

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTIC AND MANAGEMENT OF POWER PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 519.233.6:621.314.212

А.В. Волошко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-3337-****
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Я.С. Бедерак, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-2669-0965
Публичное акционерное общество «АЗОТ», г. Черкасы

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 КВ И ВЫШЕ

Целью исследования является определение технического состояния силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше.

Трансформатор представляет собой важный элемент в цепи передачи электроэнергии от электростанции к потребителю и является сложным техническим объектом, который оценивается большим количеством параметров, значения которых могут изменяться в широком интервале. Поэтому для оценки состояния трансформатора свертка нормализованных параметров состояния при помощи аддитивного или мультипликативного обобщенных критериев неэффективна. Доказана целесообразность использования для оценки состояния и ранжирования нескольких силовых трансформаторов функции желательности Харрингтона. Функция Харрингтона применима при наличии односторонних ограничений на параметры состояния трансформаторов.

Для выявления неудовлетворительного состояния силовых трансформаторов предложено в число оцениваемых включать трансформатор с минимально допустимыми параметрами. Ранжирование группы трансформаторов относительно трансформатора в неудовлетворительном состоянии позволяет определить необходимость проведения ремонта каждого трансформатора. Такой прием возможно обобщить на другие технические объекты.

Ключевые слова: силовой трансформатор, параметры состояния, частная и обобщенная функции желательности Харрингтона.

Вступление. Силовой маслонаполненный трансформатор (СТ) напряжением 110 кВ и выше является одним из самых важных электрических аппаратов в цепи передачи электроэнергии от электростанций к потребителям. Состояние СТ характеризуется основными параметрами, имеющими равные веса:

1. пробивное напряжение трансформаторного масла (ТМ) (характеризует увлажненность масла в баке);
2. тангенс угла диэлектрических потерь ТМ (указывает на наличие примесей в ТМ в баке);
3. сопротивление изоляции каждой из обмоток (оценивает состояние изоляции обмоток);
4. тангенс угла диэлектрических потерь каждой из обмоток (характеризует стойкость изоляции по отношению к тепловому пробую, а также увлажнение изоляции и общее ее старение);
5. влагосодержание ТМ (указывает на старение масла).

Особенность параметров 1 и 3 – чем больше значение параметра, тем лучше состояние СТ, а параметров 2, 4 и 5 – чем больше значение параметра, тем хуже состояние СТ.

После получения набора параметров по каждому СТ необходимо ранжировать их по имеющимся параметрам, определить СТ с наилучшими и наихудшими характеристиками.

Это только самые главные параметры оценки технического состояния СТ, а общее количество их у СТ мощностью более 63 000 кВА и напряжением 110 кВ может достигать 30.

Одним из подходов к поиску решения многокритериальной оптимизации (МКО) есть сведение ее к однокритериальной (скалярной) оптимизации с целевой функцией $f(X)$. Иначе говоря, частичные критерии $F_i(X)$ тем или иным способом сочетаются в обобщенный критерий $(X) = \Phi[F_1(X), F_2(X), \dots, F_m(X)]$, который затем оптимизируется. Под построением обобщенного критерия в МКО понимается процедура, которая

"синтезирует" набор оценок по заданным частным условиям в единую численную оценку, что выражает итоговую полезность этого набора оценок для лица, принимающего решение [1].

Как правило, частные критерии имеют разную размерность. Поэтому при исчислении обобщенного критерия нужно работать не с натуральными критериями, а с их нормированными значениями. Нормированный критерий представляет собой отношение "натурального" частного критерия к некоторой величине, которая нормируется. Для нахождения значения нормализованного параметра технического состояния могут быть использованы следующие методы: по максимуму выбранного параметра из всех имеющихся, по минимуму выбранного параметра. Операция приведения масштабов локальных параметров к единому, безразмерному, называется нормализацией параметров [1].

При этом выбор делителя, который нормируется, должен быть обоснован. Потому что каждый критерий имеет разный физический смысл, то есть измеряется в различных единицах, масштабы критерия не сравниваются и невозможно сравнить качество полученных результатов по каждому критерию.

Когда все критерии (параметры) имеют равную вес, то обобщенный аддитивный критерий A получается путем сложения частных критериев. Мультипликативный критерий $П$ образуется путем простого перемножения частных критериев в том случае, когда они имеют одинаковый вес.

Иногда возникают ситуации, когда один техникий объект лучше по аддитивному критерию, другой – по мультипликативному. Тогда целесообразно для выбора объекта, который обладает лучшими параметрами технического состояния, ввести еще один решающий обобщенный критерий. Предложено в работе [2] применять для этой цели геометрический (морфологический) критерий, который имеет свойства как аддитивного, так и мультипликативного критерия.

Для оценки состояния СТ применение обобщенных мультипликативного, аддитивного или геометрического критериев не эффективно, потому что у нескольких параметров состояния СТ интервал, в котором могут находиться значения, может быть очень большим (например, сопротивление изоляции обмоток СТ может принимать значения от 20 до 100 000 МОм). Поэтому необходимо использовать другой метод нормализации и последующей свертки критериев (параметров) состояния СТ. В эксплуатации целесообразно оценивать и сравнивать состояние каждого СТ или с заводскими значениями, или с однотипным оборудованием. Большое расхождение параметров различных трансформаторов не дает возможности точно оценить их техническое состояние и принять меры по их улучшению.

На предприятиях и в электрических сетях (в «Облэнерго»), как правило, в эксплуатации находятся от 10 до 50 силовых трансформаторов (СТ) напряжением 110 кВ и выше.

Чтобы по 5-30 равновесным параметрам определить состояние трансформатора, необходимо иметь определенный опыт, знание конструкции. Когда единиц парка СТ обслуживается на предприятии немного (менее 10), то определить техническое состояние каждого СТ возможно, а когда их несколько десятков – это занимает много времени.

Анализ существующих методов оценки состояния технических объектов показал, что для комплексной оценки состояния СТ целесообразно применять функцию желательности Харрингтона [3]. Ось координат u' называется шкалой частных показателей. Ось d – шкалой желательности. В работе [4] изложено описание функции Харрингтона, в публикации [5] – описаны свойства функции. Функция Харрингтона успешно применяется для ранжирования автоматизированных систем управления [6] и различных объектов [7].

Цель и задачи. Целью данной работы является апробация использования функции желательности Харрингтона для оценки технического состояния нескольких СТ с последующим их ранжированием. Для достижения этой цели необходимо, используя данные измерений реальных СТ напряжением 110 кВ, разработать последовательность преобразования параметров СТ, вычисления значений желательности для каждого параметра и затем обобщенной функции желательности Харрингтона.

Материал и результаты исследований. Для сравнения состояния СТ используются реальные данные измерений их параметров (табл. 1).

Таблица 1 – Измеренные значения параметров технического состояния СТ

№п/п и тип СТ	Параметры технического состояния СТ				
	y_1 , кВ	y_2 , %	y_3 , МОм	y_4 , %	y_5 , г/т
СТ№1. ТРДЦН-80000/110	49,1	0,07	3770	0,32	19,9
СТ№2. ТРДЦН-80000/110	48,3	0,08	2555	0,62	19,3
СТ№3. ТРДЦН-63000/110	45,9	0,07	14580	0,35	16,4
СТ№4. ТРДЦН-63000/110	37,0	0,48	3503	0,45	21,9

Обозначения в табл. 1: Пробивное напряжение ТМ $U_{пр}$ – параметр y_1 ; тангенс угла диэлектрических потерь ТМ δ_m – параметр y_2 ; сопротивление изоляции обмотки высшего напряжения $R_{из}$ – параметр y_3 ; тангенс угла диэлектрических потерь обмотки высшего напряжения $\delta_{обм}$ – параметр y_4 ; влагосодержание ТМ C – параметр y_5 . На некоторые вышеприведенные параметры накладываются односторонние ограничения, например, на величину пробивного напряжения ТМ и тангенс угла диэлектрических потерь ТМ.

Для полного выяснения состояния СТ рекомендуется учитывать также концентрации газов, растворенных в ТМ, потери холостого хода и короткого замыкания. Но для определения лучшего СТ в расчетах в данной работе для упрощения расчетов будут учитываться только 5 указанных выше параметров.

Для построения обобщенной функции желательности D предлагается преобразовать измеренные значения критериев (параметров) y в безразмерную шкалу желательности d . Формула $d = \exp[\exp(y_i')]$ определяет функцию с двумя участками насыщения (в $d \rightarrow 0$ и $d \rightarrow 1$) и линейным участком (от $d=0,2$ до $d=0,63$). Шкала желательности, которую преобразуются значения частных критериев, является безразмерной психофизической шкалой. Она устанавливает соответствие между значениями критериев в физических шкалах субъективными оценками желательности того или иного значения соответствующего критерия.

Для построения шкалы желательности удобно использовать метод количественных оценок с интервалом значений желательности d от нуля до единицы. Промежуточные значения желательности и соответствующие им числовые отметки приведены в табл. 2 [4].

Таблица 2 – Базовые отметки шкалы желательности

Количественная отметка на шкале желательности d	Желательность значения критерия (параметра) y
0,80 – 1,00	Очень хорошо
0,63 – 0,80	Хорошо
0,37 – 0,63	Удовлетворительно
0,20 – 0,37	Плохо
0,00 – 0,20	Очень плохо

Такой выбор числовых отметок объясняется удобством вычислений, поскольку $d = 0,6 \approx 1 - 1/e$, а $d = 0,37 \approx 1/e$.

Для односторонних ограничений вида $y \leq y_{\max}$ или $y \geq y_{\min}$ формой преобразования y в d служит экспоненциальная зависимость:

$$d = \exp[-\exp(-y_i')], \quad (1)$$

где d – частная функция желательности, а безразмерная величина y_i' вычисляется по формуле $y_i' = b_0 + b_1 y_i$ (связана с параметром оптимизации y_i линейным законом). Формула преобразования y в d для двухсторонних ограничений приведена в [4].

Коэффициенты b_0 и b_1 можно определить, если задать для двух значений y_i' соответствующие значения желательности, предпочтительно в интервале $0,3 < d < 1,0$. Для определения коэффициентов b_0 и b_1 используется следующий прием [4]: худшему значению параметра оптимизации y_i присваивается значение желательности, равное 0,37, а лучшему – значение желательности, равное 0,98 (табл. 1).

Для параметра оптимизации y_1 согласно уравнения (1):

$$\begin{aligned} 0,37 &= \exp[-\exp(-y_1')] \text{ отсюда } y_1' = -\ln(-\ln 0,37) = 0,006; \\ 0,98 &= \exp[-\exp(-y_1')] \text{ отсюда } y_1' = 3,902. \end{aligned}$$

Для параметра оптимизации y_1 составлена система уравнений для определения коэффициентов b_0 и b_1 :

$$\begin{cases} b_0 + b_1 \cdot 37,0 = 0,006 \\ b_0 + b_1 \cdot 49,10 = 3,902, \end{cases}$$

где 37,0 – худшее значение параметра оптимизации y_1 , зафиксированное для СТ №4; 49,10 – лучшее значение пробивного напряжения ТМ у СТ №1 (табл. 1). Решая систему, получаем: $b_0 = -11,973$ и $b_1 = 0,324$. Тогда $y_1' = b_0 + b_1 y_1 = -11,973 + 0,324 y_1$.

Аналогично составляются системы уравнений для параметров оптимизации y_i . Решая их, имеем:

$$y'_2 = b_0 + b_1 y_2 = 4,590 - 9,554 y_2.$$

$$y'_3 = b_0 + b_3 y_2 = -0,831 + 0,000326 y_3.$$

$$y'_4 = b_0 + b_1 y_4 = 8,100 - 13,056 y_4.$$

$$y'_5 = b_0 + b_1 y_5 = 15,599 - 0,712 y_5.$$

Зная безразмерные величины y'_i , по формуле (1) определяются частные функции желательности d_i для всех параметров состояния, приведенных в табл. 1. Затем вычисляется обобщенная функция желательности, предложенная Харрингтоном. Для критериев равного веса она представляет собой среднее геометрическое частных функций желательности

$$D = \sqrt[i]{d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_i}, \quad (2)$$

где $d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_i$ - желательный уровень (частная функция желательности) 1-го, 2-го и т.д. параметра оптимизации (изменяется от 0 до 1); i - число параметров оценки технического состояния.

Число этих показателей может быть неодинаковым для разных СТ. Это позволяет сравнивать обобщенные коэффициенты даже тогда, когда отсутствует часть параметров сравнения у некоторых СТ. Корень n -й степени «сглаживает» возникающие отклонения, а полученный результат позволяет оценивать состояние СТ [5].

Значения частных функций желательности d_i и обобщенная функция желательности Харрингтона D для каждого СТ сведены в табл. 3.

Таблица 3. – Частные и обобщенная функции желательности для СТ

№п/п и тип СТ	Функции желательности для каждого параметра технического состояния и ранг СТ						
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	D	Ранг (в порядке убывания D)
СТ№1. ТРДЦН- 80000/110	0,98	0,98	0,51	0,98	0,79	0,82	2
СТ№2. ТРДЦН- 80000/110	0,97	0,98	0,37	0,37	0,86	0,65	3
СТ№3. ТРДЦН- 63000/110	0,95	0,98	0,98	0,97	0,98	0,97	1
СТ№4. ТРДЦН- 63000/110	0,37	0,37	0,48	0,89	0,37	0,46	4

Использование функции Харрингтона позволяет ранжировать технические объекты с большим количеством параметров равного веса. Ранжировать можно в порядке убывания или возрастания обобщенной функции желательности Харрингтона D , рассчитанной по формуле (2).

У СТ, как известно, имеются односторонние ограничения на значения параметров состояния. Максимальные или минимально допустимые значения параметров состояния указаны в нормативных документах [8] та [9].

Целью оценки технического состояния является определение такого трансформатора, которому необходим капремонт или взвод с эксплуатации. Поэтому для решения такой задачи целесообразно выбрать один СТ с неудовлетворительными параметрами и относительно него сравнивать состояние определенного СТ. Таким образом, ранжирование СТ может быть намного эффективнее, если включить в группу нескольких СТ трансформатор с параметрами, которые свидетельствуют о неудовлетворительном его состоянии.

В работе приведен СТ с такими значениями параметров, согласно которым такой трансформатор подлежит в кратчайшие сроки капремонту с одновременной сушкой масла. Выбраны такие значения: пробивное напряжение ТМ $U_{пр}=35$ кВ (параметр y_1); тангенс угла диэлектрических потерь ТМ, приведенный к указанной в паспорте СТ температуре $\delta_m=2\%$ (параметр y_2); сопротивление изоляции обмотки высшего напряжения $R_{из}=50$ МОм, приведенное к указанной в паспорте СТ температуре (параметр y_3); тангенс угла диэлектрических потерь обмотки высшего напряжения, приведенный к указанной в паспорте СТ температуре $\delta_{обм}=2,5\%$ (параметр y_4); влагосодержание ТМ $C=30$ г/т (параметр y_5).

Значения пробивного напряжения и влагосодержания взяты с таблицы 6 Приложения 2 «Основные нормативно-технические показатели, які використовуються при проведенні випробувань та вимірювань параметрів обладнання та апаратів електроустановок споживачів» нормативного документа [8]. Другие параметры неудовлетворительного состояния в совокупности соответствуют такому СТ, который характеризуется увлажнением обмоток и масла. Как правило, в кратчайший срок ему нужно провести капитальный ремонт с сушкой масла.

Нормативно-технические показатели документа [8] соответствуют показателям оценки состояния оборудования документа [9].

После выбора значений параметров, свидетельствующих о неудовлетворительном состоянии СТ, производятся аналогичные приведенным выше расчеты.

Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Таблица 4 – Измеренные и допустимые значения параметров технического состояния, функции желательности и ранги группы СТ

№п/п и тип СТ	Параметры технического состояния СТ										D	Ранг (в порядке убывания D)
	y_1 , кВ	d_1	y_2 , %	d_2	y_3 , МОм	d_3	y_4 , %	d_4	y_5 , г/т	d_5		
СТ№1. ТРДЦН-80000/110	49,1	0,98	0,07	0,98	3770	0,69	0,32	0,98	19,9	0,96	0,91	2
СТ№2. ТРДЦН-80000/110	48,3	0,97	0,08	0,98	2555	0,6	0,62	0,97	19,3	0,96	0,88	3
СТ№3. ТРДЦН-63000/110	45,9	0,95	0,07	0,98	14580	0,98	0,35	0,98	16,4	0,98	0,97	1
СТ№4. ТРДЦН-63000/110	37,0	0,56	0,48	0,95	3503	0,68	0,45	0,97	21,9	0,94	0,80	4
СТ с неудовлетворительными параметрами	35,0	0,37	2,0	0,37	50,0	0,37	2,5	0,37	35	0,37	0,37	5

Анализ результатов расчета (табл. 4) свидетельствует о том, что включение СТ с неудовлетворительными параметрами позволяет выяснить, как далеко находится конкретный трансформатор от неудовлетворительного состояния, определить необходимость ремонта. Результаты расчета показывают, что СТ №4 имеет удовлетворительное техническое состояние ($D=0,8$) и не требует в ближайшее время ремонта.

В таблицах 3 и 4 ранги СТ определялись в порядке убывания обобщенной функции Харрингтона. Сама функция Харрингтона найдена расчетным путем. Результаты значений рангов в обеих таблицах 3 и 4 одинаковые, что свидетельствует о правильности расчетов (ранги в обеих таблицах одинаковые: у СТ №3 ранг 1, у СТ№1 – 2, у СТ№2 – 3, у СТ№4 – 4).

Путем наработки данных о значениях обобщенной функции Харрингтона возможно будет сделать правильный вывод о техническом состоянии трансформаторов.

Таким образом, последовательность оценки технического состояния СТ при применения функции Харрингтона следующая:

1. Сбор данных о значениях параметров состояния каждого СТ из их группы.
2. Определение наличия одно- или двухсторонних ограничений на параметры.
3. Ранжирование каждого параметра состояния в группе СТ (от худшего до лучшего значения).
4. Присваивание худшему коэффициенту желательности значение 0,37, а лучшему – 0,98.
5. Определение безразмерной величины, связанной с параметром технического состояния y_i линейным законом; для худшего значения принимается $y_i^j = -\ln(-\ln 0,37)=0,006$ и для лучшего значения $y_i^j = -\ln(-\ln 0,98)=3,902$.
6. Расчет коэффициентов b_0 и b_1 в системе линейных уравнений:

$$\begin{cases} b_0 + b_1 \cdot y_i & \text{худшее} = 0,006 \\ b_0 + b_1 \cdot y_i & \text{лучшее} = 3,902. \end{cases}$$

7. Получение формулы для безразмерной величины $y'_i = b_0 + b_1 y_i$ при значениях параметра y_i между худшим и лучшим.

8. Расчет частных функций желательности $d = \exp[-\exp(-y'_i)]$ для i -го параметра.

9. Вычисление обобщенной функции желательности D по формуле (2).

10. Ранжирование СТ в порядке убывания (возрастания) обобщенной функции желательности.

11. Определение параметров трансформатора, которые свидетельствуют о его неудовлетворительном состоянии.

12. Повтор операций, указанных в п. 3÷10, причем худшее значение коэффициента желательности 0,37 присваивается трансформатору с плохими параметрами технического состояния.

13. Анализ состояния каждого из группы СТ предприятия по сравнению с трансформатором, у которого обобщенная функция желательности $D=0,37$.

Необходимо отметить, что предложенный подход применим для разнообразных технических объектов, которые оцениваются несколькими параметрами с одно- или двухсторонними ограничениями.

Выводы

1. Неэффективно использование обобщенных аддитивного и мультипликативного критериев качества для оценки технического состояния силовых трансформаторов.

2. Впервые применена функция желательности Харрингтона для контроля состояния трансформаторов по нескольким параметрам.

3. Предложено включать в группу имеющих в наличии силовых трансформаторов трансформатор с неудовлетворительными параметрами, что позволяет определить необходимость проведения ремонта оборудования.

4. Разработана последовательность оценки технического состояния силового трансформатора путем применения функции Харрингтона.

Список литературы

1. Горбунов В. М. Теория принятия решений: Учебное пособие / В. М. Горбунов. – ГОУВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – 2010. – 67 с.

2. Волошко А. В. Проблеми вибору оптимальної математичної моделі енергоспоживання на промислових підприємствах / А. В. Волошко, Я. С. Бедрак, Т. М. Лутчин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Вып. 5/8 (65). – С. 19 – 23. DOI: 10.15587/1729-4061.2013.18122.

3. Harrington E. C. Desirability function and its application / E. C. Harrington // Industrial Quality Control. – 1965.–V. 21 – № 10. – P. 49.

4. Использование функции желательности Харрингтона при решении оптимизационных задач химической технологии. Учебно-методическое пособие / Сост.: С. Л. Ахназарова, Л. С. Гордеев / РХТУ им. Д. И. Менделеева. – М. – 2003. – 76 с.

5. Пичкалев А. В. Применение кривой желательности Харрингтона для сравнительного анализа автоматизированных систем контроля // Вестник КГТУ. Красноярск. – 1997. – №1. – С. 128–132.

6. Головки С. В. Диагностика технического состояния судового электрооборудования на основе интеллектуального анализа данных / С. В. Головки // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – №2. – С. 90–95.

7. Беднова О. В. Использование функции желательности Харрингтона для оптимизации многокритериальной оценки состояния лесных экосистем в условиях урбанизированной территории / О. В. Беднова // Лесной вестник. – 2011. – №7. – С. 35–41.

8. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, затвержені наказом Міністерства палива та енергетики України 25.07.2006 р № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості 13.02.2012 № 91) зі змінами, затвердженими Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 16.11.2012 № 905.

9. Нормативний документ Мінпаливенерго України «Норми випробування електрообладнання» СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007, затверджений Наказом Міністерства палива та енергетики України від 15.01.2007 № 13.

УДК 519.233.6:621.314.212

A. Voloshko, Dr. Sc. Sciences., Prof., ORCID 0000-0003-3337-****
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"
Ya. Bederak, Cand.Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-2669-0965
Public company "AZOT" Cherkasy city

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

COMPLEX STATISTICAL DATA ANALYSIS OF ELECTRIC POWER CONSUMPTION, CONSUMPTION OF ENERGY RESOURCES AND PRODUCTION VOLUMES

Aims of this research are development of a complex statistical analysis algorithm for active electric power consumption data, consumption of energy resources and manufacturing products, implementation of statistical analysis in practice.

Proposed parameters and criteria, which can help to technical staff in factories, to provide optimal and economical operating of supply and distribution systems as electricity, water, gas, heat, compressed air, etc. for production facilities, based on the collected active electric power consumption data for previous periods, information about consumption dynamic.

It is concluded that the statistical analysis of the data, obtained for each type of engineering equipments (water supply and sewage, supply systems of compressed air, gas, electricity and steam) and various consumables coefficients (in the proposed algorithm) make possible to identify "weak areas" and to determine the most rational ways to optimize energy usage.

Keywords: power consumption, energy consumption, statistical data analysis.

References

1. Denisenko M.A. Investigation of electrical loads (on) pumping station / M. A. Denisenko, Ya. S. Bederak // *Energetika & Elektrifikatsia*. – 2012. – №5. – P. 3 – 11.
2. Volobriniskii S.D. Electrical Loads of Industrial Enterprises / S.D. Volobriniskii, G. M. Kaialov, P. N. Klein, B.S. Meshel. – SPb.: Energia, 1971. – 264 p.
3. Fokin Yu.A. Probabilistic and statistical methods in the calculation of power supply systems / Yu.A. Fokin. – M.: Energoatomizdat, 1985. – 240 p.
4. Shidlovskii A.K. Calculation of electrical loads in industrial power systems / A. K. Shidlovskii, G. Ya. Vagin, E. G. Kurennii. – M.: Energoatomizdat, 1992. – 224 p.
5. Gegelenko I.V. Methods of probabilistic modeling in calculations the characteristics of loads of consumers / I.V. Gegelenko, Yu. L. Saenko, V.P. Stepanov. – M.: Energoatomizdat, 1998. – 96 p.
6. Denisenko M.A. Special issue of power supply, tutorial: S.I.: Selecting Items of electricity supply system based on stochastic modeling of processes occurring in them / M. A. Denisenko. – K.: NTUU «KPI», 2009. – 288 p.
7. Denisenko M.A. A study of statistical consumption data of active energy and water consumption at the pumping station / M. A. Denisenko, А.И. Замулко, Ya. S. Bederak // *Promishlennaya energetika*. – 2014. – №3. – P. 12 – 16.
8. Stetsenko I.V. Construction of multifactor mathematical models of energy consumption at chemical manufacturing / I.V. Stetsenko, Ya. S. Bederak // *Energoberegenie, Energetika, Energoaudit*. – 2013. – №7. – P. 41 – 48.

УДК 519.233.6:621.314.212

А. В. Волошко, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-3337-****;
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Я.С. Бедерак, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-2669-0965
Публічне акціонерне товариство «АЗОТ» м. Черкаси

ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГОЮ ПОНАД 110 КВ

Метою дослідження є діагностування технічного стану силових трансформаторів напругою 110 кВ і вище. Трансформатор являє собою важливий елемент в колі передачі електроенергії від електростанції до споживача і є складним технічним об'єктом, який оцінюється великою кількістю параметрів, значення яких можуть змінюватися в широкому інтервалі. Тому для оцінки стану трансформатора згортка нормалізованих параметрів стану за допомогою адитивного або мультиплікативного узагальнених критеріїв неефективна. Доведено доцільність застосування для оцінки стану і ранжування кількох силових трансформаторів функцію бажаності Харрінгтона. Функція Харрінгтона застосовується при наявності односторонніх обмежень на параметри стану трансформаторів.

Для виявлення незадовільного стану силових трансформаторів запропоновано в число оцінюваних включати трансформатор з мінімально допустимими параметрами. Ранжування групи трансформаторів щодо трансформатора в незадовільному технічному стані дозволяє уточнити стан кожного трансформатора і визначити необхідність проведення ремонту. Такий прийом можливо розповсюдити на інші технічні об'єкти.

Ключові слова: силовий трансформатор, параметри стану, частна та узагальнена функції бажаності Харрінгтона.

Надійшла 08.11.2018
Received 08.11.2018