

Оценка, сравнение и ранжирование показателей оперативной надежности воздушных ЛЭП электроэнергетических систем

Evaluating, comparing, and ranking operational reliability indicators of overhead transmission lines of electric power systems

Фархадзаде Э.М.¹, Мурадалиев А.З.^{1*}, Абдуллаева С.А.¹
Farhadzadeh E.M.¹, Muradalyev A.Z.^{1*}, Abdullayeva S.A.¹

¹Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики

¹Azerbaijan Scientific-Research and Design-Prospecting Institute of Energetic

*elmeht@rambler.ru



Фархадзаде Э.М.



Мурадалиев А.З.



Абдуллаева С.А.

Резюме. Систематическое увеличение относительного числа единиц оборудования, устройств и установок (далее – объектов) электроэнергетических систем, срок службы которых превышает нормативное значение, и связанные с этим фактом последствия, в том числе, недопустимые, требуют принятия решительных мер по повышению эффективности их работы. Основные усилия сегодня направлены на совершенствования методов распознавания и контроля их технического состояния. Иначе говоря, совершенно обоснованно на первый план выдвигаются проблемы повышения надежности работы и безопасности обслуживания. Контроль технического состояния воздушных ЛЭП с номинальным напряжением 110 кВ и выше предлагается проводить ежемесячно на основе показателей оперативной надежности. Излагаются новые методы и алгоритмы их оценки, сравнения и ранжирования. Поскольку показатели оперативной надежности многомерны, т.е. зависят от большого числа факторов, существующие методы сравнения и ранжирования одномерных статистических оценок к ним неприемлемы, так как пренебрежение предпосылками этих методов ведет к существенному росту риска ошибочного решения. Предлагаемые новые методы основаны на фидуциальном подходе, имитационном моделировании и теории проверки статистических гипотез. Громоздкость и трудоемкость ручного счета показателей оперативной надежности, наукоемкость методов расчета компенсируется переходом к автоматизированным системам, обеспечивающим информационную и методическую поддержку сведениями о техническом состоянии воздушных ЛЭП. Рекомендуемые методы входят в группу риск-ориентированных подходов повышения эффективности работы электроэнергетических систем.

Abstract. The systematically growing proportion of equipment, devices, and installations (hereinafter referred to as entities) of electrical power systems, whose service life exceeds the standard value, and the consequences of that fact, some of which are unacceptable, require decisive measures to improve their efficiency. Today, the effort is focused on improving the methods of identifying and monitoring their technical state. In other words, the matters associated with improving the reliability and safety of operation naturally come to the fore. The authors suggest monitoring the technical state of overhead lines with a rated voltage of 110 kV or higher monthly based on the operational reliability indicators. New methods and algorithms for their assessment, comparison, and ranking are presented. Since the operational reliability indicators are multidimensional, the existing methods for comparing and ranking unidimensional statistical estimates are unacceptable, as neglecting the premises of such methods causes a significantly higher risk of a wrong decision. The proposed new methods are based on the fiducially approach, simulation, and the theory of statistical hypothesis testing. The awkwardness and labour intensity of manual calculation of operational reliability indicators and the scientific complexity of the calculation methods are compensated by the migration to automated systems that provide procedures and information on the technical state of overhead lines. The recommended methods are part of the group of risk-based approaches to improving the efficiency of electrical power systems.

Ключевые слова. Оперативная надежность, воздушные ЛЭП, оценка, сравнение, ранжирование, классификация, фидуциальный подход, риск ошибочного решения

Keywords: operational reliability, overhead lines, assessment, comparison, ranking, classification, fiducially approach, risk of wrong decision

Для цитирования: Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А. Оценка, сравнение и ранжирование показателей оперативной надежности воздушных ЛЭП электроэнергетических систем // Надежность. 2024. №4. С. 29-37. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-29-37>

For citation: Farhadzadeh E.M., Muradalyev A.Z., Abdullayeva S.A. Evaluating, comparing, and ranking operational reliability indicators of overhead transmission lines of electric power systems. Dependability 2024;4:29-37. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-29-37>

Поступила: 26.05.2024 / **После доработки:** 31.09.2024 / **К печати:** 18.11.2024

Received on: 26.05.2024 / **Revised on:** 31.09.2024 / **For printing:** 18.11.2024

Введение

Повышение эффективности работы электросетевых предприятий (далее – ЭСП) относится к важнейшим проблемам электроэнергетических систем. Сформировано и интенсивно развивается в экономике энергетики новое научное направление «Разработка системы управления активами электросетевых компаний». Наиболее полно отражено это направление в концепции [1], где отмечается: «организация деятельности электросетевых компаний в конкурентной среде выдвигает на первый план экономические критерии при безусловном обеспечении надежности».

В [2] в то же время справедливо отмечается: «деятельность по передаче электроэнергии носит монопольный характер. Из-за этого мотивация повышения эффективности работы практически отсутствует».

И, наконец, хорошо известно, что сегодня срок службы более чем 50% объектов ЭСП превышает нормативное значение и надежды на снижение этой величины, или хотя бы непревышение ее, нет никакой [3]. Актуальность проблемы надежности объектов, срок службы которых превышает нормативное значение наглядно подтверждается материалами международных конференций [4, 5].

Необходимо учитывать, что:

- по мнению ведущих специалистов, эффективность работы сегодня определяется не только экономичностью, но и надежностью и безопасностью [6];
- последствия аварий в ЭЭС все чаще недопустимы и нарушают энергетическую безопасность;
- социальная значимость повышения тарифов на электроэнергию обуславливает систематическую поддержку государством электроэнергетических компаний при росте их оперативных издержек;
- отсутствует возможность, да и необходимость массовой замены и модернизации объектов, срок службы которых превышает нормативное значение.

А если все это учесть, то, несмотря на мнение отдельных руководителей бизнеса, сегодня важнейшей проблемой ЭЭС является *повышение надежности и безопасности объектов, срок службы которых превышает нормативное значение*.

Методический подход авторов к решению этой проблемы основан на некоторых предположениях, позволяющих использовать подходы, принятые в иных, казалось бы, совершенно отличных системах. В первую очередь

предлагается согласиться с известным постулатом, в соответствии с которым «человек создает объекты себе подобными». Это мнение позволяет использовать подходы, используемые для повышения жизнедеятельности специалиста пенсионного возраста. Главным здесь является увеличение интенсивности контроля состояния здоровья. Для электроэнергетических объектов это звучит как «увеличение интенсивности контроля технического состояния» (далее – ТС). А это нам хорошо знакомо по рекомендации перехода от планового предупредительного ремонта к ремонту по ТС [7], подробными объяснениями целесообразности учета ТС [8, 9, 10] и повышения интенсивности контроля. Аналогом оперативного контроля ТС является ежемесячная подготовка формы 3-тех(энерго) [11], характеризующей ТС энергоблоков тепловых электростанций. Однако далеко не всегда такая возможность существует. Наглядными примерами указанных объектов являются воздушные ЛЭП (далее – ВЛЭП) с номинальным напряжением 110 кВ и выше. При разработке методов и алгоритмов оценки показателей оперативной надежности и безопасности в иллюстративных целях будут использованы именно эти ВЛЭП.

1. Методические особенности оценки показателей оперативной надежности ВЛЭП

Формулы оценки показателей надежности ВЛЭП хорошо известны и десятки лет до настоящего времени используются для анализа причин возникновения аварийных отключений. Повышение безошибочности рекомендаций достигается привлечением статистических данных за ряд лет наблюдения. В справочниках и технической литературе приводятся оценки удельной повреждаемости, средней длительности простоя в аварийном и плановом (капитальном) ремонте. Оценки усреднены, как правило, по классу напряжения, изредка – по причинам отказа или материалу опор. Удельная повреждаемость приводится к ВЛЭП протяженностью 100 км. Иначе говоря, классификация статистических данных проводится традиционно по одному, максимум трем признакам. Алгоритм использования этих оценок, по рекомендации Розанова М.Н. (1984 г.), заключается в следующем: «нужно вычислить частоту отказов для ряда лет эксплуатации, построить график и экстраполировать частоту отказов

примерно на пять лет вперед. Полученную частоту отказов следует использовать при оценке надежности вновь сооружаемых объектов». В табл. 1 по данным Гук Ю.Б. (1974 г.) приведены интервалы изменения оценок удельного числа повреждений ВЛЭП.

Табл. 1. Интервалы изменения оценок удельного числа повреждения ВЛЭП.

Напряжение, кВ	Удельное число повреждений, на 100 км/год	
	Устойчивые	Неустойчивые
100; 154	0,5-1,7	5-7
220	0,25-1,5	1-2
330	0,15-1,6	0,5-1,5
500	0,2-1,1	0,15-2,5

Эти данные интересны тем, что интервалы изменения удельного числа повреждений пересекаются, что свидетельствует о нецелесообразности их классификации по признаку «класс напряжения». Вышеизложенное позволяет заключить, что существующие методы оценки показателей надежности ВЛЭП неприемлемы для оценки показателей оперативной надежности. В табл. 2 приведены рекомендуемые основные показатели оперативной надежности ВЛЭП и формулы их расчета.

2. Методические особенности сравнения оценок показателей оперативной надежности ВЛЭП

Как было отмечено выше, «механическое» сравнение оценок показателей оперативной надежности связано с большим риском ошибочного решения и обусловлено случайным характером сопоставляемых оценок. Не-

сомненна актуальность следующей эксплуатационной задачи: *оценка степени влияния на надежность ВЛЭП ЭЭС исполнения принятых ранее решений по реорганизации эксплуатации, изменения системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР)*. Эта оценка проводится путем сравнения показателей оперативной надежности до и после этих изменений.

Не менее актуальна и задача: *контроль безошибочности наблюдаемых закономерностей изменения показателей оперативной надежности во времени* с целью использования этой закономерности для прогнозирования надежности. Учет случайного характера статистических показателей принято проводить на основе теории проверки статистических гипотез. Но, поскольку основной задачей риск-ориентированного подхода является снижение риска ошибочного решения, недопустимо пренебрегать требованиями, в соответствии с которыми:

- закон распределения случайных величин должен быть известен;
- применения критериев проверки статистических гипотез, рассчитанных для одномерных случайных величин, к многомерным резко увеличивает риск ошибочного решения.

Рассматриваемые при анализе надежности ВЛЭП случайные величины далеко не всегда соответствуют нормальному закону, а оценки показателей оперативной надежности – многомерны.

Преодоление этих трудностей достигнуто применением фидуциального подхода, имитационного моделирования и руководящих принципов теории проверки статистических гипотез [12]. С высокой степенью точности моделирующие алгоритмы для ряда показателей оперативной надежности могут быть заменены разработанным экспресс-методом, основанным на аппроксимации фидуциальных распределений некоторой

Табл. 2. Рекомендуемые показатели оперативной надежности ВЛЭП.

Наименование показателя	Условное обозначение	Единица измерения	Формула оценки
Параметр потока отказов	λ_i^*	отк./км.мес	$\left[\sum_{j=1}^{N_i} n_{\Sigma,i,j} \right] / b_L \sum_{j=1}^{N_i} L_j$
Параметр потока устойчивых отказов	ω_i^*	отк./км.мес	$\left[\sum_{j=1}^{N_i} n_{y,i,j} \right] / b_L \sum_{j=1}^{N_i} L_j$
Среднемесячная вероятность устойчивого отказа	$R_{y,i}^*$	о.е.	$\frac{\omega_i^*}{\lambda_i^*}$
Среднемесячная длительность простоя в аварийном ремонте	$M_i^*(\tau_a)$	час./мес.	$\left[\sum_{j=1}^{n_{y,i}} \tau_{a,i,j} \right] / n_{y,i}$
Среднемесячный коэффициент простоя в аварийном ремонте	$K_{п,i}^*$	о.е	$K_{п,i}^* = \frac{M_i^*(\tau_a) \cdot \omega_i^*}{T_i}$

Примечание: N_i – число работающих ВЛЭП в i -ом месяце; $n_{\Sigma,i,j}$ – число отказов j -ой ВЛЭП в i -ом месяце; L_j – длина j -ой ВЛЭП, км; $n_{y,i,j}$ – число устойчивых отказов j -ой ВЛЭП в i -ом месяце; $\tau_{a,i,j}$ – длительность простоя в аварийном ремонте j -ой ВЛЭП в i -ом месяце; $b_L = 1/L_y$ – коэффициент, характеризующий длину условной линии (L_y).

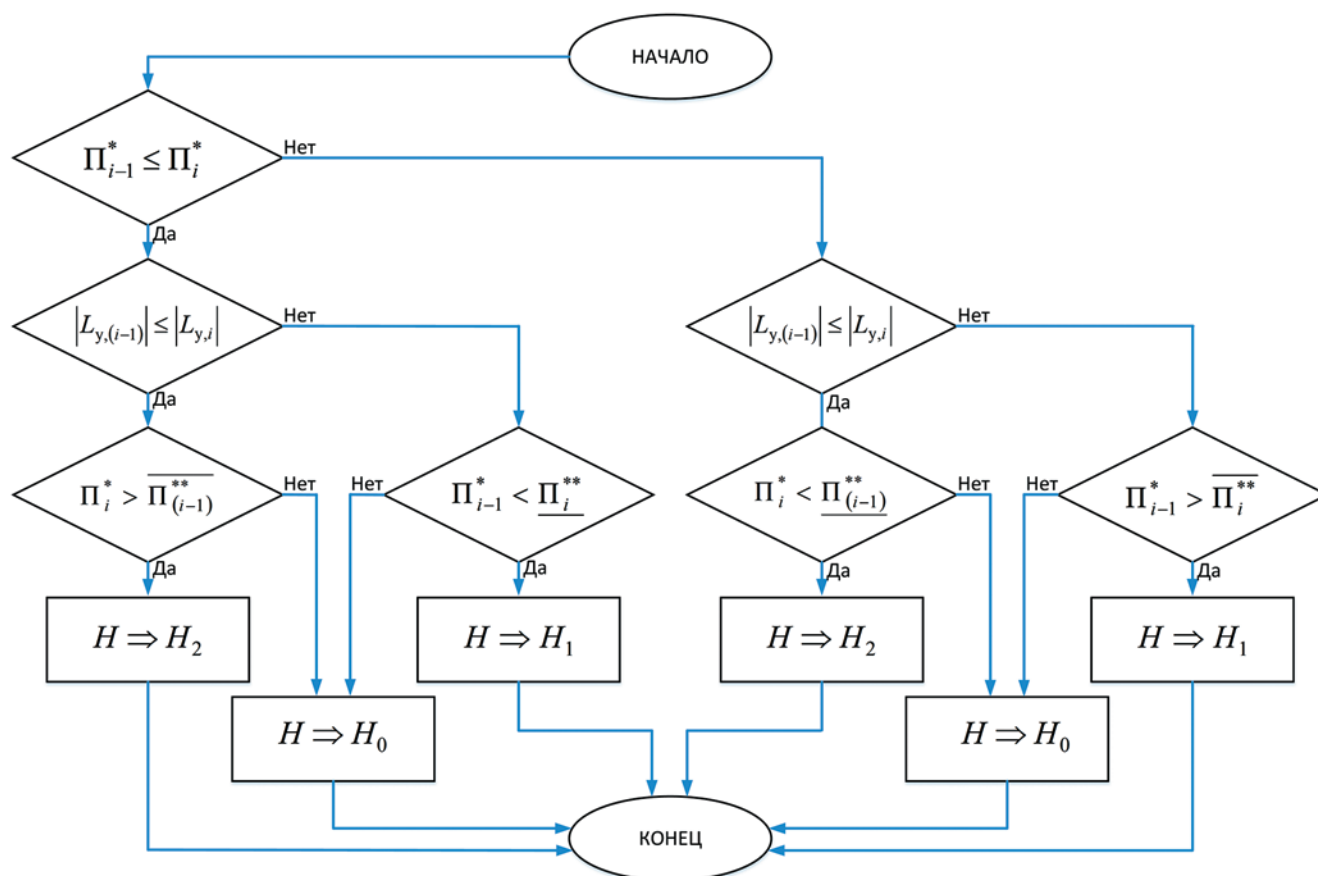


Рис. 1. Алгоритм сравнения оценок

нелинейной функций [13]. В отличие от формул для оценки показателей оперативной надежности ВЛЭП, алгоритмы сравнения среднесесячных оценок показателей оперативной надежности идентичны. Обозначим оценку (*) обобщенного показателя (Π) оперативной надежности как Π^* . Алгоритм сравнения среднесесячной оценки Π^* в i -ом месяце Π_i^* со среднесесячной оценкой в предшествовавшем $(i-1)$ месяце Π_{i-1}^* имеет следующий вид (рис. 1).

В иллюстративных целях формулы для расчета граничных значений фидуциального интервала оценок $K_{\Pi,(i-1)}^*$ и $K_{\Pi,i}^*$ приведены в табл. 3.

Табл. 3. Формулы оценок граничных значений фидуциального интервала: условных коэффициентов простоя в аварийном ремонте ВЛЭП ЭЭС за $(i-1)$ и i -ый месяцы года

Показатель	Формулы оценки	Примечание
$\underline{K_{\Pi,(i-1)}^{**}}$	$K_{\Pi,(i-1)}^* \cdot \left(1 - A_\alpha / \sqrt{J_{(i-1)}}\right)$	$J_{(i-1)} = b_L \sum_{j=1}^{N_{(i-1)}} L_j$
$\overline{K_{\Pi,(i-1)}^{**}}$	$K_{\Pi,(i-1)}^* \cdot \left(1 + A_\beta / \sqrt{J_{(i-1)}}\right)$	
$\underline{K_{\Pi,i}^{**}}$	$K_{\Pi,i}^* \cdot \left(1 - A_\alpha / \sqrt{J_i}\right)$	$J_i = b_L \sum_{j=1}^{N_i} L_j$
$\overline{K_{\Pi,i}^{**}}$	$K_{\Pi,i}^* \cdot \left(1 + A_{(1-\beta)} / \sqrt{J_i}\right)$	

3. Методические особенности ранжирования оценок показателей оперативной надежности ВЛЭП ЭСП ЭЭС

Анализ изменения оперативной надежности ВЛЭП ЭЭС конечно важен, хотя бы с точки зрения оценки влияния на надежность работы проводимых мероприятий по совершенствованию эксплуатации, ТОиР ВЛЭП. Ясно, что все эти мероприятия проводятся в определенных ЭСП и на определенных ВЛЭП. Выбор этих ВЛЭП и ЭСП проводится исходя из опыта эксплуатации, интуитивно, а часто и субъективно. Такой подход не случаен. Просто отсутствует какая-либо «подсказка», позволяющая выявить эти «слабые звенья» и снизить риск ошибочного решения. Ниже приводится метод и алгоритм решения этой задачи.

Предположим, что нам удалось оценить показатели оперативной надежности ВЛЭП ЭЭС, а классифицируя данные по перечню ЭСП, оценить показатели оперативной надежности ВЛЭП каждого ЭСП. Заметим, что в настоящем разделе рассматриваются разновидности признака, по которым целесообразно ранжировать для выявления ЭСП, ТС ВЛЭП которых требует вмешательства. Ранжировать их, т.е. размещать в порядке снижения оперативной надежности, также не представляет особого труда. А трудность заключается в том, что

все эти оценки показателей оперативной надежности ВЛЭП ЭСП имеют случайный характер, что исходит из случайного характера их отказов. Иначе говоря, наблюдаемое различие оценок, как и их отличие от показателей оперативной надежности ВЛЭП ЭЭС, может быть случайным, а сама классификация бесполезна. Мы с этим фактом встретились при анализе удельного числа ВЛЭП различных классов напряжения (см. табл. 1).

Но прежде чем рассмотреть возможность преодоления отмеченной выше трудности, необходимо иметь ввиду, что:

– рекомендуемый метод и алгоритм не зависят от типа показателя оперативной надежности. Поэтому мы сохраним смысл оценок $\overline{P_{\Sigma,j}^*}$, $\overline{P_{\Sigma,j}^{**}}$, $\overline{P_{\Sigma,j}^{***}}$, $\overline{P_{v,i,j}^*}$, $\overline{P_{v,i,j}^{**}}$, $\overline{P_{v,i,j}^{***}}$ и лишь учтем, что j – порядковый номер месяца, $j = 1, 12$; i – порядковый номер разновидностей v признака, $i = 1, m_v$; v – порядковый номер признака, $v = 1, m_n$; m_n – число рассматриваемых признаков;

– граничные значения фидуциального интервала случайно различаются друг от друга с уровнем значимости 2α . Иначе говоря, случайный характер расхождения показателей оперативной надежности ВЛЭП ЭЭС и ряда ЭСП еще не означает случайный характер расхождения всех показателей оперативной надежности ВЛЭП этих ЭСП.

Рекомендуемый метод и алгоритм ранжирования оценок показателей оперативной надежности ВЛЭП ЭСП ЭЭС сводится к следующей последовательности вычислений:

– расположенные в порядке возрастания оценки $\overline{P_{v,i,j}^*}$ сопоставляются с $\overline{P_{\Sigma,j}^{**}}$. Выделяются в первую группу оценки $\overline{P_{v,i,j}^*}$ не превышающие $\overline{P_{\Sigma,j}^{**}}$, как оценки не случайно различающиеся с оценкой $\overline{P_{\Sigma,j}^*}$;

– оставшиеся оценки $\overline{P_{v,i,j}^*}$ сопоставляются с $\overline{P_{\Sigma,j}^{***}}$. Оценки $\overline{P_{v,i,j}^*}$ не превышающие $\overline{P_{\Sigma,j}^{***}}$ составляют вторую группу и характеризуются как оценки случайно различающиеся с $\overline{P_{\Sigma,j}^*}$;

– часть оценок $\overline{P_{v,i,j}^*}$ которая превышает $\overline{P_{\Sigma,j}^{***}}$ относится к третьей группе. Рейтинг первой группы (г1) ЭСП условимся оценивать как «хороший», второй группы (г2) ЭСП – как «удовлетворительный», а третьей группы (г3) ЭСП – как «неудовлетворительный».

Объективное ранжирование оперативной надежности ВЛЭП ЭСП предполагает преодоление еще одной трудности – наличие множества показателей. Эта трудность преодолевается переходом к интегральному показателю. Рекомендуемая методология расчета интегрального показателя была использована при анализе оперативной надежности энергоблоков тепловых электростанций [14].

Суть рекомендаций сводится:

– к переходу от оценки показателя оперативной надежности к оценке ее вероятности по статистической

функции распределения $F^*(P_{v,i,j}^*)$; величина $F^*(P_{v,i,j}^*)$ характеризует величину «износа» и определяется по формуле $Iz^*(P_{v,i,j}^*) = i_v / m_n^2$, где i_v – порядковый номер v -го показателя ЭСП в ранжированном ряду данных за j -й месяц; $v = 1, m_n$, m_n – число показателей оперативной надежности;

– к расчету интегрального показателя оперативной надежности по формуле

$$In^*(Iz) = M^*[Iz^*(P_{i,j})] = \sum_{v=1}^{m_v} i_v / m_n^2.$$

Не менее значимой следует считать и задачу оценки степени повышения оперативной надежности в результате предполагаемого изменения ТООР ВЛЭП ЭСП.

Рассмотрим методологию решения этой задачи на примере средней длительности простоя в аварийном ремонте $M_{\Sigma}^*(\tau_a)$. Предположим, что по статистическим данным за j -ый месяц работы установлено, что:

– среднемесячная оценка $M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j}) = \sum_{i=1}^{n_{\Sigma}} \tau_{a,i,j} / n_{\Sigma}$, где n_{Σ} – частота простоев в аварийном ремонте;

– в результате классификации статистических данных ВЛЭП по ЭСП, их ранжирования в порядке снижения оперативной надежности и оценки характера расхождения с $M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j})$ установлено, что среднемесячные оценки $M_{v,j}^*(\tau_{a,j})$ каждой из трех групп ЭСП соответственно равны:

$$M_{г1,j}^*(\tau_{a,j}) = \sum_{i=1}^{n_{г1}} \tau_{a,i,j} / n_{г1};$$

$$M_{г2,j}^*(\tau_{a,j}) = M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j}) = \sum_{i=1}^{n_{г2}} \tau_{a,i,j} / n_{г2};$$

$$M_{г3,j}^*(\tau_{a,j}) = \sum_{i=1}^{n_{г3}} \tau_{a,i,j} / n_{г3};$$

где $n_{г1}$, $n_{г2}$, $n_{г3}$ – соответственно число реализаций длительности аварийного простоя в первой, второй и третьей группах ЭСП.

Поскольку в третьей группе размещаются ЭСП, среднемесячная длительность простоя в аварийном ремонте которых неслучайно превышает $M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j})$, то, естественно, необходимо, прежде всего, обеспечить восстановление износа ВЛЭП ЭСП третьей группы. Очевидно, что в результате восстановления износа среднемесячное значение $M_{г3,j}^*(\tau_{a,j})$ будет случайно отличаться от ВЛЭП ЭСП первой группы. При этом снижение продолжительности простоя в аварийном ремонте ЭСП третьей группы будет равно

$$\Delta \sum_{i=1}^{n_{г3}} \tau_{a,i,j} = \sum_{i=1}^{n_{г3}} \tau_{a,i,j} - M_{г1,j}^*(\tau_{a,j}) n_{г3,j}.$$

А относительная величина этого снижения равна:

$$\delta M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j}) = \frac{n_{r3,j} [M_{r3,j}^*(\tau_{a,j}) - M_{r1,j}^*(\tau_{a,j})]}{n_{\Sigma,j} \cdot M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j})}.$$

По аналогии могут быть получены формулы оценки относительной величины изменения оперативной надежности ВЛЭП ЭЭС и для других показателей. Результаты этих преобразований приведены в табл. 4.

Табл. 4. Формулы оценки возможного изменения оперативной надежности ВЛЭП ЭЭС в результате восстановления износа

Показатель	Формулы расчета возможного повышения оперативной надежности
$\delta \lambda_{\Sigma,j}^*$	$\left[b_L (\lambda_{r3,j}^* - \lambda_{r1,j}^*) \sum_{i=1}^{N_{r3,j}} L_i \right] / \left[b_L \lambda_{\Sigma,j}^* \sum_{i=1}^{N_{\Sigma}} L_i \right]$
$\delta \omega_{\Sigma,j}^*$	$\left[b_L (\omega_{r3,j}^* - \omega_{r1,j}^*) \sum_{i=1}^{N_{r3,j}} L_i \right] / \left[b_L \omega_{\Sigma,j}^* \sum_{i=1}^{N_{\Sigma}} L_i \right]$
$\delta M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j})$	$\frac{n_{r3,j} [M_{r3,j}^*(\tau_{a,j}) - M_{r1,j}^*(\tau_{a,j})]}{n_{\Sigma,j} \cdot M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j})}$
$\delta K_{\Pi,\Sigma,j}^*$	$\frac{\omega_{r3,j} [M_{r3,j}^*(\tau_{a,j}) - M_{r1,j}^*(\tau_{a,j})]}{\omega_{\Sigma,j} M_{\Sigma,j}^*(\tau_{a,j})}$
$\delta R_{\Sigma,j}^*$	$\frac{n_{r3,j} [R_{r3,j}^* - R_{r1,j}^*]}{n_{\Sigma,j} R_{\Sigma,j}^*}$

4. Методические особенности бенчмаркинга оперативной надежности ЭСП ЭЭС.

Бенчмаркинг ЭСП ЭЭС относится к категории внутренних. Напомним, что внутренний бенчмаркинг [15]:

- это вид сравнительного анализа;
- суть его заключается в выявлении наиболее и наименее эффективных однотипных объектов;
- это наименее затратный вид исследования;
- его основная задача – выявить объекты, повышение эффективности работы которых в наибольшей степени повышает эффективность работы системы в целом;
- благодаря своей простоте является лучшим способом снижения риска ошибочного решения;
- наибольший эффект имеет место лишь при систематическом сравнительном анализе. Одноразовое применение приводит лишь к временному успеху.

Сравнительный анализ оперативной надежности совокупности ВЛЭП ЭСП ЭЭС позволяет безошибочно

решать многие эксплуатационные задачи на уровне ЭЭС. Но он совершенно недостаточен для самих ЭСП. И действительно. Руководству ЭСП, конечно, важно знать, насколько руководимое им ЭСП отличается от других ЭСП энергосистемы, как изменилась надежность работы ВЛЭП в расчетном месяце, насколько эффективны были новые подходы к распознаванию аварийно-опасных дефектов. Но, в первую очередь, руководитель ЭСП должен точно знать, на что направить усилия для повышения рейтинга ЭСП.

Как уже отмечалось выше, «механическая» классификация ВЛЭП ЭСП связана с высоким риском ошибочного решения. Для выявления «слабых звеньев», снижающих рейтинг ЭСП, необходимо:

- для каждого ЭСП, рейтинг ТС которых оценивается как неудовлетворительный:

- классифицировать ВЛЭП и статистических данных об их простое в аварийном ремонте по каждому из $n_{\Pi}-1$ заданных признаков (за исключением признака наименование ЭСП) и его разновидностям. Предварительно при непрерывном характере изменения разновидностей признаков, они трансформируются в дискретные;

- для каждой разновидности признака вычисляется оценка показателя оперативной надежности $\Pi_{v,i,j}^*$;

- определяется максимальное значение оценок $\Pi_{v,i,j}^*$, с $v = 1, m_i$, где m_i – число разновидностей i -го признака;

$\Pi_{\max,i,j}^* = \max \{ \Pi_{1,i,j}^*, \dots, \Pi_{m_i,i,j}^* \}$. Очевидно, что это наиболее значимая разновидность i -го признака;

- определяется наиболее значимый признак

$$\Pi_{\max,j}^* = \max \{ \Pi_{\max,1,i,j}^*; \Pi_{\max,2,i,j}^*; \dots; \Pi_{m_i,n_{\Pi},j}^* \};$$

- определяются признаки, оценки показателей оперативной надежности которых превышают оценку $\Pi_{r3,j}^*$;

- именно по этим признакам проводится классификация ВЛЭП и статистических данных об их простое в аварийном ремонте, по которым рассчитана оценка $\Pi_{\max,j}^*$;

- далее расчеты проводятся аналогично вышеизложенному. Расчеты завершаются при рассмотрении всех возможных и целесообразных классификаций и всех ЭСП с неудовлетворительным рейтингом.

В результате проведенных вычислений для каждого ЭСП с неудовлетворительным рейтингом определяется совокупность ВЛЭП, обуславливающих этот рейтинг. Именно этот перечень и рекомендуется для восстановления ТС ВЛЭП.

5. Формирование информационной и методической поддержки руководства ЭСП и ЭЭС

Ценой повышения достоверности риск-ориентированного подхода, естественно, является повышение наукоемкости, громоздкости ручного счета. Проверка достоверности осуществляется методом решения «об-

ратной задачи», когда рекомендации тривиальны. Усилия требуются лишь для подготовки в табличной форме ежемесячных сведений об автоматических аварийных отключениях ВЛЭП. В день ввода информации главные инженеры ЭЭС и ЭСП получают специализированные формы, содержащие сведения об оперативной надежности, соответственно, ВЛЭП ЭЭС и ЭСП и рекомендации по повышению эффективности работы. Сведения об оперативной надежности и рекомендации для ВЛЭП ЭСП предварительно утверждаются главным инженером ЭЭС [16].

Заключение

- 1) Предложена совокупность показателей оперативной надежности и формулы их оценки;
- 2) Разработан новый алгоритм оценки целесообразности классификации многомерных данных об отказах и длительности простоя ВЛЭП. На каждом этапе классификации совокупность ВЛЭП представляется тремя группами. Первая группа включает ЛЭП, оценка показателя оперативной надежности которых неслучайно меньше оценки аналогичного показателя для совокупности ЛЭП; вторая группа включает ЛЭП, оценка показателя оперативной надежности которых случайно отличается от аналогичного показателя для совокупности ЛЭП; третья группа включает ЛЭП, оценка показателя оперативной надежности которых неслучайно больше оценки аналогичного показателя для совокупности ЛЭП;
- 3) Разработаны методы и алгоритмы сравнения двух многомерных оценок показателей оперативной надежности ВЛЭП, позволяющие оценить характер изменения надежности этих ЛЭП во времени;
- 4) Разработаны методы и алгоритмы ранжирования показателей оперативной надежности ВЛЭП электросетевых предприятий, позволяющих выявить ЛЭП, требующих оперативного освидетельствования;
- 5) Разработаны методы и алгоритмы расчета оценки интегрального показателя оперативной надежности;
- 6) Обеспечивается ежемесячная информационная и методическая поддержка технического руководства электросетевых предприятий и электроэнергетической системы. Методическая поддержка включает рекомендации по повышению надежности ЛЭП.

Библиографический список

1. Волкова И.О. Концепция построения системы управления активами электросетевых компаний в России на основе бенчмаркинга // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2008. № 2. С. 101–108.
2. Карпов Н.В. Стратегия управления производственными активами электросетевой компании //

Вестник Омского университета. Серия: Экономика: Науч. журн. 2019. Т. 17. № 2. С. 112–123. DOI: 10.25513/1812-3988.

3. Грабчак Е.П. Оценка технического состояния энергетического оборудования в условиях цифровой экономики // Надежность и безопасность в энергетике. 2017. Т. 10. № 4. С. 268–274.

4. V Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния оборудования объектов электроэнергетики»: сборник трудов. Москва, 2018.

5. VI Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния оборудования объектов электроэнергетики»: сборник трудов. Москва, 2019.

6. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Г.А. Данилов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, Г.В. Ситников; под ред. В.П. Горелова, В.Г. Сальникова. 3-е изд. Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2019. 560 с.

7. СТО-34.01-24-003-2017. Стандарт организации ПАО «Россети». Система управления производственными активами. Порядок фиксации и классификации дефектов. Порядок ведения электронного журнала дефектов. Утв. распоряжением ПАО «Россети» от 21.04.2017 № 212р. 22 с.

8. СТО-34.01-23.1-001-2017. Стандарт организации ПАО «Россети». Объем и норма испытания электрооборудования. Утв. распоряжением ПАО «Россети» от 29.05.2017 № 280р. 262 с.

9. СТО-34.01-24-002-2018. Стандарт организации ПАО «Россети». Организация технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики. Утв. распоряжением ПАО «Россети» от 16.10.2018 № 456р. 110 с.

10. СТО-34.01-35-001-2020. Стандарт организации ПАО «Россети». Методические указания по проведению технического освидетельствования оборудования подстанций, линий электропередачи. Утв. распоряжением ПАО «Россети» от 21.12.2020 № 418. 20 с.

11. РД 34.09.453 Типовой алгоритм расчета технико-экономических показателей мощных отопительных ТЭЦ. СПО «Союзтехэнерго», 1983 (актуализация 01.01.2021).

12. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А. Фидуциальный подход при сравнении однотипных объектов // Электронное моделирование. 2019. № 1. С. 55–66. DOI: 10.15407/emodel.42.01.013

13. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А. и др. Метод и алгоритм сравнения эффективности работы газопоршневых электростанций электроэнергетических систем // Известия РАН. Энергетика. 2019. № 2. С. 106–117. DOI: 10.1134/S0002331019020067

14. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А. и др. Сравнение и ранжирование паротурбинных установок энергоблоков ТЭС по эффективности работы // Теплоэнергетика. 2018. № 10. С. 41–49. DOI: 10.1134/S0040363618100028

15. Кане М.М., Иванов Б.В. и др. Системы, методы и их инструменты менеджмента качества. 2-ое изд. СПб.: Ид. «Питер», 2017. 576 с.

16. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Рафиева Т.К. и др. Обеспечение достоверности методической поддержки объектов электроэнергетических систем // *Электричество*. 2020. № 2. С. 4-9. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-2-4-9

References

1. Volkova I.O. Conception of network company's asset management system creation in Russia on benchmarking base. *π-Economy* 2008;2:101-108. (in Russ.)

2. Karpov N.V. [A strategy for managing industrial assets of an electric grid company]. *Herald of Omsk University. Series "Economics"* 2019;17(2):112-123. DOI: 10.25513/1812-3988. (in Russ.)

3. Grabchak E.P. Assessment of technical condition of power equipment in conditions of digital economy. *Safety and Reliability of Power Industry* 2017;10(4):268-274. (in Russ.)

4. [Proceedings of the V Science and Practice Conference Monitoring the Technical State of Electric Power Facilities]. Moscow; 2018. (in Russ.)

5. [Proceedings of the VI Science and Practice Conference Monitoring the Technical State of Electric Power Facilities]. Moscow; 2019. (in Russ.)

6. Danilov G.A., Denchik Yu.M., Ivanov M.N., Sitnikov G.V. Gorelov V.P., Salnikov V.G., editors. [Improving the operational performance of power transmission lines. 3rd ed.]. Moscow; Berlin: Direct Media; 2019. (in Russ.)

7. [STO-34.01-24-003-2017. ROSSETI standard. Operational asset management system. Procedure for recording and classifying defects. Procedure for electronic logging of defects. Approved by the order of ROSSETI dated 04.21.2017 No. 212p.]. (in Russ.)

8. [STO-34.01-23.1-001-2017. ROSSETI standard. Scope and code for testing electrical equipment. Approved by the order of ROSSETI dated 05.29.2017 No. 280r.]. (in Russ.)

9. [STO-34-01-24-002-2018. ROSSETI standard. Organisation of maintenance and repair of electric power facilities. Approved by the order of ROSSETI dated 16.10.2018 No. 456r.]. (in Russ.)

10. [STO-34.01-35-001-2020. ROSSETI standard. Methodological guidelines for technical certification of substation equipment and power transmission lines. Approved by order of ROSSETI dated 12.21.2020 No. 418]. (in Russ.)

11. [RD 34.09.453. Standard algorithm for calculating key performance indicators of powerful heating power plants. (updated 01.01.2021)]. SPO Soyuztekhenergo; 1983. (in Russ.)

12. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Rafiyeva T.K., Abdullayeva S.A. Fiducially approach in maintenance of homogeneous technical and economic param-

eters. *Elektron. model.* 2020;42(1):13-24. DOI: 10.15407/emodel.42.01.013. (in Russ.)

13. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Abdullayeva S.A. et al. Method and algorithm a comparison efficiency of gas and piston power stations of the electro power systems. *Izvestiya RAN. Energetika* 2019;2:106-117. DOI: 10.1134/S0002331019020067. (in Russ.)

14. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Farzaliyev Y.Z., Abdullayeva S.A. Comparison and ranking of steam-turbine installations of thermal power-stations' power-generating units by working efficiency. *Thermal Engineering* 2018;65(10):708-715.

15. Kaneh M.M., Ivanov B.V. et al. [Quality management systems, methods, and tools. 2-nd ed.]. St. Petersburg: Izd. Piter; 2017. (in Russ.)

16. Farkhadzade E.M., Muradaliyev A.Z., Rafiyeva T.K. et al. Ensuring the validity of methodical support for managing electric power system components. *Elektrichestvo* 2020;2:4-9. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-2-4-9 (in Russ.)

Сведения об авторах

ФАРХАДЗАДЕ Эльмар Мехтиевич, д.т.н., профессор. В 1961 году окончил энергетический факультет Азербайджанского института нефти и химии (АЗИНЕФТЕХИМ) г. Баку. В 1982 году защитил докторскую диссертацию по теме «Точность и достоверность характеристик надежности электроустановок» в Новосибирском электротехническом институте (НЭТИ). Главный научный сотрудник АзНИПИИ Энергетики г. Баку. Область научных исследований – надежность и эффективность электроэнергетических систем. E-mail: elmeht@rambler.ru Адрес: AZ1012, г. Баку, пр. Г.Зардаби 94

МУРАДАЛИЕВ Айдын Зураб оглу, д.т.н., доцент. В 1982 году окончил энергетический факультет Азербайджанского института нефти и химии (АЗИНЕФТЕХИМ) г. Баку. В 2013 году защитил докторскую диссертацию по теме «Разработка методов и алгоритмов расчета показателей индивидуальной надежности оборудования и устройств ЭЭС». Ведущий научный сотрудник отдела «Надежность оборудования энергосистемы» АзНИПИИ Энергетики г. Баку. Область научных исследований – количественная оценка индивидуальной надежности оборудования и устройств электроэнергетических систем. E-mail: aydin_murad@yahoo.com. Адрес: AZ1012, г.Баку, пр. Г. Зардаби 94

АБДУЛЛАЕВА Самира Афган кызы, к.т.н. В 1990 году окончила энергетический факультет Азербайджанского института нефти и химии (АЗИНЕФТЕХИМ) г. Баку. В 2018 году защитила кандидатскую диссертацию. Старший научный сотрудник отдела «Надежность оборудования энергосистемы» Азербайджанского научно-исследовательского и проектно-изыскательского института Энергетики, г. Баку.

About authors

Elmar M. Farkhadzade, Doctor of Engineering, Professor. In 1961, he graduated from the Energy Faculty of the Azerbaijan Institute of Oil and Chemistry (AzINEFTEKHIM) in Baku. In 1982, he defended his doctoral dissertation on the 'Accuracy and reliability characteristics of electrical installations' in the Novosibirsk Electrotechnical Institute (NETI). Chief scientific officer of AzNIPPI Energetics in Baku. His field of research is reliability and efficiency of electrical power systems. E-mail: elmeht@rambler.ru Address: AZ1012, Baku, 94, G.Zardabi Ave.

Aydin Z. Muradaliyev, Doctor of Engineering, Associate Professor. In 1982, he graduated from the Energy Faculty of the Azerbaijan Institute of Oil and Chemistry (AzINEFTEKHIM) in Baku. In 2013, he defended his doctoral thesis titled 'Development of methods and algorithms for calculating the indicators of individual reliability of equipment and devices of EES'. Lead researcher, Reliability of Power System Equipment, AzNIPPI Energetika, Baku. His field of research is quantitative estimation of individual reliability of equipment and devices of electrical power systems. E-mail: aydin_murad@yahoo.com. Address: 94 G. Zardabi Ave., Baku, AZ1012.

Samira A. Abdullaeva, Candidate of Engineering. In 1990, she graduated from the Faculty of Energy of the Azerbaijan Institute of Oil and Chemistry (AzINEFTEKHIM), Baku. In 2018, she defended her PhD thesis. Senior Researcher, Reliability of Power System Equipment, Azerbaijan Research and Design and Survey Institute of Power Engineering, Baku.

Вклад авторов

Фархадзаде Э.М. – обоснование актуальности исследования, постановка цели решаемой задачи и разработка методики исследования.

Мурадалиев А.З. – анализ источников информации, разработка алгоритмов и программного обеспечения решаемой задачи; обсуждение промежуточных результатов; подготовка материалов к публикации.

Абдуллаева С.А. – анализ источников информации; проведение расчетов и обсуждение промежуточных результатов; оформление статьи в целом.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.