

УДК 621.314

П. Д. Андриенко, д-р техн. наук,
С. П. Конограй

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ И СТОХАСТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Аннотация. Рассмотрена задача определения нагрузочной способности силовых масляных трансформаторов в непрерывном режиме эксплуатации с учетом влияния эксплуатационных факторов. Для уточнения температуры наиболее нагретой точки обмотки усовершенствована тепловая математическая модель трансформатора, учитывающая нелинейность тепловых сопротивлений элементов трансформатора. Представлена методика определения параметров нелинейности тепловой модели на базе данных от систем непрерывного контроля с использованием методов интеллектуального стохастического поиска. Показан обобщающий алгоритм определения нагрузочной способности трансформатора.

Ключевые слова: силовой трансформатор, нагрузочная способность, моделирование, тепловые сопротивления, температура наиболее нагретой точки обмотки, системы непрерывного контроля, старение изоляции, стохастическая оптимизация

P. Andrienko, ScD.,
S. Konogray

DETERMINATION OF POWER TRANSFORMER LOADING CAPACITY USING ON-LINE MONITORING SYSTEMS AND STOCHASTIC OPTIMIZATION

Abstract. The article exposes the problem of determining the loading capacity of oil-immersed power transformers in a continuous mode of operation, taking into account the impact of operational factors. The thermal mathematical model of transformer is improved to clarify the hot spot temperature of the winding, taking into account the nonlinearity of the thermal resistances of transformer elements. The determination method of nonlinear parameters of thermal model using the on-line monitoring system data and stochastic optimization techniques is developed. The generalizing algorithm for determining the power transformer loading capacity is developed.

Keywords: power transformer, loading capacity, modeling, nonlinear thermal resistances, hot-spot temperature, on-line monitoring systems, aging of insulation, stochastic optimization

П. Д. Андриенко, д-р техн. наук,
С. П. Конограй

ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМ НЕПРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ ТА СТОХАСТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Анотація. Розглянуто задачу визначення навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів в неперервному режимі експлуатації з урахуванням впливу експлуатаційних факторів. Для уточнення температури найбільш нагрітої точки обмотки удосконалено теплову математичну модель трансформатора, яка враховує нелінійність теплових опорів елементів трансформатора. Розроблено методику визначення параметрів нелінійності теплової моделі з використанням даних, які були виміряні системою неперервного контролю та з використанням методів інтелектуального стохастичного пошуку. Розроблено узагальнюючий алгоритм визначення навантажувальної здатності трансформатору.

Ключові слова: силовий трансформатор, навантажувальна здатність, моделювання, теплові опори, температура найбільш нагрітої точки обмотки, системи неперервного контролю, старіння ізоляції, стохастична оптимізація

Введение. Нагрузочная способность трансформаторов является одним из важнейших показателей эффективности и надёжности их работы. Точность её определения является важной составляющей эксплуатации.

Системы непрерывного контроля (СНК) высоковольтного оборудования подстанций [1 – 2] являются неотъемлемыми составляющими интеллектуальных производств.

Системы непрерывного контроля широко внедряются в Украине и других странах СНГ [3]. Кроме

задач диагностики в режиме реального времени, они также значительно расширяют возможности контроля тепловых режимов трансформаторов и создают предпосылки для автоматизации определения предельно допустимой нагрузки трансформаторов в зависимости от ее ожидаемой длительности [3]. Основным параметром, ограничивающим нагрузочную способность трансформаторов, является температура наиболее нагретой точки (ННТ) обмотки [4 – 6].

Постановка задачи исследования. К основным недостаткам методик расчета температуры ННТ обмотки, изложенных в ГОСТ 14209-97 [7], следует отнести:

1. Тепловые параметры и коэффициенты, используемые в тепловой модели методик, как правило, известны с малой точностью и только для номинального режима работы системы охлаждения трансформатора.

2. Стандарты при расчёте не учитывают постоянные времени обмотки и масла, а также теплоёмкости элементов трансформатора.

Принимая во внимание вышеизложенное, совершенствование методик расчета температуры ННТ обмотки для возможности определения нагрузочной способности трансформаторов в режиме эксплуатации является актуальной научно-практической задачей, что и обуславливает направление исследований в данной работе.

Цель исследования – разработка алгоритма автоматизированного определения нагрузочной способности трансформатора в непрерывном режиме эксплуатации, позволяющего планировать перегрузки трансформаторов с учетом текущего состояния оборудования и без опасности его аварийного выхода из строя, что обеспечит повышение надежности эксплуатации электроэнергетических систем.

Исходя из цели, сформированы следующие задачи исследования:

– уточнение тепловой математической модели трансформатора в части учета нелинейности тепловых сопротивлений от превышения температур для возможности определения температур элементов трансформатора и температуры наиболее нагретой точки обмотки в любой момент времени;

– разработка методики определения параметров тепловой модели трансформатора по экспериментальным данным систем непрерывного контроля с учетом различных режимов работы системы охлаждения трансформатора;

– разработка методики определения температуры наиболее нагретой точки трансформатора в режиме эксплуатации для возможности её использования в автоматизированном режиме в системах непрерывного контроля;

– проверка адекватности работы тепловой модели и найденных тепловых параметров на базе использования экспериментальных данных системы непрерывного контроля и результатов тепловых испытаний трансформатора на заводе-изготовителе;

– разработка комплексного алгоритма автоматизированного определения нагрузочной способности трансформатора в непрерывном режиме эксплуатации, одновременно учитывающего: влияние эксплуатационных факторов.

Уточнение тепловой математической модели трансформатора. С целью определения температуры элементов трансформатора, при постоянно изменяющихся токе нагрузки и условиях охлаждения, в опубликованной ранее работе [6] была разработана тепловая модель на основе принципа термоэлектрической аналогии. Однако в этой модели не учтена нелиней-

ная природа тепловых сопротивлений элементов трансформатора, что снижает точность результатов расчета температур.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией не является постоянной величиной, так как вязкость масла, определяющая внутреннее трение между частицами, движущимися с разными скоростями, уменьшается с ростом температуры. В результате, при большей температуре скорость движения масла растёт и коэффициент теплоотдачи увеличивается.

Таким образом, в отличие от теплопроводности, конвективный теплообмен является нелинейным и зависит от физических свойств охлаждающей среды (плотности, теплоемкости, теплопроводности, вязкости), ее температуры и скорости движения, от размеров и свойств охлаждаемой поверхности (гладкая или шероховатая), ее температуры, геометрической формы и положения (вертикальная, горизонтальная и т. п.). На практике расчет коэффициента теплоотдачи конвекцией обычно производят по экспериментальным данным. В результате анализа экспериментальных данных в [5] получено общее выражение для зависимости теплового сопротивления от превышения температуры

$$R_{th}(\Delta\theta) = \frac{1}{\varepsilon \cdot \Delta\theta^\beta}, \quad (1)$$

где ε – коэффициент пропорциональности, Вт/К $^{\beta+1}$;

β – показатель степени превышения температуры тела.

Хотя масляный трансформатор и не является однородным телом, каждая из обмоток, магнитопровод, бак, а также масло рассмотрены независимо как сплошные однородные тела, в которых или выделяется тепло, или оно нагревается за счет притока теплоты от других тел [5].

В качестве объекта исследования выбран однофазный автотрансформатор (АТ) типа АОДТН-333000/750/330-У1 (ПС 750кВ «Ленинградская»).

В разработанной системе дифференциальных уравнений [6] линейные тепловые сопротивления заменены нелинейными в соответствии с (1).

Исходными данными при её решении являются:

1). Тепловые потери P_i в элементах АТ – определяются из протоколов заводских тепловых испытаний (опыты короткого замыкания и холостого хода).

2). Коэффициент нагрузки $K(t)$, температура окружающей среды $\theta_{air}(t)$, температура масла АТ $\theta_{oil}(t)$, я непосредственно измеряемые с использованием СНК.

3). Теплоёмкости C_i и коэффициенты тепловых проводимостей ε_i и β_i элементов АТ – неизвестные параметры.

Таким образом, для возможности использования разработанной уточненной тепловой модели (2) необходимо предварительное определение неизвестных параметров C_i , ε_i , β_i .

Идентификация и верификация параметров тепловой модели. Для определения параметров тепловой модели предложено использовать массивы реальных измерений от СНК, охватывающих разные режимы работы системы охлаждения силового трансформатора с использованием методов стохастической оптимизации.

Первым шагом для выполнения оптимизации является выбор целевой функции, осуществляющей выбор наиболее подходящего решения (с минимальной ошибкой) из имеющегося набора значений. Как правило, выбор целевой функции оптимизации основан на сравнении измеренного значения со значением, рассчитанным по модели.

Среди искомых параметров (температур элементов АТ), находящихся в левой части уравнений системы (3), и одновременно измеряемых СНК, доступна только температура масла θ_{oil} . В качестве инструмента сравнения выбрана сумма квадратов ошибок.

Таким образом, целевая функция оптимизации представлена в следующем виде:

$$f = \sum_{k=1}^N (\theta_{oil}(k) - \theta_{oil.meas}(k))^2, \quad (2)$$

где k – номер группы параметров;

N – общее количество групп параметров;

$\theta_{oil}(k)$, $\theta_{oil.meas}(k)$ – соответственно смоделированная и измеренная СНК температура масла АТ, °С.

С целью повышения точности нахождения параметров C_i , ε_i , β_i в статье предложена реализация двух-этапной оптимизации.

1. Первый этап – оптимизация с использованием метода эволюционного поиска (генетического алгоритма).

2. Второй этап – уточняющая оптимизация с использованием алгоритма имитации отжига.

В качестве начальной точки поиска на втором этапе использовалось решение, полученное с помощью эволюционного поиска.

Непосредственное использование метода имитации отжига для решения поставленной задачи без предварительного эволюционного поиска представляется нецелесообразным, поскольку метод имитации отжига требует задания начальной точки поиска, выбор которой является неочевидным.

На рис. 1 представлена схема разработанного алгоритма, применяемого для определения параметров модели (3) на первом этапе оптимизации с использованием метода эволюционного поиска.

Для проведения вычислений в процессе оптимизации использовалась компьютерная программа "Автоматизированная система эволюционного синтеза и оптимизации нейросетевых моделей" [8], реализующая методы интеллектуальной стохастической оптимизации.

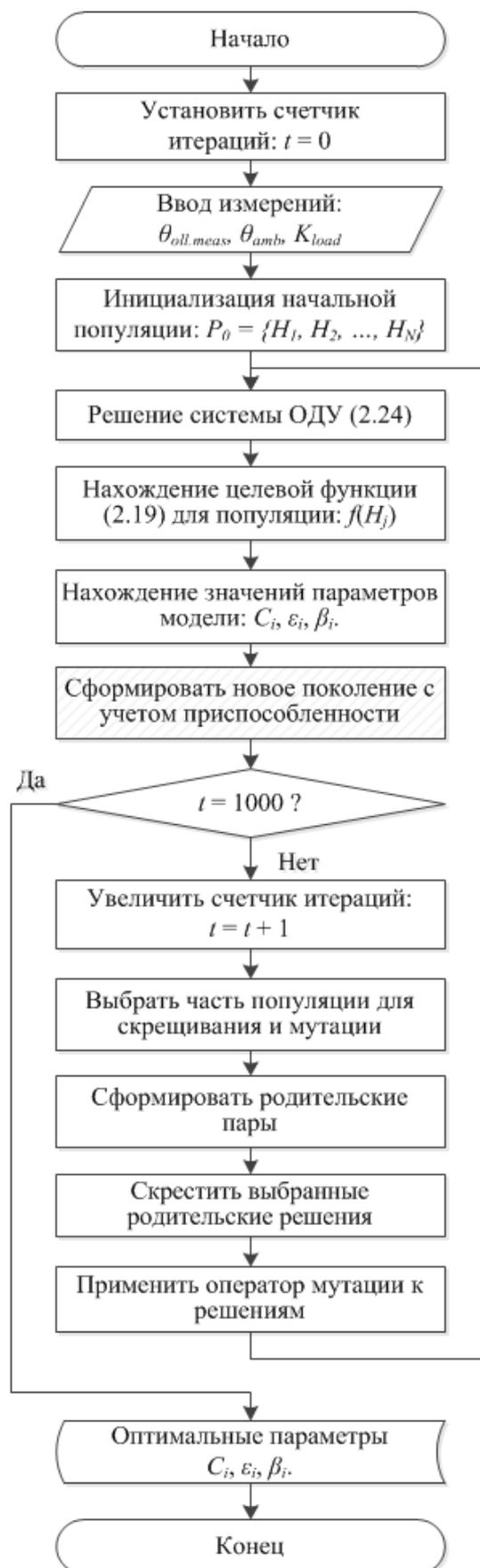


Рис. 1. Блок-схема алгоритма идентификации параметров модели с использованием метода эволюционного поиска (первый этап)

Экспериментальные исследования проводились с использованием измерений СНК SAFE-T, установленной на исследуемом автотрансформаторе [9]. Были использованы данные двух минутных измерений за период 10 дней (итого 7200 наборов измерений) следующих параметров: температура масла, температура воздуха, ток нагрузки.

На первом этапе для полученного решения значение целевой функции, определяемой по (3), составило: $f_1 = 623,40$ и средняя ошибка для 7200 значений температур масла: $\Delta\theta_1 = 0,294$ К.

Для повышения точности идентификации, на втором этапе, для метода имитации отжига, в результате применения которого значение целевой функции составило: $f_2 = 33,10$. Таким образом, на втором этапе оптимизации средняя ошибка для 7200 значений температур масла составила: $\Delta\theta_2 = 0,094$ К, что является приемлемым результатом.

Таким образом, за счет выполнения второго этапа оптимизации, удалось уменьшить среднюю ошибку в 3,128 раза, что подтверждает целесообразность выполнения двухэтапной оптимизации для решения поставленной тепловой задачи. Значения идентифицированных параметров тепловой модели C_i , ε_i , β_i автотрансформатора АОДТН-333000/750/330-У1, полученных в результате применения методов стохастической оптимизации на базе использования данных от

системы непрерывного контроля SAFE-T представлены в таблице.

Верификация найденных тепловых параметров осуществлялась с использованием результатов заводских тепловых испытаний АТ. Результаты представлены на рис. 2. Произведено сравнение результатов расчета с измеренными при тепловых испытаниях значениями температур обмоток. Максимальная ошибка расчета относительно аппроксимированных результатов измерений (экспоненциальной функцией) составила не более 0,25 К для каждой из обмоток (ПО и ОО).

Таким образом, подтверждена адекватность разработанной тепловой модели и эффективность использования предложенных методов идентификации тепловых параметров АТ.

Определение нагрузочной способности трансформатора. На базе ранее проведенных авторами исследований [10] с учетом использования уточненной в данной работе температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора, а также с учетом контролируемой в СНК влажности твердой изоляции обмоток на базе измерения влажности масла, разработан алгоритм автоматического определения нагрузочной способности трансформатора для его использования в СНК в режиме эксплуатации (рис. 3).

1. Результаты идентификации параметров тепловой модели автотрансформатора

Элемент АТ	Оптимизируемый параметр модели		
	$C_i, 10^6 \text{ Дж/К}$	$\varepsilon_i, 10^3 \text{ Вм/К}^{n+1}$	β
Бак	27,93	39,06	0,281
Магнитная система	43,80	1,565	0,531
Общая обмотка (ОО)	4,97	6,175	0,202
Последовательная обмотка (ПО)	7,62	6,063	0,323
Регулировочная обмотка (РО)	2,24	0,225	0,284
Обмотка низшего напряжения (НН)	0,29	0,093	0,361
Охладители	133,9	6,349	0,455

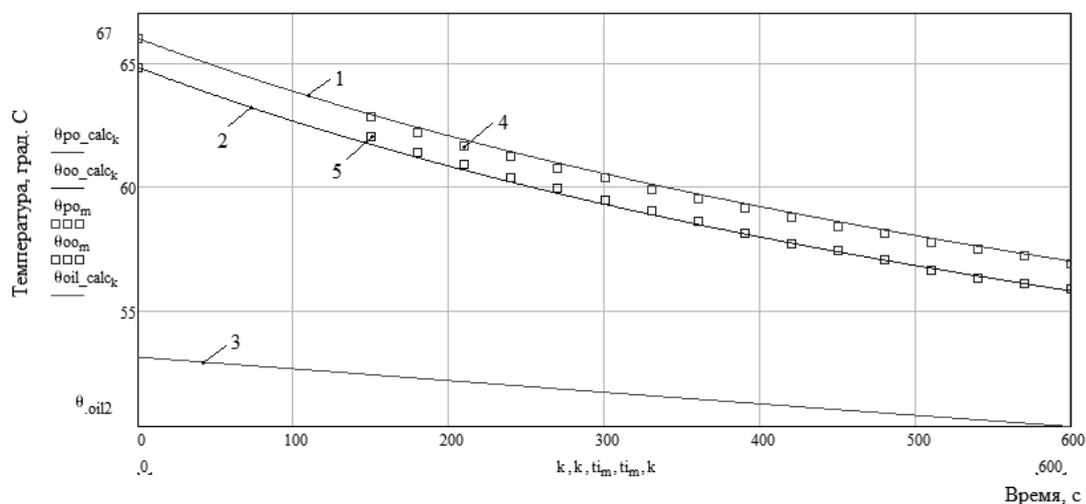


Рис. 2. Результаты верификации тепловой модели:

- 1; 2 и 3 – расчетные температуры соответственно последовательной, общей обмоток, масла;
- 4 и 5 – измеренные значения температур соответственно последовательной и общей обмотки в результате проведения тепловых испытаний АТ на заводе-изготовителе

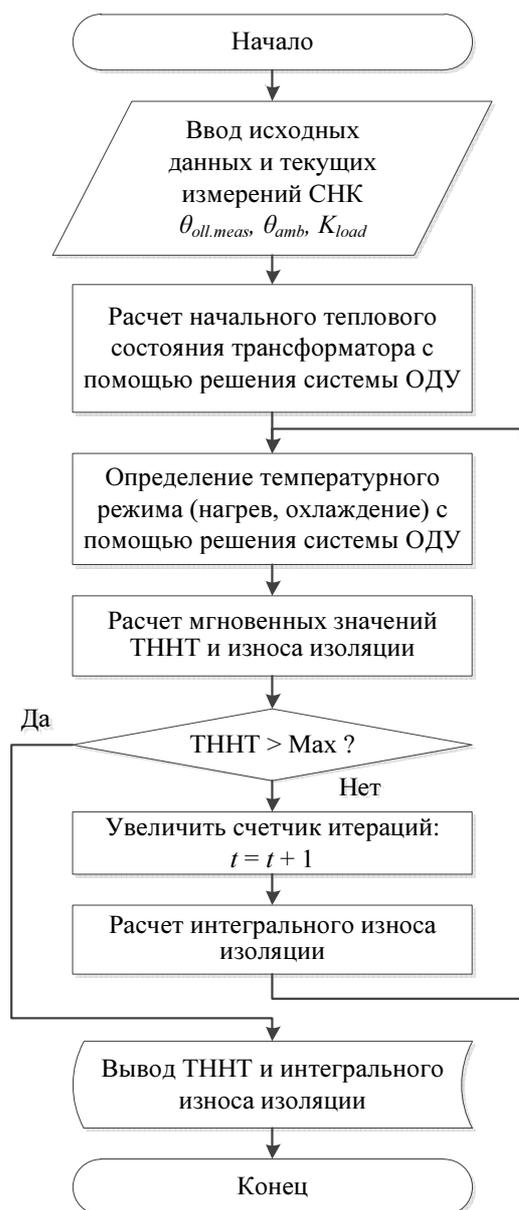


Рис. 3. Схема алгоритма автоматического определения нагрузочной способности трансформатора в СНК

Выводы. В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

- выполнено обоснование нелинейности тепловых сопротивлений элементов трансформатора;
- разработана уточненная тепловая математическая модель трансформатора, учитывающая нелинейность тепловых сопротивлений элементов трансформатора от превышения температур;
- разработан метод определения параметров тепловой модели трансформатора на базе экспериментальных данных систем непрерывного контроля и использования методов стохастической оптимизации (генетических алгоритмов и алгоритма имитации отжига);
- подтверждена эффективность разработанного метода определения тепловых параметров модели силового трансформатора и подтверждена возможность его применения в системах непрерывного контроля;

- получены коэффициенты нелинейности тепловых сопротивлений элементов трансформатора на примере автотрансформатора АОДТН-333000/750/330-У1 (ПС 750кВ «Ленинградская»);
- разработана методика автоматизированного определения температуры наиболее нагретой точки трансформатора в режиме эксплуатации с использованием полученной уточненной тепловой модели;
- выполнена проверка адекватности работы тепловой модели и методики определения коэффициентов нелинейности тепловых сопротивлений с использованием экспериментальных данных системы непрерывного контроля и результатов тепловых испытаний трансформатора на заводе-изготовителе;
- разработан комплексный алгоритм автоматизированного определения нагрузочной способности трансформатора в непрерывном режиме эксплуатации, одновременно учитывающий: влияние эксплуатационных факторов, в том числе тока нагрузки, влажности бумажно-масляной изоляции трансформатора и подтверждена возможность его использования в системах непрерывного контроля.

Список использованной литературы

1. Рассальский А. Н. Современные методы диагностики оборудования трансформаторных подстанций класса напряжения 220–750 кВ / А. Н. Рассальский, С. П. Конограй, А. Р. Лучко [и др.] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків : – 2008. – № 45. – С. 119 – 125.
2. Сахно А. А. Диагностирование высоковольтного оборудования распределительных установок 110-750 кВ в непрерывном режиме / А. А. Сахно, С. П. Конограй // Электрические сети и системы. – К. : 2012. – № 4. – С. 61 – 65.
3. Системы мониторинга высоковольтного оборудования SAFE-T: (официальный сайт ООО «Энергоавтоматизация») [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.enera.com.ua/2014> (Дата доступа 10.09.2014).
4. Лизунов С. Д. Силовые трансформаторы: справоч. кн. / Под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. – М. : Энергоиздат, 2004. – 616 с.
5. Боднар В. В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов / В. В. Боднар. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 177 с.
6. Рассальский А. Н. Применение тепловой модели силового автотрансформатора для расчета нагрева его элементов в режиме эксплуатации / А. Н. Рассальский, С. П. Конограй, А. Р. Лучко [и др.] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків : – 2009. – № 7. – С. 133 – 138.
7. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов (ИЕС 354–91): ГОСТ 14209–97. –

[Чинний з 2002-01-01]. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 82 с. – (Міждержавний стандарт).

8. Субботін С. О. Комп'ютерна програма «Автоматизована система еволюційного синтезу та оптимізації діагностичних моделей» : свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 26729 / С. О. Субботін, А. О. Олійник. – Держ. департамент інтелектуальної власності. – № 26039; заявл. 09.06.08; зареєстр. 01.12.08.

9. Рассальский А. Н. Результаты внедрения системы непрерывного контроля силовых автотрансформаторов на ПС 750 кВ «Ленинградская» / А. Н. Рассальский, С. П. Конограй, А. А. Сахно [и др.] // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук : 2009. – № 3 (56). – Часть 1. – С. 150 – 153.

10. Конограй С. П. Применение модели старения твёрдой изоляции силовых маслонеполненных трансформаторов для их диагностики в режиме эксплуатации / С. П. Конограй // *Электротехника і електромеханіка*. – Харьков : – 2010. – № 1. – С. 43 – 45.

Получено 10.05.2015

References

1. Rassalsky A.N., Konogray S.P., Luchko A.R., and Guk A.A. Sovremennyye metody diagnostiki oborudovaniya transformatornykh podstantsii klassa napryazheniya 220–750 kV [Modern Methods of Diagnosis of Transformer Substations Equipment Voltage Class 220 – 750 kV], (2008), *Visnyk Nacional'nogo Tehnichnogo Universytetu "Kharkivs'kyj Politehnicnyj Instytut". Zbirnyk Naukovykh Prac'. Tematychnyj Vypusk: Problemy Udoskonalennja Elektrychnykh Mashyn i Aparativ. Teorija i Praktyka*, Kharkov, Ukraine, Vol. 45, pp. 119 – 125 (In Russian).

2. Sakhno A.A., and Konogray S.P. Diagnostirovanie vysokovol'tnogo oborudovaniya raspredelitel'nykh ustanovok 110 – 750 kV v nepreryvnom rezhime [Diagnosis of high Voltage Equipment of Distribution Installations 110 – 750 kV in Continuous Operation], (2012), *Electrical Networks and Systems*, Kiev, Ukraine, Vol. 4, pp. 61 – 65 (In Russian).

3. High Voltage Equipment Monitoring Systems SAFE-T (official site “Energy Automation Ltd.”). www.enera.com.ua/

4. Lizunov S.D., and Lokhanin A.K. Silovye transformatory: spravochn. kn. Pod red. S. D. Lizunova, A. K. Lohanina [Power Transformers [Handbook], (2004), Moscow, Russian Federation, *Energoizdat*, 616 p. (In Russian).

5. Bodnar V.V. Nagruzochnaya sposobnost' silovykh maslyanykh transformatorov [Loading Capacity of oil Power Transformers], (1983), Moscow, USSR, *Energoizdat*, 177 p. (In Russian).

6. Rassalsky A.N., Konogray S.P., Luchko A.R., and Guk A.A. Primenenie teplovoi modeli silovogo avtotransformatora dlya rascheta nagreva ego elementov v rezhime ekspluatatsii [Application of the Thermal Model for the Calculation of Power Autotransformer Heating Elements in its Operating Mode], (2009), *Visnyk Nacional'nogo*

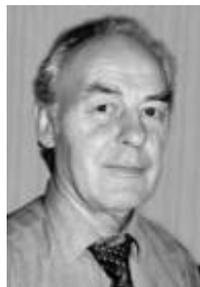
Tehnichnogo Universytetu "Kharkivs'kyj Politehnicnyj Instytut". Zbirnyk Naukovykh Prac'. Tematychnyj Vypusk: Problemy Udoskonalennja Elektrychnykh Mashyn i Aparativ. Teorija i Praktyka, Kharkov, Ukraine, Vol. 7, pp. 133 – 138 (In Russian).

7. Loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 354:1991, [Valid from 1991-12-31], Geneva: IEC, 1991, 72 p. (International standard).

8. Subbotin S.O., and Oliynyk A.O., (2008), Computer Program “Automatic System for Evolution Synthesis and Diagnosis Model Optimization”. Patent UA No. 26729, 01.12.2008.

9. Rassalsky A.N. Konogray S.P., and Sakhno A.A. Rezultaty vnedreniya sistemy nepreryvnoho kontrolya silovykh avtotransformatorov na podstantsii «Leningradskaya» [The Results of the Input of Power Autotransformers Continuous Monitoring System at the Substation “Leningradskaya”], (2009), *Visnyk KDPU imeni Myhajla Ostrograds'kogo*, Kremenchuk, Ukraine, Vol. 3 (56), Part 1, pp 150 – 153 (In Russian).

10. Konogray S.P. Primenenie modeli stareniya tverdoi izolyatsii silovykh maslonapolnennykh transformatorov dlya ikh diagnostiki v rezhime ekspluatatsii [Applying the Model of Aging Solid Insulation of Power oil-filled Transformers for their Diagnosis During Operation], (2010), *Elektrotehnika i Elektromehaniка*, Kharkov, Ukraine, Vol. 1, pp. 43 – 45.



Андриенко

Петр Дмитриевич, д.т.н., профессор, зав. каф. электрических и электронных аппаратов Запорожского нац. технического ун-та, ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063. Тел.: (061) 228-16-10. E-mail: nii-pre@ukr.net



Конограй

Сергей Петрович, аспирант каф. электрических и электронных аппаратов Запорожского нац. технического ун-та, ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063. Тел.: (067) 612-05-10. E-mail: konogray@gmail.com