646	0,6979	0,1146	0,2292	0,1563	0,3110
СН	$I_{п}, \text{о.е.}$	0,3065	0,2123	0,4131	0,4643	0,0893	0,2492	0,1102	0,2636
	$I_{п}, \text{о.е.}$	0,4346	0,2932	0,5122	0,3694	0,2213	0,3979	0,2178	0,3811

распределении нагрузки по энергетическим характеристикам КУ энергоблоков, срок службы которых превышает нормативный, не меньше, чем при распределении нагрузки по b_T .

- Для рассматриваемых КУ энергоблоков наихудшим ТЭП является b_T , а наилучшими ΔT и K_B . Размещенный в порядке ухудшения наблюдаемых усредненных реализаций ряд ТЭП КУ имеет вид: ΔT , K_B , T_n , ΔT , η_n , T_B , $T_{y.g}$, η_b , ΔS ; b_T .

- Наибольшие значения ТЭП наблюдались на следующих КУ: на первом — K_B ; на третьем — T_n , T_B , η_b , b_T , ΔT ; на четвертом — η_n , ΔT ; на пятом — $T_{y.g}$; на седьмом — ΔS . Таким образом, на самой лучшей по эффективности работы седьмой КУ наблюдался один из самых худших по величине ТЭП – присосы воздуха на тракте, а на самой худшей по эффективности работы третьей КУ из 10 рассматриваемых ТЭП лишь половина относилась к группе самых худших по величине. Значения $T_{y.g}$, K_B и ΔS этой КУ значительно лучше среднемесячных величин по всем энергоблокам.

На основании изложенного можно предложить еще ряд способов классификации наблюдаемых реализаций ТЭП КУ. Например, чтобы определить группу ТЭП КУ, на улучшение которых в предстоящем месяце надо обратить особое внимание, необходимо сопоставить, прежде всего, усредненные показатели нормированных значений ТЭП КУ с усредненным нормированным значением I_n эффективности работы электростанции в целом. В табл. 4. указана величина $I_n \left[M^* (\varepsilon P_\Sigma) \right] = 0,3811$. Много это или мало?

Для ответа на этот вопрос необходимо:

- интервал изменения нормированных значений ТЭП КУ $[0;1]$ представить пятью равными интервалами;
- каждому интервалу сопоставить ранги от одного до пяти. Если пятому рангу сопоставить, как принято, оценку отлично, то первый интервал $(0-0,2)$ будет соответствовать реализациям ТЭП, имеющим отличную оценку.

Таким образом, можно утверждать, что в прошедшем месяце эффективность работы КУ электростанции оценивается «хорошо»: $0,2 < 0,38 < 0,4$. Реализации с $M^* (\varepsilon P_i)_7 > I_n [\varepsilon P_\Sigma]$ можно отнести к группе «контрольных», включающей «удовлетворительные», «неудовлетворительные» и «недопустимые» нормированные ТЭП КУ.

Оценка реализаций конкретных ТЭП КУ проводится иначе. Для этого необходимо построить статистическую функцию фидуциального распределения нормированных возможных реализаций ТЭП КУ, предста-

вить шкалу функции распределения пятью равными интервалами и определить граничные значения интервалов ТЭП. Этот способ позволяет уточнить интервалы и тем самым повысить достоверность оценок ТЭП КУ.

Следует заметить, что при обеспечении однородности возможных реализации ТЭП КУ их распределение достаточно близко к равномерному. Учитывая, что шкала функции распределения делится всего на пять интервалов, их уточнение оказывается не столь принципиальным. Именно поэтому ТЭП КУ, нормированные значения которых более 0,6, требуют особого внимания обслуживающего персонала и относятся к группе «опасных».

Необходимо упомянуть о некоторых особенностях рангового метода оценки интегрального показателя. В нем отсутствует необходимость расчетов для определения нормированных значений ТЭП КУ. Строятся статистические функции фидуциального распределения ТЭП КУ, по которым изложенным выше методом определяются ранги с учетом направленности изменения ТЭП КУ. Учет проводится путем установления рангов по шкале функции распределения в интервале $[0;1]$ от единицы до пяти при $A = 1$ и от пяти до единицы при $A = 0$.

Методическая поддержка руководителей объектов достаточно подробно описана в [11]. Особенностью рекомендуемых форм является ответ на два вопроса: «как мы работали в прошедшем месяце» и «на что нам надо обратить внимание в следующем месяце».

Выводы

Повышение эффективности работы объектов ЭЭС требует разработки методов и алгоритмов сравнения и ранжирования однотипных объектов и перехода от информационной поддержки руководства объектов к методической, включающей два вопроса: как мы работали в прошлом месяце и на что надо обратить внимание в текущем месяце.

Проведение бенчмаркинга по одному, даже самому важному, фактору — удельному расходу условного топлива — для оборудования, срок службы которого превышает расчетный, связано с большим риском ошибочного решения. И не только потому, что существует ряд методов (более 10) расчета удельного расхода условного топлива [14] и невозможно выявить более предпочтительный метод, а потому, что надежность и безопасность объектов становятся не менее значимыми, чем экономичность, и последствия ошибочных решений становятся недопустимыми (гибель персонала, экологические катастрофы).

Предложенный метод и алгоритм автоматизированного расчета фидуциальных интервалов обеспечивают распознавание безошибочности

реализаций ТЭП. При нормировании ТЭП необходимо учитывать направленность их изменения относительно эффективности работы.

Методическая поддержка руководства объектов может быть основным фактором в снижении эксплуатационных затрат и повышении эффективности работы электростанций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванова Е.А., Разорвин И.В.* Бенчмаркинг как эффективная маркетинговая технология сравнительного анализа эффективности. Вопросы управления. 2009/02/12. Электронная версия: <http://vestnik.uara.ru/ru/issue/2009/02/12/>
2. ГОСТ Р50779.100-2017. Статистические методы. Методология «6 сигма». Основные критерии в организации. М.: Стандартиформ, 2017.
3. *Fisher R.A.* The fiducial argument in statistical inference. //Ann Engenics, 1935, № 6, p. 391—398.
4. *Колмогоров А.Н.* Определение центра рассеяния и мера точности по ограниченному числу наблюдения// Изв. АН СССР. Серия Матем., 1942, с. 3—32.
5. *Кендалл М., Стьюарт П.А.* Статистические выводы и связи. М.: «Наука», 1973, 900 с.
6. *Солодкая М.С.* Надежность, эффективность, качество систем управления. Режим доступа: <http://credonew.ru/content/view/4/18/>
7. *Фархадзаде Э.М., Фарзалиев Ю.З., Мурадалиев А.З.* Метод и алгоритм ранжирования котельных установок блочных электростанций по критерию надежности и экономичности работы// Теплоэнергетика, 2015, № 10, с. 22—29.
8. *Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З.* Ранжирование энергоблоков электростанций по надежности и экономичности их работы// Проблемы энергетики, 2014, № 2, с. 8—16.
9. *Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Джалагова Э.И., Абдуллаева С.А.* Метод и алгоритм сравнения эффективности работы газопоршневых электростанций электро-энергетических систем. М.: Изв. РАН. Энергетика, 2019, № 2, с. 106—117.
10. *Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Абдуллаева С.А.* Сравнение и ранжирование паротурбинных установок энергоблоков ТЭС по эффективности работы. М.: Теплоэнергетика, 2018, № 10, с. 41—49.
11. *Фархадзаде Э.М., Фарзалиев Ю.З., Мурадалиев А.З.* Автоматизированное формирование рекомендаций для повышения надежности и экономичности энергоблоков ТЭС // Энергетик, 2016, № 2, с. 15—17.
12. РД 34.09.454 Часть 1. Типовой алгоритм расчета технико-экономических показателей конденсационных энергоблоков 300, 500, 800 и 1200 МВт. М.: ВТИ, Союзтехэнерго, 2017.
13. *Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Рафиева Т.К., Рустамова А.А.* Повышение эффективности работы энергоблоков тепловых электростанций// Электрические станции, 2019, №8, с. 14—17.
14. *Теленков Р.В.* Единая методика УРУТ – обязательное условие повышения эффективности энергетики РФ. //peretok.ru/ особое мнение / 18817//

Получена 11.02.20

REFERENCES

1. Ivanova, Ye.A. and Razorvin I.V. (2009), Benchmarking kak effektivnaya marketingovaya tekhnologiya sravnitel'nogo analiza effektivnosti. Voprosy upravleniya. Voprosy upravleniya. [Benchmarking as an effective marketing technology for comparative analysis of effectiveness. Management Issues. Management Issues], Elektronnaya versiya: <http://vestnik.uapa.ru/ru/issue/2009/02/12/>
2. GOST R50779.100-2017. (2017), "Statistical methods. The 6 Sigma Methodology. The main criteria in the organization", Standartinform, Moscow, Russia.
3. Ficher, R.A. (1935), "The fiducial argument in statistical inference", Ann Engenics, no. 6, pp. 391-398.
4. Kolmogorov, A.N. (1942), Opredeleniye tsentra rasseyaniya i mera tochnosti po ograni-chennomu chislu nablyudeniya [Determination of the scattering center and measure of ac-curacy for a limited number of observations], Izv. AN SSSR. Seriya Matem.
5. Kendall M. and St'yuart P.A. (1973), Statisticheskiye vyvody i svyazi [Statistical Find-ings and Links], Nauka.
6. Solodkaya, M.S. "Reliability, efficiency, quality of control systems", available at: <http://credonew.ru/content/view/4/18/> (accessed March 20, 2020)
7. Farkhadzade, E.M., Farzaliyev, YU.Z. and Muradaliyev, A.Z. (2015), "Method and algo-rithm for ranking boiler plants of block power plants by the criterion of reliability and effi-ciency of work", Teploenergetika, no. 10, pp. 22-29.
8. Farkhadzade, E.M., Muradaliyev, A.Z. and Farzaliyev, YU.Z. (2014), "Ranking of power units of power plants by the reliability and efficiency of their work", Problemy Energetiki, no. 2, pp. 8-16.
9. Farkhadzade, E.M., Muradaliyev, A.Z., Dzhagalova, E.I. and Abdullayeva, S.A. (2019), "Method and algorithm for comparing the performance of gas piston power plants of elec-tric power systems", Izvestiya RAN. Energetika, no. 2, pp. 106-117.
10. Farkhadzade, E.M., Muradaliyev, A.Z., Farzaliyev, YU.Z. and Abdullayeva, S.A. (2018), "Comparison and ranking of steam turbine units of TPP power units by operating efficien-cy", Teploenergetika, no. 10, pp. 41-49.
11. Farkhadzade, E.M., Farzaliyev, YU.Z. and Muradaliyev, A.Z. (2016), "Automated genera-tion of recommendations to improve the reliability and efficiency of TPP power units", Energetik, no. 2, pp. 15-17.
12. RD 34.09.454 Chast' 1. (2017), "Typical algorithm for calculating technical and economic indicators of condensing power units 300, 500, 800 and 1200 MW", VTI, Soyuztekhenenergo.
13. Farkhadzade, E.M., Muradaliyev, A.Z., Rafiyeva, T.K. and Rustamova, A.A. (2019), "Im-proving the efficiency of power units of thermal power plants", Elektricheskiye stantsii, no. 8, pp. 14-17.
14. Telenkov, R.V. "A single URUT methodology is a prerequisite for increasing the energy efficiency of the Russian Federation", available at: [//peretok.ru/osoboye_mneniye/18817/](http://peretok.ru/osoboye_mneniye/18817/) (no accessed).

Received 11.02.20

E.M.Farkhadzade, A.Z.Muradaliyev, T.K.Rafiyeva, A.A.Rustamova

BRANCHMARKINQ POWER UNITS TPS

Traditionally, the estimation of an overall performance of new power units of thermal power stations spent on size of the specific charge of conditional fuel. Thus supposed, that reliability of work and safety of maintenance service completely provided by performance of correspond-ing factory instructions and Rules. So it also is. But, in process of increase in service life of ob-

jects, necessity of the account of actual reliability and safety is shown more and more obviously. This feature finds the reflection in Service regulations, maintenance service and repair in the form of recommendations to consider a technical condition of objects. Unfortunately, it is not specified, how it to do. It shown, that the opportunity of an objective estimation of boundary values fiducially interval allows passing to normalization to values of realizations of parameters of an overall performance, to estimate an integrated parameter, to compare and range compared objects, to lead benchmarking. The risk of the erroneous decision at more perfect organization of operation, maintenance service and repair at these objects essentially decreases, that leads to increase of an overall performance. The method and algorithm of calculation of boundary values fiducially interval of realizations of parameters of an overall performance of objects of electro power systems (EPS) is developed. The illustration of an estimation of boundary values fiducially interval of integrated parameters of an overall performance and benchmarking spent on statistical data of technical and economic parameters of boiler installations of power units 300 MWt thermal power stations on gas oil fuel. Cats

К е у w o r d s: Electric power industry, benchmarking, fiducially the approach, prigrins, comparison, ranging, object, efficiency, reliability, profitability, safety.

ФАРХАДЗАДЕ Эльмар Мехтиевич, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотр. Азербайджанского научно-исследовательского и проектно-изыскательского института энергетики (г. Баку). В 1961 г. окончил Азербайджанский институт нефти и химии. Область научных исследований — надежность и эффективность электроэнергетических систем.

МУРАДАЛИЕВ Айдын Зураб оглу, д-р техн. наук, руководитель отдела «Надежность оборудования энергосистемы» Азербайджанского научно-исследовательского и проектно-изыскательского ин-та энергетики (г. Баку). В 1982 г. окончил Азербайджанский ин-т нефти и химии. Область научных исследований — количественная оценка индивидуальной надежности оборудования и устройств электроэнергетических систем.

РАФИЕВА Тамара Каировна, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела «Надежность оборудования энергосистемы» Азербайджанского научно-исследовательского и проектно-изыскательского института энергетики (г. Баку). В 1973 г. окончила Азербайджанский институт нефти и химии. Область научных исследований — имитационное моделирование индивидуальной надежности энергоблоков ТЭС.

РУСТАМОВА Айсель АлиПанач кызы, аспирантка, вед. инженер Учебного центра Азербайджанского научно-исследовательского и проектно-изыскательского института энергетики, г. Баку. В 2011 г. окончила Азербайджанскую государственную нефтяную академию. Область научных исследований — количественная оценка технического состояния теплового оборудования энергоблоков ТЭС.