

Методы и алгоритмы сравнения и ранжирования надежности и экономичности работы объектов электроэнергетических систем

ФАРХАДЗАДЕ Э.М., МУРАДАЛИЕВ А.З., ФАРЗАЛИЕВ Ю.З., ИСМАИЛОВА С.М.

Снижение риска ошибочного решения достигается повышением достоверности сравнения и ранжирования объектов по надежности и экономичности их работы. При этом количественные оценки интегральных показателей основываются на совокупности разнотипных данных. Совместная их обработка требует преодоления ряда трудностей, обусловленных различием единиц, масштаба и шкалы их измерения. Разработаны методы и алгоритмы, основанные на ранговом подходе. Эти методы позволяют выявить «слабые звенья» среди признаков, характеризующих надежность и экономичность работы, сравнить и ранжировать одноименные объекты, оценить взаимосвязь признаков путем расчета коэффициентов ранговой корреляции. Разработанные алгоритмы и программы расчета дают возможность автоматизированной системе своевременно обеспечивать персонал информационной и методической поддержкой.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электроэнергетическая система, надежность, экономичность, оборудование, интегральный показатель, расчет

Возможность количественной оценки интегральных показателей индивидуальной надежности (ПН) конкретного оборудования и устройств (объектов) ЭЭС является одним из неперемных условий снижения эксплуатационных затрат [1]. Не так давно для количественной характеристики надежности вычислялись усредненные значения единичных и комплексных ПН. Для чего использовались сведения об отказах, длительности простоев в плановых и аварийных ремонтах. Сегодня важно не только уметь рассчитать ПН, но и уметь сравнить и ранжировать по критерию надежности и экономичности работы одноименные объекты с учетом случайного характера этих оценок.

Для снижения риска ошибочного решения эксплуатационных задач, связанных с организацией технического обслуживания и ремонта (ТО и Р), к сведениям об отказах и простоях объектов, как правило, добавляются сведения об испытаниях и оценке износа, сведения о технологических показателях, характеризующих техническое состояние отдельных узлов оборудования. Объем последних систематически возрастает в связи с ростом возможности непрерывного и периодического автоматизированного контроля их технического состояния (стационарными и переносными диагностическими устройствами). Наглядным примером могут служить устройства автоматизированного контроля технического состояния трансформаторного масла.

Наряду с параметрами и показателями (признаками), измеряемыми в количественной (к) шкале, используются сведения, измеряемые в порядковой (п) и номинальной (н) шкале. Именно они во мно-

гом позволяют отразить индивидуальность объектов.

Такое увеличение разнообразия используемых сведений не случайно.

Во-первых, повышение надежности объектов ЭЭС приводит к тому, что сведений об отказах, о плановом и аварийном ремонте становится все меньше (наглядным примером служат элегазовые выключатели), а различить надежность одноименных объектов по этим данным все труднее. В одинаковой степени это относится как к единичным, так и к комплексным ПН.

Во-вторых, учет надежности во многом относился к безотказности и ремонтпригодности объектов. Количественная оценка таких свойств надежности, как долговечность и сохраняемость, стала возможной в результате применения данных об износе, вычисляемому по результатам профилактических испытаний и по непрерывно регистрируемым технико-экономическим показателям лишь недавно. Возможность количественной оценки режимной управляемости и безопасности находится на начальном этапе исследования, а оценка интегральных показателей и характеристик надежности – на начальном этапе обсуждения.

Увеличение разнообразия привлекаемой для оценки надежности объектов ЭЭС информации, как и следовало ожидать, создает определенные трудности в совместном их использовании. Трудность обуславливается, прежде всего, различными шкалами, единицами и масштабами измерения этих данных. Например, срок службы и длительность простоя в аварийном ремонте объектов изме-

ряются в одной и той же количественной шкале, но существенно отличаются единицами и масштабом измерения, качество ремонта измеряется в порядковой шкале, а диспетчерские номера оборудования — в номинальной шкале. Напомним, что к этим сведениям могут быть применены лишь определенные, зависящие от типа шкалы, математические преобразования [2]. Например, очевидно, что определять среднее арифметическое диспетчерских номеров объектов, так же как и умножать или делить номинальные напряжения, бессмысленно. Но, не очевидно, что ошибочно вычислять среднюю оценку показателей, характеризующих знания по ряду правил, обеспечивающих безопасность жизнедеятельности, оценку качества технического обслуживания и ремонта узлов объекта, номеров гармоник напряжения и тока. Преодоление этих трудностей требует разработки методов и алгоритмов сравнения и ранжирования надежности по разнотипным данным.

Методы и алгоритмы расчета интегральных показателей и характеристик. 1. Классификация решаемых задач. Прежде чем рассмотреть последовательность расчета интегральных показателей и характеристик, уточним типы решаемых задач. Будем различать задачи анализа и синтеза статистических данных.

Задачи анализа предусматривают классификацию данных и включают:

формирование перечня значимых разновидностей признаков (РП), характеризующих объекты ЭЭС;

оценку интегральных показателей и характеристик конкретных объектов;

формирование кластеров одноименных объектов, интегральные показатели и характеристики которых с заданным риском ошибочного решения различаются случайно.

Задачи синтеза сводятся к замене множества параметров и показателей признаков, характеризующих надежность и экономичность объектов ЭЭС интегральными показателем и характеристикой [3]. *Методы оценки интегральных показателей и характеристик с учетом их случайного характера не разработаны.*

Задачи анализа статистических данных при классификации ПН решаются применением фидуциального подхода, имитационного моделирования закономерностей изменения случайных величин и проверки статистических гипотез о целесообразности классификации статистических данных [4]. *Методы классификации статистических данных при расчете интегральных показателей и характеристик не разработаны.*

Решение задач синтеза предусматривает предварительную обработку статистических данных, а именно:

переход от непрерывных значений реализаций к дискретным значениям;

формирование групп взаимосвязанного перечня независимых признаков; распознавание независимости может быть проведено двояко: первый способ основан на корреляционном анализе, а второй — на основе анализа значимости признаков;

оценку направленности изменения каждого независимого признака.

В задачах анализа целесообразность классификации данных по заданной РП с номинальной шкалой измерения предполагается оценивать путем сопоставления статистических функций распределения (с.ф.р.) баллов совокупности признаков объектов и с.ф.р. баллов неслучайной выборки. В задачах синтеза интегральные показатели и характеристики каждого объекта традиционно рассчитываются как среднее нормированных значений признаков. Эти вычисления проводятся при условии, что заданные технико-экономические показатели измеряются в количественной шкале, а их число достаточно полно характеризует условия надежности и экономичности работы объекта.

Пусть в результате сбора статистических данных получены сведения по m_2 признакам одноименных объектов, в том числе по m_1 признакам, измеряемым по количественной шкале, по m_2 признакам, измеряемым по порядковой шкале, и m_3 признакам, измеряемым по шкале наименований.

Эти сведения в энергосистемах, как правило, размещаются в базе данных автоматизированной системы анализа технического состояния объектов ЭЭС в виде информационных карт паспортных данных и данных по условиям эксплуатации [6]. Рассмотрим случай, когда непрерывная диагностика технического состояния объектов отсутствует, реальная частота отказов не позволяет оценить многие показатели надежности и экономичности работы. Повышение достоверности расчета интегральных показателей и характеристики достигается совместным рассмотрением признаков с количественной и порядковой шкалой измерения.

2. Преобразование исходных данных. Проведению расчетов предшествует преобразование количественной шкалы признаков в порядковую. Такое преобразование позволяет увеличить число признаков, определяющих интегральные показатель и характеристику с m_1 до $(m_1 + m_2)$. Преобразование проводится по следующим этапам.

1. Размах изменения количественных показателей признаков $L^*(P_j^*) = (P_{j\max}^* - P_{j\min}^*)$, где

$$P_{j\max}^* = \max\{P_{i,j}^*\}_{i=1,n}; \quad P_{j\min}^* = \min\{P_{i,j}^*\}_{i=1,n},$$

разбивается на пять интервалов (по аналогии с принятой системой классификации качества ремонта). Каждому интервалу соответствует порядковый номер $K=1 \div 5$, который и является его количественным аналогом (рангом).

2. Обеспечение независимости признаков с учетом причинно-следственных связей является неприменным условием достоверности сравнения объектов ЭЭС. Наличие зависимых признаков обуславливает доминирование направленности их изменения и искажение результатов расчета. Оценка степени взаимосвязи признаков может быть выполнена по значению рангового коэффициента корреляции и выявлением значимых статистически независимых признаков.

3. Расчет интегральных показателя и характеристики объекта требует учета направленности изменения признаков. Если увеличение показателя приводит к увеличению надежности и экономичности работы объекта, направленность его изменения условно называется изменением первого типа (S_1). Если же увеличение показателя приводит к снижению надежности и экономичности работы, то — изменением второго типа (S_2). Поэтому интервалам показателей типа S_1 в зависимости от количественной оценки присваиваются порядковые номера $1 \div 5$, а интервалам показателей типа S_2 — номера $5 \div 1$. Если не учитывать эту особенность, то нарушится соотношение чисел одинаковых порядковых номеров со всеми вытекающими отсюда по-

следствиями. Учет направленности изменения признака часто очевиден. В спорных случаях может быть привлечена информация о ранговых коэффициентах корреляции. В табл. 1 приведены некоторые характеристики силовых трансформаторов.

В табл. 2 приведены разновидности некоторых признаков силовых трансформаторов типа S_2 .

На рис. 1 приведен фрагмент информационной таблицы паспортных и эксплуатационных данных одного из силовых трансформаторов ЭЭС, а в табл. 3 приведены результаты формирования перечня РП выборки силовых трансформаторов одного из сетевых районов.

Эти данные будут использованы при иллюстрации решения практических задач.

3. Анализ взаимосвязи признаков. Под независимым признаком будем понимать признак, воздействие которого на надежность и экономичность работы объекта не зависит от воздействия остальных признаков.

Характер зависимости признаков, разновидности которых задаются порядковыми номерами интервалов, может быть установлен по одному из ранговых критериев. Воспользуемся критерием Спирмана [2]. Суть этого критерия состоит в сравнении оценки ранговой корреляции ρ_{ε} (индекс «э» выделяет вычисление ρ по статистическим данным эксплуатации). Возможно моделирование реализаций ρ^* с критическим значением ρ_K по алгоритму:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если } \rho_{\varepsilon} \geq \rho_{K\alpha}, \text{ то } H \Rightarrow H_2 \\ \text{иначе} \quad \quad \quad H \Rightarrow H_1, \end{array} \right\} \quad (1)$$

Таблица 1

Номер п/п	Признаки силовых трансформаторов	Условное обозначение	Единица измерения	Тип	
				шкалы	показателя
1	Номинальное напряжение	$U_{\text{ном}}$	кВ	н	—
2	Срок службы	$T_{\text{сл}}$	год	к	S_2
3	Наработка после капитального ремонта	$\Delta T_{\text{кр}}$	год	к	S_2
4	Число отключений по аварийной заявке	$n_{\text{ав}}$	—	к	S_2
5	Коэффициент технического использования	$K_{\text{ти}}$	отн. ед.	к	S_1
6	Техническое состояние	$ТС$	—	п	S_1
7	Последствия отказа	$ПО$	—	п	S_1
8	Конструктивное исполнение	$КИ$	—	н	—
9	Относительная длительность простоя в аварийном ремонте	$\delta T_{\text{ав}}$	отн. ед.	к	S_2
10	Номинальная мощность	$S_{\text{н}}$	МВА	н	—
11	Средняя нагрузка	$\delta S_{\text{ср}}$	отн. ед.	к	S_2
12	Максимальная нагрузка	δS_{max}	отн. ед.	к	S_2
13	Число сквозных КЗ после капитального ремонта	$n_{\text{к}}$	—	к	S_2
14	Завод-изготовитель	$ЗИ$	—	н	—

Таблица 2

Номер п/п	Тип признака	Номер разновидности признаков				
		5	4	3	2	1
1	$T_{\text{сл}}$, лет	< 10	11–20	21–30	31–40	> 41
2	$\delta S_{\text{ср}}$, отн.ед.	< 0,4	0,41÷0,6	0,61÷0,8	0,81÷1,00	> 1,0
3	$\Delta T_{\text{кр}}$, лет	< 4	5÷8	9÷12	13÷16	> 16
4	$n_{\text{ав}}$, отк	0	1	2	3	> 3
5	$n_{\text{к.з}}$	0	1	2	3	> 3
6	Техническое состояние	Показательное	Хорошее	Удовлетворительное	Зона риска	Дефектное

Таблица 3

Номер п/п	Тип трансформатора	Условный номер признака					
		$T_{\text{сл}}$	$\delta S_{\text{ср}}$	$\Delta T_{\text{кр}}$	$n_{\text{ав}}$	$n_{\text{к.з}}$	TC
1	АТДЦТН-250000/220	5	4	4	4	5	4
2	ТДТН-63000/110	4	3	3	3	2	3
3	IEC-60076	5	4	3	3	3	2
4	ТДН-16000/110	2	6	2	2	2	2
5	ТДН-25000/110	4	4	5	5	4	5
6	ТДТН-25000/110	2	3	2	2	1	2
7	ТДТН-40000/110	2	3	1	1	1	1
8	ТДТН-25000/110	5	5	5	5	5	5
9	ТМН-10000/110	5	3	4	5	3	3
10	АТДЦТН-250000/330	5	2	4	5	4	5
11	ТДН-80000/330	4	4	4	4	4	4
12	ТДТН-10000/110	3	3	3	2	1	3
13	ТДН-25000/110	4	4	3	4	2	4
14	АТДЦТН-200000/220	3	3	2	1	5	2
15	IEC-60076	5	4	3	3	4	4
16	АОДЦТН-167000/500	5	4	4	5	5	5
17	АОДЦТН-167000/500	5	4	4	5	5	5
18	ТДТН-40000/110	1	5	2	3	1	4
19	АТДЦТН-250000/220	4	3	4	4	5	5

где

$$\rho_{\text{э}} = \frac{\sum_{j=1}^n (S_{1j} - \bar{S}_1)(S_{2j} - \bar{S}_2)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (S_{1j} - \bar{S}_1)^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (S_{2j} - \bar{S}_2)^2}}; \quad (2)$$

S_{1j} и S_{2j} – ранг первой и второй выборки случайных величин соответственно; n – число объектов; H_1 и H_2 – предположения об отсутствии и наличии взаимосвязи выборок соответственно; α – уровень значимости; $\bar{S}_1 = \sum_{j=1}^{n_{\Sigma}} S_{1j}$; $\bar{S}_2 = \sum_{j=1}^{n_{\Sigma}} S_{2j}$.

Оценка взаимосвязи признаков проводится по данным табл. 3, а ранжирование выборок – с уче-

том повторяемости порядковых номеров РП трансформаторов.

Последовательность расчетов коэффициентов ранговой корреляции Спирмана между сроком службы ($T_{\text{сл}}$) и относительным значением средней нагрузки ($\delta S_{\text{ср}}$) приведена в табл. 4.

Как и следовало ожидать, увеличение срока службы не ведет к пропорциональному снижению нагрузки. Эти два показателя практически независимы, так как $\rho_{\text{э}} \ll \rho = 0,456$ для $\alpha = 0,05$. Громоздкость расчетов иллюстрируется преднамеренно. Если же учесть необходимость составления матрицы коэффициентов ранговой корреляции, то целесообразность перехода к автоматизированной системе расчета $\rho_{\text{э}}$ не вызывает сомнения.

ПАСПОРТНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	
ПАСПОРТНЫЕ ДАННЫЕ	
Тип трансформатора	ТДН-80000/110
Завод-изготовитель	ЗТЗ
Заводской номер	133329
Вид трансформатора	Тр-р
Год изготовления	1988
Номинальное напряжение, кВ	110
Номинальная мощность, МВА	80
Число фаз	3
Число обмоток	3
Система охлаждения	Д
Тип РПН	
Привод РПН	
Тип обмотки НН	Нерасщепл.
Фаза	
Способ защиты масла	своб. дыхание
Исполнен. маслонапол. вводов	
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ	
Назначение тр-ра	эл. снабжения
Наим. предприятия	Сумгаит ВВЭС
Наим. подстанции	СУМГАИТ-2 110/35 кВ.
Диспетчерское обозначение	Т1
Год ввода в эксплуатацию	1989
Год демонтажа	
Состояние нейтрали	
Нагрузка обмотки НН	Нагрузка
Состояние РПН	
Район грозозащиты	1
Максимальная нагрузка, о.е	.67
Последствия отказа	Обесточение нагрузки
Число с.к.з.	
Год последнего КР	1.05.2004

Рис. 1. Фрагмент информационной таблицы паспортных и эксплуатационных данных силового трансформатора

4. Распознавание «слабых звеньев» объектов относится к числу наиболее важных задач системы ТО и Р. Приведенный алгоритм анализа проявления РП, характеризующих надежность и экономичность работы объектов ЭЭС, достаточно нагляден. Если условиться считать РП, обозначенную «1», недопустимой (например РП, соответствующая катастрофическому износу или большому риску повреждения), а РП, обозначенную «2», свидетельствующую о неудовлетворительном состоянии объек-

та, то анализ эмпирической таблицы позволяет систематизировать объекты по степени соответствия их предъявляемым требованиям и учесть эти данные при организации ТО и Р.

Заметим, что если сведения о надежности и экономичности работы конкретного объекта персоналу предприятия на качественном уровне, как правило, известны, то количественная оценка степени воздействия рассматриваемых признаков на совокупность одноименных объектов предприятий

Таблица 4

Номер п/п	$T_{сл}$	$\delta S_{ср}$	B_1	B_2	S_1	S_2	ΔS_1	ΔS_2	ΔS_1^2	ΔS_2^2	$\Delta S_1 \Delta S_2$
1	5	4	12	9	15,5	12,5	5,5	2,5	30,25	6,25	13,75
2	4	3	7	2	9,0	5,0	-1,0	-5,0	1,00	25,00	5,00
3	5	4	13	10	15,5	12,5	5,5	2,5	30,25	6,25	13,75
4	2	6	2	17	3,0	18,0	-7,0	8,0	49,00	64,00	-56,00
5	4	4	8	11	9,0	12,5	-1,0	2,5	1,00	6,25	-25,00
6	2	3	3	3	3,0	5,0	-7,0	-5,0	49,00	25,00	35,00
7	2	3	4	4	3,0	5,0	-7,0	-5,0	49,00	25,00	35,00
8	5	5	14	18	15,5	18,0	5,5	8,0	30,25	64,00	44,00
9	5	3	15	5	15,5	5,0	5,5	-5,0	30,25	25,00	-27,50
10	5	2	16	1	15,5	1,0	5,5	-1,0	30,25	1,00	-5,50
11	4	4	9	12	9,0	12,5	-1,0	2,5	1,00	6,25	-2,50
12	3	3	5	6	15,5	5,0	-4,5	-5,0	20,25	25,00	22,50
13	4	4	10	13	9,0	12,5	-1,0	2,5	1,00	6,25	-2,50
14	3	3	6	7	5,5	5,0	-4,5	-5,0	20,25	25,00	22,50
15	5	4	17	14	15,5	12,5	5,5	2,5	30,25	6,25	13,75
16	5	4	18	15	15,5	12,5	5,5	2,5	30,25	6,25	13,75
17	5	4	19	16	15,5	12,5	5,5	2,5	30,25	6,25	13,75
18	1	5	1	19	1,0	18,0	-9,0	8,0	81,00	64,00	-72,00
19	4	3	11	8	9,0	5,0	-1,0	-5,0	1,00	25,00	5,00
Итого					190	190	—	—	515,5	418	36

Примечание: $\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = 10$; $\rho_3 = 0,078$.

Таблица 5

Номер п/п	Тип трансформатора	Порядковый номер РП				
		1	2	3	4	5
1	АТДЦТН-250000/220	—	—	—	4	2
2	ТДТН-63000/110	—	1	4	1	—
3	IEC-60076	—	—	3	1	1
4	ТДН-16000/110	1	5	—	—	—
5	ТДН-25000/110	—	—	—	3	3
6	ТДТН-25000/110	1	4	1	—	—
7	ТДТН-40000/110	4	1	1	—	—
8	ТДТН-25000/110	—	—	—	—	6
9	ТМН-10000/110	—	—	3	1	2
10	АТДЦТН-250000/330	—	1	—	2	3
11	ТДН-80000/330	—	—	—	6	—
12	ТДТН-10000/110	1	1	4	—	—
13	ТДН-25000/110	—	1	1	4	—
14	АТДЦТН-200000/220	1	2	2	—	1
15	IEC-60076	—	—	2	3	1
16	АОДЦТН-167000/500	—	—	—	2	4
17	АОДЦТН-167000/500	—	—	—	2	4
18	ТДТН-40000/110	2	1	1	1	1
19	АТДЦТН-250000/220	1	—	1	2	3

энергосистемы требует громоздкого ручного счета. Громоздкость, прежде всего, проявляется в размерах эмпирической таблицы, когда число объектов и признаков исчисляется десятками. Упрощение эмпирической таблицы может быть достигнуто двояко. Первый способ состоит в переходе от признаков объекта к порядковым номерам РП. Этот переход осуществляется вычислением частоты возникновения РП с одинаковым порядковым номером. Например, по данным табл. 3 у первого трансформатора (автотрансформатора) из шести РП четыре имели порядковый номер «4», а два – порядковый номер «5». Результаты таких вычислений приведены в табл. 5.

Как следует из табл. 5, в анализируемой выборке силовых трансформаторов о необходимости восстановления износа (наличие недопустимой РП) свидетельствуют 10 (8,8%) РП. Из них одна РП обусловлена большим сроком службы, вторая – перегрузкой трансформатора, третья РП – большой наработкой после капитального ремонта. Из 19 трансформаторов шесть имеют хотя бы одну РП, показатель (параметр) которой относится к первому интервалу шкалы измерения. Повышенный риск возникновения отказа (наличие неудовлетворительной РП) наблюдается еще у четырех трансформаторов и проявляется как в числе отключений

по аварийной заявке, так и в числе автоматических отключений. Из общего числа РП, равного $n_{\Sigma} m_{\Sigma} = 19 \cdot 6 = 114,18(15,8\%)$ были отнесены ко второму интервалу. Таким образом, число трансформаторов, не удовлетворяющих предъявляемым требованиям, равно 10 (53%).

Второй способ снижения громоздкости исходных данных предусматривает составление матрицы (табл. 6), строки которой характеризуют признаки, а столбцы подобны столбцам табл. 4.

Таблица 6

Номер i	Признак (условное обозначение)	Ранг РП					Σ
		1	2	3	4	5	
1	$T_{сл}$	1	3	2	5	8	73
2	$\delta S_{ср}$	1	1	7	9	1	65
3	$\Delta T_{кр}$	1	3	6	7	2	63
4	$n_{ав}$	2	3	4	4	6	66
5	$n_{к.з}$	4	3	2	4	6	63
6	TC	1	4	3	5	6	68

Как следует из табл. 6, для рассматриваемой выборки трансформаторов несоответствие предъявляемым требованиям обуславливается преимущественно числом сквозных КЗ, что требует повышения безотказности их присоединений.

5. Метод и алгоритм сравнения и ранжирования одноименных объектов. На практике сравнение и ранжирование объектов осуществляется, как правило, интуитивно на основе опыта эксплуатации. Рекомендуемый метод основан на расчете интегрального показателя (IP^*), представляющего собой сумму баллов, служащих количественной оценкой РП. Особенности преобразования сведений об объекте рассмотрены в предыдущем разделе. В результате такого преобразования составляется эмпирическая таблица, подобная табл. 3.

Расчет интегрального показателя проводится в следующей последовательности.

1. Исходная эмпирическая таблица (табл. 3) преобразуется в более компактную таблицу частоты возникновения РП (табл. 5).

2. Вычисляются относительные значения интегрального показателя по формуле

$$\delta IP_i^* = \left[\sum_{j=1}^5 jr_{ij} \right] / 5m_{\Sigma}, \quad (3)$$

где r_{ij} — число j -й РП i -го объекта; $i=1, n_{\Sigma}$; n_{Σ} — число объектов; m_{Σ} — число признаков.

3. От исходной последовательности ряда $\{\delta IP_i^*\}_{n_{\Sigma}}$ переходим к вариационному ряду, в котором реализации $\delta \delta IP_i^*$ размещены в порядке возрастания и соответствуют первому типу направленности изменения S_1 . Это по сути и есть ранжировка (упорядочение) интегральных показателей. За-

метим, что теоретически δIP_i^* изменяется в пределах $[0, 2 \div 1, 0]$, что соответствует отношениям $\left[\frac{m_{\Sigma}}{5m_{\Sigma}}; \frac{5m_{\Sigma}}{5m_{\Sigma}} \right]$.

4. Представим шкалу изменения $\delta \delta IP_i^*$ пятью равными интервалами, каждому из которых сопоставим некоторую качественную оценку предъявляемым к объектам требованиям по надежности и экономичности работы. Значение интервала изменения $\delta \delta IP_i^*$ рассчитывается по формуле

$$\Delta(\delta IP^*) = [\delta IP_{\max}^* - \delta IP_{\min}^*] / 5 = 0,16. \quad (4)$$

Принята следующая классификация соответствия объекта предъявляемым требованиям (W):

если $0,2 \leq \delta IP_i^* < 0,36$, то $W \Rightarrow 1$ (недопустимая);
 если $0,37 \leq \delta IP_i^* < 0,52$, то $W \Rightarrow 2$ (неудовлетворительная);
 если $0,53 \leq \delta IP_i^* < 0,68$, то $W \Rightarrow 3$ (удовлетворительная);
 если $0,69 \leq \delta IP_i^* < 0,84$, то $W \Rightarrow 4$ (хорошая);
 если $0,84 \leq \delta IP_i^* \leq 1,00$, то $W \Rightarrow 5$ (номинальная).

6. В дополнение к оценке W формируются рекомендации по повышению надежности и экономичности объектов. В качестве примера в табл. 7 приведены результаты расчета (по данным табл. 5) реализаций δIP_i^* силовых трансформаторов, их ранжирование и классификация.

Таблица 7

Номер п/п	Ряд δIP_i^*			Степень соответствия предъявляемым требованиям	Группы	Типовые рекомендации по группам
	Исходная	N_p	Ранжированная			
		7	0,30	Недопустимая	1	Аварийная группа Организация замены
1.	0,87	4	0,37	Неудовлетворительная	2	Дефектная группа 1. Переход к системе непрерывного контроля технического состояния 2. Планирование внеочередного восстановления износа
2.	0,53	6	0,37			
3.	0,60	12	0,50			
4.	0,37					
5.	0,93			Удовлетворительная	3	Подконтрольная группа 1. Планирование текущего ремонта и внеочередного испытания 2. Ликвидация слабых звеньев
6.	0,37	2	0,53			
7.	0,30	4	0,53			
8.	1,00	18	0,53			
9.	0,77	3	0,60			
10.	0,77			Хорошая	4	Работоспособная группа Повысить эффективность ежедневного осмотра технического состояния
11.	0,80	13	0,7			
12.	0,50	9	0,77			
13.	0,70	10	0,77			
14.	0,53	15	0,77			
15.	0,77	11	0,80	Номинальная	5	Новая группа Повысить эффективность ежедневного осмотра смежного оборудования и устройств
16.	0,93	1	0,87			
17.	0,93	19	0,87			
18.	0,53	5	0,93			
19.	0,87	16	0,93			
		17	0,93			
		8	1,00			

Как следует из табл. 7, из 19 трансформаторов не удовлетворяют предъявляемым требованиям четыре, один из которых должен быть заменен.

Автоматизированный контроль степени соответствия надежности экономичности силовых трансформаторов предприятий энергосистемы обеспечивает существенную информационную и методическую поддержку персоналу при организации ТО и Р.

6. Метод оценки характера расхождения интегральных показателей. Условимся сведения о n_{Σ} объектах по $(m_K + m_{II})$ РП, представленных в эмпирической таблице, именовать совокупностью данных, а часть сведений, получаемых в результате классификации этой совокупности данных по заданной разновидности одного из m_{II} признаков, – выборкой. Выборка может быть представительной и не представительной. Выборка именуется представительной, если с.ф.р. F_v^* (П) будет отличаться от с.ф.р. совокупности данных F_{Σ}^* (П) с приемлемо малым риском ошибочного решения.

Чтобы оценить с.ф.р., строим гистограмму распределения баллов. Общее число реализаций баллов будет равно $N_{\Sigma} = n_{\Sigma}(m_K + m_{II})$. Если обозначить число проявлений K -го балла через $N_{\Sigma K}$, то, разделив $N_{\Sigma K}$ на N_{Σ} , получим оценку «частоты» проявления K -го бала $f_{\Sigma}^*(k)$, а вероятность $P^*(k \leq K) = F_{\Sigma}^*(K)$ определится по формуле

$$F_{\Sigma}^*(K) = \sum_{k=1}^5 f_{\Sigma}^*(k), \quad (6)$$

где $f_{\Sigma}^*(k) = N_{\Sigma K} / N_{\Sigma}$.

Аналогично строится с.ф.р. $F_v^*(k)$ с $k=1,5$ с той разницей, что вместо N_{Σ} и $N_{\Sigma K}$ используется число объектов выборки (v) N_v и число реализаций баллов для выборки объектов N_{vk} с $k=1,5$.

Далее вычисляются экспериментальные (э) реализации абсолютных значений расхождения с.ф.р. $F_{\Sigma}^*(k)$ и $F_v^*(k)$ с $k=1,5$. При этом располагаем пятью реализациями расхождений $\Delta F_v^*(k)$, измеряемых по количественной шкале и по которым могут быть вычислены следующие статистические параметры:

максимальное абсолютное значение расхождений

$$B_{\Delta}^*(\Delta) = \max\{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{\Sigma}\};$$

среднее арифметическое значение расхождений

$$M_{\Delta}^*(\Delta) = 0,2 \sum_{k=1}^5 \Delta_k;$$

размах расхождений

$$L_{\Delta}^*(\Delta) = [\Delta_{\max} - \Delta_{\min}]$$

Однако, поскольку $\Delta_{\min} = 0$, то $L^*(\Delta) = B^*(\Delta)$. Далее в соответствии с [7] определяем критическое значение параметров $B_{\alpha}^*[\Delta]$ и $M_{\alpha}^*[\Delta]$. Критерий контроля представительности выборки будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} B_{\alpha}^*[\Delta] < B_{\alpha}^*[\Delta]; \\ M_{\alpha}^*[\Delta] < M_{\alpha}^*[\Delta]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

На рис. 2 приведены реализации с.ф.р. $F_{\Sigma}^*(k)$ и $F_v^*(k)$ и их вертикальные расхождения Δ_k с $k=1,5$.

Таким образом, условием представительности выборки и нецелесообразности классификации информации является не превышение экспериментальными значениями статистических параметров расхождения $F_{\Sigma}^*(k)$ и $F_v^*(k)$ критических значений с уровнем значимости α .

Изложенное ранее позволяет:

оценить значимость любой РП или произвольного сочетания РП;

оценить характер расхождения показателей надежности любых двух объектов из анализируемого перечня;

провести объективное ранжирование объектов по заданным РП с учетом их значений.

Новизной рассматриваемого метода является ввод в рассмотрение интегральной характеристики в виде с.ф.р. и оценки расхождения интегральных характеристик совокупности и выборки данных.

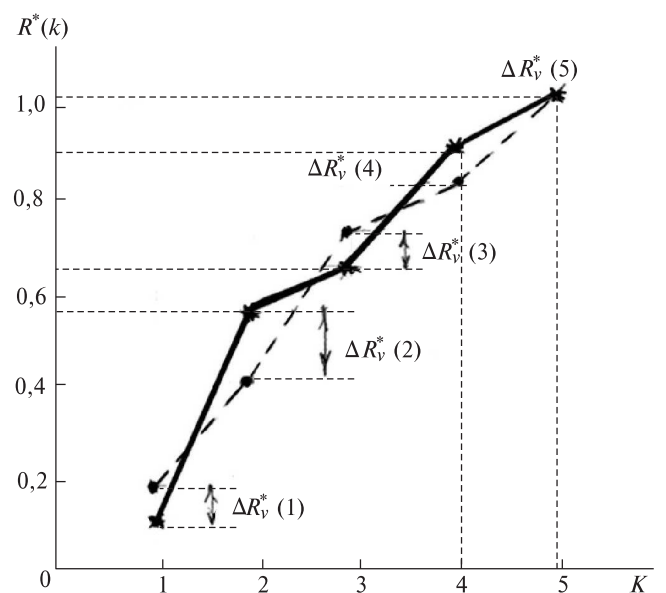


Рис. 2. Иллюстрация расхождений $\Delta R_v^*(k)$ с.ф.р. $F_{\Sigma}^*(k)$ и $F_v^*(k)$

Если сопоставить экспериментальные и критические значения статистических параметров случайных величин расхождения с.ф.р. $F_{\Sigma}^*(k)$ и $F_{\nu}^*(k)$, то можно заключить, что выборка силовых трансформаторов с $U_{\text{НОМ}} = 110$ кВ неслучайно отличается от совокупности данных. Иначе говоря, эти трансформаторы имеют иную надежность и экономичность работы.

7. Синтез показателей надежности и экономичности объектов. Многочисленные показатели, характеризующие те или иные свойства надежности и экономичности объектов, их различная и неизвестная значимость и степень воздействия обуславливают целесообразность их совместного учета. Иначе говоря, если в результате расчета одно из свойств надежности для объекта незначимо, это не означает, что все остальные свойства также окажутся незначимыми. Еще более наглядным примером является различие показателей технического состояния узлов объектов и необходимость их совместного учета при характеристике надежности объекта в целом.

Обобщенные ПН объектов, которые повсеместно ранее использовались в расчетах надежности схем распределительных устройств ЭЭС, слишком далеки от показателей индивидуальной надежности и не предназначены для оперативной характеристики технического состояния объекта. Именно для оперативной характеристики технического состояния объектов необходим интегральный показатель надежности и экономичности работы. В этих условиях безусловно окажутся полезными и интегральные характеристики $F_{\nu}^*(k)$.

Для характеристики надежности и экономичности объектов ЭЭС воспользуемся функцией желательности Харрингтона [6]. Согласно сугубо практическим рекомендациям интегральный показатель одного объекта вычисляется по формуле

$$d_{i,k}^* = \{\exp[-f_{\nu}^*(k)]\}, \quad (8)$$

где $k=1,5; i=1, n_{\Sigma}$.

Далее вычисляется обобщенный показатель как среднее геометрическое реализаций $d_{i,j}$ с учетом коэффициента значимости баллов $K=1 \div 5$ по формуле

$$D_i^* = \sqrt[\sum_{k=1}^5 \beta_k]{\prod_{k=1}^5 d_{i,k}^{\beta_k}}, \quad (9)$$

где $\beta_k = \frac{k}{2^k - 1}$.

Интегральный показатель соответствия надежности и экономичности предъявляемым требованиям рассчитывается по формуле

$$D_{\Sigma}^* = n_{\Sigma} \sqrt[\prod_{i=1}^{n_{\Sigma}} D_i^*]{n_{\Sigma}}. \quad (10)$$

В табл. 6 приведены с.ф.р. $F_{\nu}^*(k)$ для каждого из $n_{\Sigma} = 20$ трансформаторов, рассчитанные значения $d_{i,j}$ с $k=1,5; i=1, n_{\Sigma}$, результаты оценки обобщенного показателя D_i с $i=1, n_{\Sigma}$.

Выводы. 1. Сравнение и ранжирование одноименных объектов электроэнергетических систем требует разработки методов и алгоритмов расчета показателей, интегрирующих сведения о признаках, характеризующих соответствие надежности и экономичности объектов предъявляемым требованиям.

2. Наличие статистических данных недостаточно для вычисления интегрального показателя. И прежде всего потому, что эти данные различаются своей шкалой, единицами и масштабом измерения. Кроме того, необходима их одинаковая направленность и независимость изменений.

3. Разработанные методы и алгоритмы позволяют преодолеть эти трудности, а автоматизированная система преобразования исходных данных позволяет устранить громоздкость, трудоемкость и большой риск ошибочного решения при ручном счете.

4. Методическая и информационная поддержка персонала реализуется при представлении следующих данных:

сведений о наиболее значимых признаках, снижающих надежность и экономичность работы объектов, именуемых как «слабые звенья» и снижающих эффективность системы технического обслуживания и ремонта;

результатов сравнения и ранжирования объектов с последующей их классификацией по пяти-бальной системе и рекомендаций по повышению надежности и экономичности объектов в каждой группе;

сведений о взаимосвязи признаков; взаимосвязь признаков характеризуется матрицей коэффициентов ранговой корреляции Спирмана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воропай Н.И.** Надежность систем электроснабжения. Учебное пос. 2-е изд. перераб. и доп. — Новосибирск: Наука, 2003, 208 с.
2. **Орлов А.И.** Прикладная статистика. — М.: Изд-во «Экзамен», 2004.
3. **Фархадзаде Э.М., Фарзалиев Ю.З., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А.** Совершенствование методов повышения надеж-

ности объектов электроэнергетических систем. — Электричество, 2016, № 8, 18—28 с.

4. Фархадзаде Э.М. О расхождении граничных значений доверительных и фидуциальных интервалов параметров надёжности систем. — Изв. АН СССР. Техническая Кибернетика, 1979, с. 196—199.

5. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Рафиева Т.К., Исмаилова С.М. Технология компьютерной оценки показателей долговечности трансформаторов энергосистемы в АИСТР. — Электронное моделирование (Киев), 2010, № 4, с. 73—82.

6. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. — М.: Физмат, 2006, 628 с.

[30.01.2017]

А в т о р ы: Фархадзаде Эльмар Мехтиевич в 1961 г. окончил энергетический факультет Азербайджанского института нефти и химии (АЗИНЕФТЕХИМ, Баку). В 1982 г. защитил докторскую диссертацию «Точность и достоверность характеристик надежности электроустановок» в Новосибирском электротехническом институте. Главный научный

сотрудник Азербайджанского научно-исследовательского и проектно-изыскательского института энергетики (АЗНИПИИЭ).

Мурадалиев Айдын Зураб оглу в 1982 г. окончил энергетический факультет АЗИНЕФТЕХИМ. В 2013 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка методов и алгоритмов расчета показателей индивидуальной надежности оборудования и устройств ЭЭС». Руководитель отдела АЗНИПИИЭ.

Фархадзаде Юсиф Зейни оглу окончил Азербайджанский государственный университет в 1985 г. В 2008 г. защитил кандидатскую диссертацию «Повышение точности и достоверности расчета показателей надежности энергоблоков ТЭС». Старший научный сотрудник АЗНИПИИЭ.

Исмаилова Симузар Мовлан кызы окончила энергетический факультет АЗИНЕФТЕХИМ в 1985 г. Старший научный сотрудник АЗНИПИИЭ.

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 8, pp. 4–13

DOI:10.24160/0013-5380-2017-8-4-13

Methods and Algorithms for Comparing and Ranking the Operational Reliability and Economic Efficiency of Electric Power System Facilities Using Dissimilar Data

FARHADZADE Elmar M. (Azerbaijani Scientific Research Designing Institute of Power Engineering (ASRDIPE), Baku, Azerbaijan) — Senior scientific researcher Dr.Sci. (Eng.)

MURADALIYEV Audin Z. (ASRDIPE, Baku, Azerbaijan) — Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

FARZALIYEV Yusif Z. (ASRDIPE, Baku, Azerbaijan) — Senior scientific researcher, Cand. Sci. (Eng.)

ISMAILOVA Simuzar N. (ASRDIPE, Baku, Azerbaijan) — Senior scientific researcher

The risk of making an erroneous decision is decreased through obtaining more trustworthy comparison and ranking of facilities in terms of their operational reliability and economic efficiency. In so doing, the quantitative assessments of integral indicators are based on the totality of dissimilar data. Joint processing of these data entails the need to overcome a number of difficulties stemming from the fact that these data contain different units, scales, and measurement ranges. Methods and algorithms based on the rank approach have been developed. By using of these methods it is possible to reveal «weak links» among the signs characterizing the operational reliability and efficiency, to compare and rank similar facilities, and to estimate the interrelation of signs by calculating the rank correlation coefficients. The automated instrumentation and control system fitted with the developed algorithms and computation programs becomes able of providing timely information and methodological support to the personnel.

Key words: electric power system, reliability, economic efficiency, equipment, integral indicator, computation programs

REFERENCES

1. Voropai N.I. *Nadezhnost' sistem elektrosnabzheniya: Uchebnoye pos.* (Reliability of power supply systems). Novosibirsk, Publ. «Nauka», 2003, 208 p.

2. Orlov A.I. *Prikladnaya statistika* (Applied statistics). Moscow, Publ. «Ekzamen», 2004.

3. Farkhadzade E.M., Farzaliyev Yu.Z., Muradaliyev A.Z., Abdullayeva S.A. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 8, pp. 18—28.

4. Farkhadzade E.M. *Izv. AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika — in Russ. (News of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics)*, 1979, pp. 196—199.

5. Farkhadzade E.M., Muradaliyev A.Z., Rafiyeva T.K., Ismailova S.M. *Elektronnoye modelirovaniye (Kiev) — in Russ. (Electronic modeling)*, 2010, No. 4, pp. 73—82.

6. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika* (Applied mathematical statistics). Moscow, Publ. «Fizmat», 2006, 628 p.

[30.01.2017]