

УДК 621.316.925.001.4

DOI:10.17213/0136-3360-2017-4-69-75

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ ЕГО ПОВЕРХНОСТЕЙ

С.С. Костинский, К.В. Васильева, В.В. Михайлов

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова.
Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

Рассматривается возможность применения способа оценки активных электрических потерь в трансформаторе, основанного на контроле температуры поверхности трансформатора без измерения тока в обмотках. Приведены выражения, позволяющие проводить оценку потерь для равномерного и неравномерного режимов работы трансформатора на основе решения дифференциального уравнения теплового баланса с определением отдельных параметров трансформатора по его名义альным характеристикам. Экспериментальное исследование выражения для неравномерного режима работы трансформатора, с применением точных средств измерения, показало достаточную применимую погрешность определения потерь по температурным измерениям, не превышающую в среднем 1 %. Приведена функциональная схема разработанного счетчика потерь и дана ссылка на зарегистрированную программу для ПЭВМ, реализующих указанный выше способ.

Ключевые слова: трансформатор, счетчик потерь, технические потери электроэнергии, неравномерный график нагрузки, потери активной электрической энергии, дифференциальное уравнение теплового баланса, тепловая постоянная времени трансформатора, потери холостого хода трансформатора, потери короткого замыкания трансформатора.

Для цитирования: Костинский С.С., Васильева К.В., Михайлов В.В. Определение потерь активной электрической энергии в трансформаторе на основе мониторинга температуры его поверхностей // Изв. вузов. Электромеханика. 2017. Т. 60, № 4. С. 69-75. DOI:10.17213/0136-3360-2017-4-69-75.

В НАСТОЯЩЕЕ время проблема энергосбережения и повышения энергетической эффективности из отраслевой превратилась в государственную. Энергосбережение – это направленный комплекс мер, основной целью которого является сокращение объема энергии, потребляемой от внешних источников [1]. А это, в свою очередь, приводит к более рациональному потреблению энергии, причем, на всех этапах ее преобразования и использования. Фактически потери могут быть разделены на четыре составляющие: технические потери; расход электроэнергии на собственные нужды подстанций; потери электроэнергии, обусловленные погрешностями ее измерения; коммерческие потери [2]. Технические потери электроэнергии обусловлены физическими процессами, происходящими при передаче электроэнергии по электрическим сетям и выражающиеся в преобразовании части

электроэнергии в теплоту. Они складываются из потерь в линиях и трансформаторах. В процентном отношении от потребления активной электрической энергии за условный период потери в трансформаторах составляют основную долю [3], поэтому их определение с необходимой для целей практики точностью является актуальной задачей.

Под основными потерями понимают вынужденные потери электроэнергии в симметричном, синусоидальном, равномерном и активном режимах. В настоящее время значительно возросли коммунальные нагрузки, являющиеся, как правило, однофазными и приводящие к дополнительным потерям, возникающим вследствие отклонения показателей качества электроэнергии от нормативных значений [4]. Основной причиной сверхнормативных потерь является несимметрия и несинусоидальность нагрузок силовых

трансформаторов. Поэтому актуальным является вопрос об их влиянии на потери активной мощности в трансформаторах.

Электрическая энергия, теряемая в трансформаторе в процессе преобразования переменного тока, выделяется в виде теплоты в обмотках, магнитной системе и других частях трансформатора [5]. Температура трансформатора отражает все потери активной электроэнергии в трансформаторе, выделяемые в виде теплоты, т.е. в магнитопроводе, обмотках, баке, от несимметрии и несинусоидальности токов. Это позволяет не учитывать режимы и не использовать конструктивные параметры трансформатора, которые не являются паспортными данными. Достоинством данного метода является отсутствие необходимости подключения токоизмерительных приборов, что является важным при энергоаудите и особенно при экспресс-аудите.

На основании закона сохранения энергии можно записать уравнение теплового баланса в следующей форме:

$$\Delta P dt = cGd\Theta + \alpha S \Delta \Theta dt, \quad (1)$$

где ΔP – потери активной мощности в трансформаторе за интервал измерения dt ; c – удельная теплоемкость; G – масса трансформатора; $d\Theta$ – приращение температуры трансформатора; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности; S – площадь поверхности; $\Delta \Theta$ – разность между температурой трансформатора и температурой окружающей среды.

Учитывая, что G , c , S и α являются постоянными величинами для конкретного трансформатора, закон сохранения энергии (1) примет вид [6]

$$dW = \frac{(P_{XX} + P_{K3})T}{\Delta \Theta} d\Theta + \frac{(P_{XX} + P_{K3})\Delta \Theta}{\Theta_{\infty}} dt, \quad (2)$$

где dW – потери активной электрической энергии в трансформаторе за интервал измерения dt ; P_{XX} – потери холостого хода трансформатора; P_{K3} – потери короткого замыкания трансформатора; T – постоянная времени нагрева трансформатора; $\Delta \Theta$ – разность между температурой трансформатора и окружающей среды; $d\Theta$ – приращение температуры трансформатора за интервал измерения dt ; Θ_{∞} – установившаяся температура трансформатора в номинальном режиме.

Слагаемые формулы (2) имеют следующий физический смысл:

$$-\frac{(P_{XX} + P_{K3})T}{\Delta \Theta} d\Theta \text{ – количество аккумулированной теплоты в трансформаторе;}$$

$$-\frac{(P_{XX} + P_{K3})\Delta \Theta}{\Theta_{\infty}} dt \text{ – количество теплоты,}$$

отдаваемой в окружающую среду.

С целью уменьшения погрешности расчета потерь активной электроэнергии для сухого трансформатора следует разделить потери, выделяемые в магнитной системе и обмотке [7], и тогда выражение (2) примет вид

$$dW = \frac{P_{XX}T_{XX}}{\Delta \Theta_{XX}} d\Theta_{XX} + \frac{P_{K3}T_{K3}}{\Delta \Theta_{K3}} d\Theta_{K3} + \\ + \left(\frac{P_{XX}\Delta \Theta_{XX}}{\Theta_{\infty_{XX}}} + \frac{P_{K3}\Delta \Theta_{K3}}{\Theta_{\infty_{K3}}} \right) dt, \quad (3)$$

где T_{XX} – постоянная времени нагрева магнитной системы; $\Delta \Theta_{XX}$ – разность между температурой магнитной системы и окружающей среды; $d\Theta_{XX}$ – приращение температуры магнитной системы за интервал времени dt ; T_{K3} – постоянная времени нагрева обмотки; $\Delta \Theta_{K3}$ – разность между температурой обмотки и окружающей среды; $d\Theta_{K3}$ – приращение температуры обмотки за интервал времени dt ; $\Theta_{\infty_{XX}}$ – установившаяся температура магнитной системы в номинальном режиме; $\Theta_{\infty_{K3}}$ – установившаяся температура обмотки в номинальном режиме.

Формула (3) справедлива, как указывалось выше, для номинального режима трансформатора, при равномерном графике нагрузки, так как потери ХХ и КЗ приняты неизменными. В действительности при реальных нагрузках загрузка трансформатора изменяется, вследствие чего изменяется величина потерь. В связи с этим при определении потерь электроэнергии необходимо находить потерю мощности в трансформаторе на каждом i -м промежутке времени dt для каждого элемента конструкции по формуле, приведенной в [8]:

$$\Delta P_{i+1} = \frac{\Theta_{i+1} - \Theta_i e^{-\frac{dt}{T}}}{1 - e^{-\frac{dt}{T}}} \left(\frac{\Delta P_h}{\Theta_{\infty_h}} \right). \quad (4)$$

Суммарные потери активной мощности в трансформаторе за время dt складываются из потерь в каждом n -м элементе трансформатора:

$$P = \sum_{n=1}^k P_n.$$

Потери электрической энергии за время dt :

$$W = P dt.$$

Суммирование потерь электрической энергии за каждый интервал времени дает общие потери электрической энергии в трансформаторе за искомый интервал времени при любом графике нагрузки.

С целью проверки работоспособности выражения (4), адаптированного для сухого трансформатора, проведен эксперимент на однофазном сухом трансформаторе с использованием измерительного оборудования, прошедшего метрологическую поверку. Датчики температуры трансформатора были закреплены на магнитной системе и обмотке, также был предусмотрен датчик для измерения температуры окружающей среды вблизи трансформатора. Места установки датчиков температуры соответствовали местам, показанным на рис. 1. График изменения температуры окружающей среды показан на рис. 2.

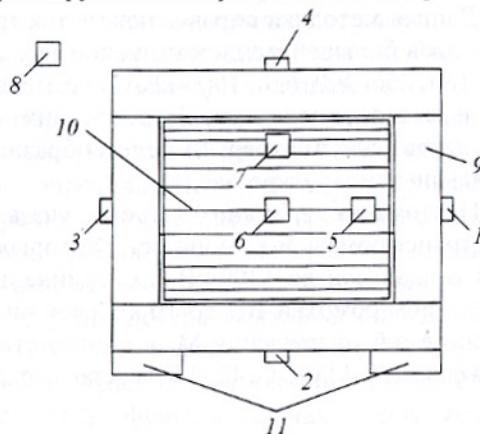


Рис. 1. Места установки датчиков температуры на однофазном сухом трансформаторе: 1 – 4 – датчики температуры, закрепленные на магнитной системе трансформатора; 5, 6, 7 – датчики температуры, закрепленные на обмотке трансформатора; 8 – датчик температуры для измерения температуры окружающей среды; 9 – магнитная система; 10 – обмотка; 11 – основания трансформатора

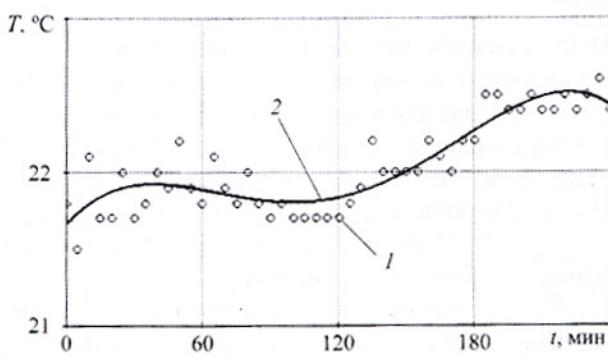


Рис. 2. График изменения температуры окружающей среды от времени: 1 – данные, измеренные датчиком температуры 8 (см. рис. 1); 2 – данные, измеренные датчиком температуры 8 (см. рис. 1), аппроксимированные полиномом 4-го порядка

С помощью блока активной и индуктивной нагрузки для трансформатора с номинальной мощностью 500 ВА был задан график нагрузки, показанный на рис. 3. В момент минимума полная мощность составляла 80 ВА, в момент максимума – 440 ВА.

Результаты измерения датчиков температуры (рис. 1) показаны на рис. 4 и 5.

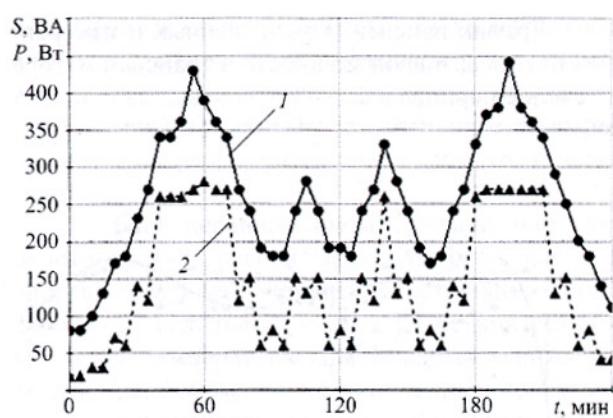


Рис. 3. График нагрузки трансформатора при проведении эксперимента при неравномерном графике нагрузки:
1 – полной мощности; 2 – активной мощности

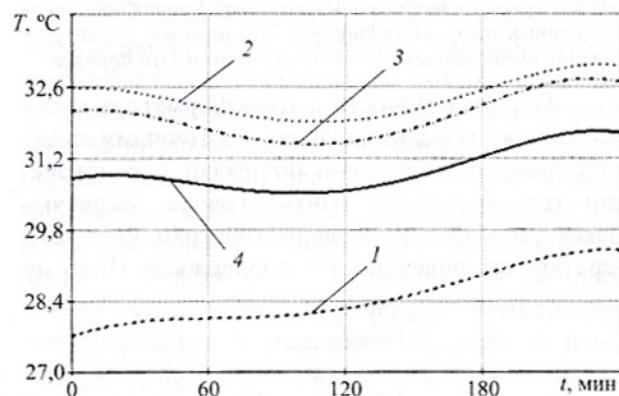


Рис. 4. График изменения температуры обмотки от времени: 1, 2, 3 – аппроксимированные данные, полученные с датчиков температуры 5, 6, 7 (см. рис. 1) соответственно; 4 – среднее значение температуры

Снижение температуры обмотки (см. рис. 4, кривые 2 – 4) объясняется первоначальным нагревом трансформатора номинальным током в течение 24 ч, т.е. до установившейся температуры. Нагрузка на первом интервале измерения была снижена до 80 ВА, поэтому на рис. 4 в интервале от 0 до 60 мин наблюдается снижение температуры.

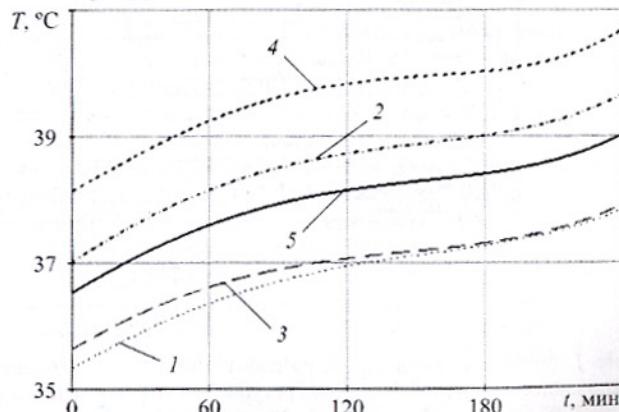


Рис. 5. График изменения температуры магнитной системы от времени: 1 – 4 – аппроксимированные данные, полученные с датчиков температуры 1 – 4 (см. рис. 1) соответственно; 5 – среднее значение температуры

График изменения вычисленных и измеренных потерь активной мощности в трансформаторе в течение периода измерения показан на рис. 6.

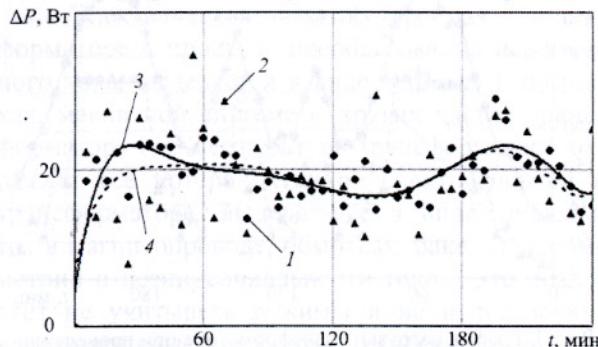


Рис. 6. График изменения потерь активной мощности в трансформаторе в течение периода измерения: 1 – измеренные значения; 2 – вычисленные значения; 3 – аппроксимация измеренных значений полиномом 7-го порядка; 4 – аппроксимация вычисленных значений полиномом 7-го порядка

Потери мощности в трансформаторе в любой момент времени не являются точными ввиду инерционности тепловых процессов в конструкции трансформатора. Иначе говоря, выделяющаяся теплота в трансформаторе изменяет температуру его поверхностей с задержкой. Поэтому

измерение и оценка точности вычислений возможна только для электроэнергии, а не мощности потерь, как мгновенной характеристики. Потребление активной электрической энергии из сети трансформатором и нагрузкой за цикл измерения составило 672,475 Вт·ч. Потери, измеренные за аналогичный период, составили 79,975 Вт·ч. Потери, вычисленные по предлагаемой в статье методике, с использованием данных, полученных с датчиков температуры, составили 79,325 Вт·ч. Соответственно относительное значение погрешности вычисления потерь активной электроэнергии за период измерения составило 0,812 %.

Данная методика справедлива и для трансформаторов большей мощности, например, с $S_n = 100, 160, 250, 400, 630, 1000$ кВА и более, в том числе и маслонаполненных. В последних измерение потерь электроэнергии целесообразно определять по температуре масла.

Постоянная времени нагрева указанных выше трансформаторов, мощность которых попадает в диапазон до 6300 кВА, с номинальным напряжением обмотки ВН до 10 кВ включительно и системой охлаждения М, в соответствии с приложением № 4 ГОСТ 14209-85, составляет 2,5 ч.

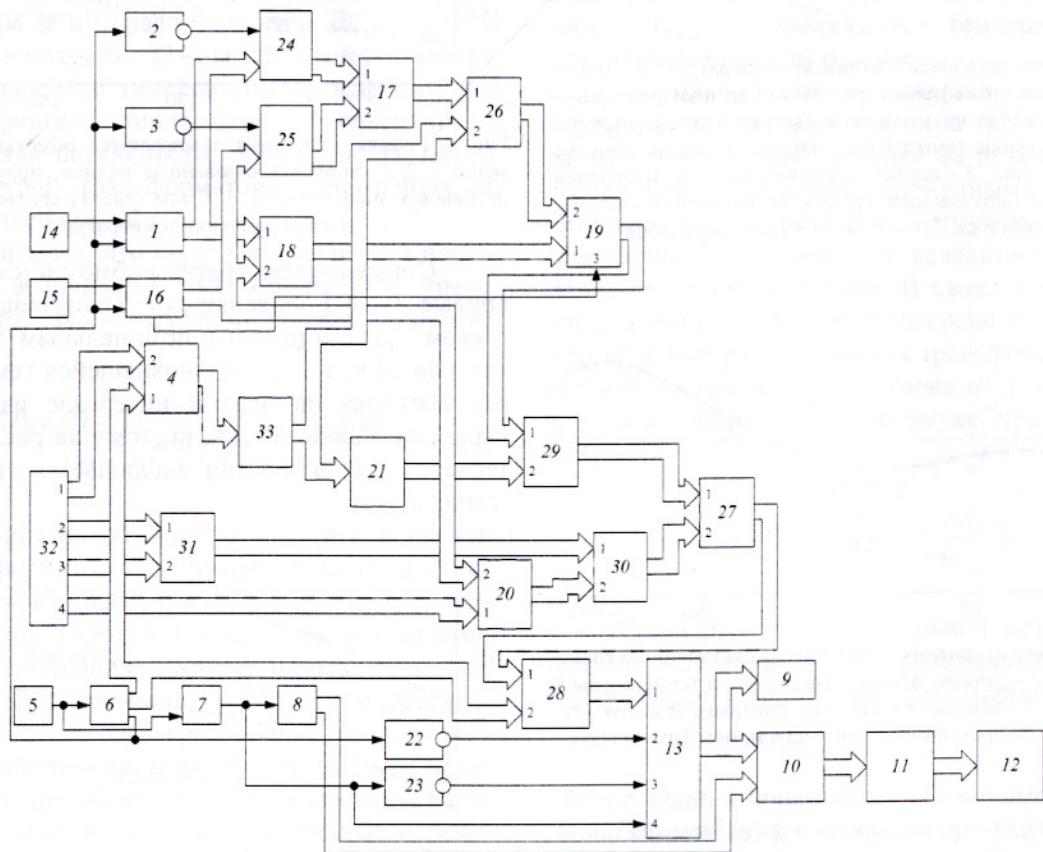


Рис. 7. Функциональная схема разработанного устройства для реализации способа определения потерь в трансформаторе, основанного на измерении температуры при неравномерном графике нагрузки: 1, 16 – аналого-цифровой преобразователь; 2, 3, 22, 23 – одновибратор; 4, 29, 30 – блок деления; 5 – генератор прямоугольных импульсов; 6 – таймер; 7 – таймер-часов; 8 – счетчик; 9 – индикатор; 10 – перепрограммируемое запоминающее устройство; 11 – приемопередатчик; 12 – компьютер; 13 – накапливающий сумматор; 14, 15 – датчики температуры; 17, 18, 19, 20 – вычитатель; 21 – блок вычитания из единицы; 24, 25 – регистр памяти; 26, 27, 28 – умножитель; 31 – сумматор; 32 – блок задания параметров трансформатора; 33 – блок возвведения в отрицательную степень основания натурального логарифма

У испытываемого трансформатора по итогам проведенных экспериментальных измерений постоянная нагрева магнитопровода составила 2,056 ч, а обмотки – 1,861 ч. Указанные постоянные нагрева меньше указанной в ГОСТе соответственно на 17,7 и 25,5 %. Это позволяет сделать вывод о возможности применения методики для других силовых трансформаторов.

Для определения потерь применяются различные математические модели [9, 10] и счетчики потерь активной электроэнергии, например [11], принцип работы которых основан на законе Джоуля-Ленца. Недостатком таких счетчиков является то, что они определяют энергию потерь только в обмотках трансформатора. Не учитываются потери в магнитной системе, баке, а также потери от несимметрии и несинусоидальности тока. Для учета потерь также необходимо знать сопротивление объекта, где производятся измерения, которое изменяется в зависимости от температуры нагрева и окружающей среды. Все вышеизложенное приводит к снижению точности измерения потерь электрической энергии.

С учетом уравнения (4) и для устранения указанных выше недостатков предложен счетчик потерь [12], функциональная схема которого приведена на рис. 7.

Задачей счетчика является обеспечение измерения потерь активной электроэнергии в трансформаторе, выделяющихся в виде теплоты, и снижение экономических затрат при производстве устройства за счет упрощения конструкции при измерении потерь в трехфазном трансформаторе.

Техническим результатом является повышение точности за счет измерения активных потерь электроэнергии в трансформаторе, выделяющихся в виде теплоты, обеспечение бесперебойного электроснабжения потребителей электрической энергией при неисправности или метрологической поверке устройства.

Также для расчета потерь разработанным методом написана и зарегистрирована программа для расчета потерь активной электроэнергии на основе контроля температуры сухих силовых трансформаторов при неравномерном графике нагрузки [13].

ВЫВОДЫ

- Суть предлагаемого способа определения потерь активной электроэнергии в однофазном трансформаторе при неравномерном графике нагрузки заключается в том, что измеряется температура магнитной системы, обмотки и окружающей среды и через интервалы времени измерения, равные на два, три порядка меньше тепловой постоянной времени трансформатора,

вычисляются приращения температур магнитной системы и обмотки, определяются разности между температурами магнитной среды, обмотки и окружающей среды. Потери активной электроэнергии в трансформаторе вычисляются по формуле (4).

- При неравномерном графике нагрузки целесообразно рассчитывать потери электроэнергии в каждом элементе конструкции трансформатора отдельно с учетом расчетной установленной температуры для каждого режима загрузки трансформатора и неизменных конструктивных параметров его элементов. Такое решение учитывает потери в обмотках, в магнитной системе, от высших гармоник тока и напряжения, от несимметрии нагрузки.

- В предлагаемом устройстве (счетчик потерь активной электроэнергии в трансформаторе) осуществляется определение потерь активной электрической энергии, теряемой в трансформаторе за интервалы времени равные на два, три порядка меньше тепловой постоянной времени, и выделяемые в виде теплоты, что позволяет решить поставленную задачу, при использовании первого 14 и второго 15 (см. рис. 7) датчиков температуры, которые измеряют температуру трансформатора и окружающей среды и параметров трансформатора, полученных вnominalном режиме его работы, необходимых для расчета.

- Формула (4) позволяет учесть все потери активной электроэнергии, выделяющиеся в трансформаторе в виде теплоты при неравномерном графике нагрузки. Среднее значение величины погрешности вычисления по формуле (4) за время эксперимента составило около 1 %.

ЛИТЕРАТУРА

- Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях / В.Э. Воротницкий, М.А. Калинкина, Е.В. Комкова, В.И. Пятигор // Энергосбережение. 2005. № 2. С. 2 – 6.
- Троицкий А.И. Уравновешивание токов нулевой последовательности: монография / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркаск: ЮРГТУ, 2001. 170 с.
- Методические указания по расчету потерь в электрических сетях, для составления ежемесячного баланса предприятия по потреблению электрической энергии. Министерство энергетики РФ, департамент государственного энергетического надзора и энергосбережения «ГОСЭНЕРГОНАДЗОР». Санкт-Петербург. 2001. 19 с.
- Троицкий А.И., Костинский С.С., Химишев Т.З. Определение дополнительных потерь в зависимости от качества электрической энергии для многоквартирного дома на основе экспериментальных данных // Изв. вузов. Электромеханика. 2014. № 3. С. 48 – 51.
- Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. М.: Энергия, 1980. 928 с.
- Костинский С.С., Михайлов В.В., Алексеева Д.С. Способ определения потерь в трансформаторе, основанный на измерении температуры // Современные

энергетические системы и комплексы и управление ими: Материалы 12-ой Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 25 июня 2014 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2014. С. 18 – 21.

7. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004. 616 с.

8. Оценка потерь активной электроэнергии в трансформаторе при неравномерном графике нагрузки / С.С. Костинский, В.В. Михайлов, Д.С. Алексеева, В.В. Лопанский // Изв. вузов. Электромеханика. 2015. № 2. С. 44 – 48.

9. Математическая модель процесса изменения температуры нагрева проводника / В.А. Гудзовская, В.Ф. Ермаков, Е.С. Балыкин, И.В. Зайцева // Изв. вузов. Электромеханика. 2012. № 2. С. 42 – 43.

10. Математическая модель процесса изменения температуры силового трансформатора / Е.С. Балыкин, В.А. Гуд-

зовская, Н.А. Евolenко, В.Ф. Ермаков, А.Н. Коваленко // Изв. вузов. Электромеханика. 2012. № 2. С. 43 – 44.

11. Пат. № 2380715 РФ. Счетчик потерь электроэнергии / Ермаков В.Ф., Балыкин Е.С., Ермакова Е.В., Зайцева И.В., Решетников Ю.М. № 2008128966/28. Заявл. 15.07.2008; опубл. 27.01.2010.

12. Пат. № 2589498 РФ. Счетчик потерь активной электроэнергии в трансформаторе / Костинский С.С., Михайлов В.В. № 2015114194/28. Заявл. 16.04.2015; опубл. 10.07.2016.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662379 Российская Федерация. Расчет потерь активной мощности и электроэнергии на основе контроля температуры сухих силовых трансформаторов распределительных сетей при неравномерном графике нагрузки // Костинский С.С.; № 2015619481; заявл. 07.10.2015; опубл. 24.11.2015.

Костинский Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электропривод» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. E-mail: mirovingen1987@mail.ru

Васильева Кристина Владимировна – магистр кафедры «Электромеханика и электрические аппараты» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

Михайлов Владимир Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электропривод» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.