



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТОЧКИ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ 6(10) КВ

Е.Е. Готовкина¹, А.А. Яблоков^{1,2}, Н.Н. Смирнов¹, А.В. Панащатенко², В.Д. Лебедев^{1,2},
О.А. Добрягина¹

¹Ивановский государственный энергетический университет имени
В.И. Ленина, г. Иваново, Россия

²НПО «Цифровые измерительные трансформаторы», г. Иваново, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-0211-375X>, andrewyablokov@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблему надежности функционирования малогабаритных пунктов коммерческого учета электрической энергии (ПКУ), основанных на нетрадиционных измерительных преобразователях тока и напряжения (катушка Rogowski и резистивный делитель). Выявить наиболее тяжелые климатические условия, в которых могут эксплуатироваться ПКУ. Выполнить исследования теплового состояния ПКУ в различных режимах работы сети, а также при проведении высоковольтных испытаний. Определить условия, при которых тепловыделение на резистивном делителе достигает максимального значения. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялись трехмерные гибридные полевые и цепные имитационные модели, рассчитываемые методом конечных элементов и методами теории линейных электрических цепей. Разработанные имитационные модели позволяют проводить исследования не только в нормальных, но и в аварийных режимах работы электрической сети, при грозовых и импульсных перенапряжениях, испытаниях изоляции и наличии инсоляции. РЕЗУЛЬТАТЫ. Приведены результаты исследований теплового состояния автоматизированной точки коммерческого учета электроэнергии класса напряжения 6(10) кВ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. При использовании резистивного делителя в качестве первичного преобразователя напряжения наибольшее тепловыделение происходит при дуговых перемежающихся однофазных замыканиях на землю по теории Петерсона. Результаты выполненных исследований показали, что расчет ПКУ, основанного на резистивном делителе напряжения, должен выполняться на имитационных моделях с учетом инсоляции и суточного графика изменения максимальной температуры воздуха.

Ключевые слова: малогабаритный пункт учета электроэнергии; интеллектуальная энергосистема; преобразователь напряжения; однофазное замыкание на землю; инсоляция; тепловое состояние; имитационная модель.

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке ПАО «МРСК Центра и Приволжья» в соответствии с договором на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по теме «Исследование физических процессов функционирования и разработка опытного образца автоматизированной точки коммерческого учета электроэнергии 6(10) кВ с магнитотранзисторным преобразователем для нужд ПАО «МРСК Центра и Приволжья».

Для цитирования: Готовкина Е.Е., Яблоков А.А., Смирнов Н.Н., Панащатенко А.В., Лебедев В.Д., Добрягина О.А. Исследование теплового состояния автоматизированной точки коммерческого учета электроэнергии 6(10) кв. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 182-196. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-182-196.

STUDYING THE THERMAL CONDITION OF AN AUTOMATED 6 (10) KV ELECTRIC POWER FISCAL METERING LOCATION

Е.Е. Gotovkina¹, А.А. Yablokov^{1,2}, N.N. Smirnov¹, A.V. Panashatenko², V.D. Lebedev^{1,2},
O.A. Dobryagina¹

¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia

²Research and Production Association "Digital Measurement Transformers", Ivanovo, Russia

andrewyablokov@yandex.ru

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-0211-375X>, andrewyablokov@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Examine the problem of reliable functioning of small electric power fiscal metering locations (EPFML) based on unconventional instrument current and voltage converters (Rogowski coil and resistive divider). Identify the most severe environmental conditions in which EPFML can be operated. Conduct research into EPFML thermal condition in different grid operation modes, and also during high voltage testing. Determine the conditions in which heat emission at the resistor divider attains its maximum value. *METHODS.* To solve the problem, use was made of three-dimensional hybrid field and chain simulation models, calculated by the methods of finite elements and linear electric circuit theory. The developed simulation models enable research to be conducted not only in normal, but also emergency electric grid operation, during lightning and pulse surges, insulation testing, and in the presence of insolation. *RESULTS.* The article presents the results of research concerning the thermal condition of a 6 (10) kV automated electric power fiscal metering location. *CONCLUSION.* If a resistive divider is used as a primary voltage converter, maximum heat emission occurs in the event of intermittent single phase arc faults to earth in accordance with Petersen's theory. The results of the conducted research show that an EPFML based on a resistive voltage divider should be calculated using simulated models, taking into account insolation and the daily pattern of changes in maximum ambient temperature.

Keywords: compact electric power fiscal metering location; smart electric power system; voltage converter; single phase earth fault; insolation; thermal condition; simulation model.

Acknowledgments: This research was carried out with financial backing from PJSC «IDGC of Centre and Volga region» pursuant to an R & D agreement on studying the physical processes related to the functioning and development of a prototype automated 6(10) kV electric power fiscal metering location with a magneto-transistor converter for the needs of PJSC «IDGC of Centre and Volga region».

For citation: Gotovkina EE, Yablokov AA, Smirnov NN, Panashatenko AV, Lebedev VD, Dobryagina OA. Studying the thermal condition of an automated 6 (10) Kv electric power fiscal metering location. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1): 182-196. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-182-196.

Введение

В настоящее время, инновационное развитие электроэнергетики направлено на создание интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью, которая должна обладать такими свойствами как гибкость, обозреваемость, надежность, самодиагностика и др [1-8].

Одной из ключевых технологических областей интеллектуальной энергосистемы являются измерительные приборы и устройства, обеспечивающие обозреваемость сети [9]. Развитие микропроцессорной техники открыло возможность применения новых (нетрадиционных, маломощных) измерительных преобразователей тока и напряжения, не использовавшихся ранее в электроэнергетике и обладающих преимуществами перед электромагнитными трансформаторами тока и напряжения [10, 11]. К таким преобразователям относятся катушка Роговского, резистивный делитель, гальваномагнитные датчики и другие. Коллективом исследователей и конструкторов ООО НПО «ЦИТ» по заказу ПАО «МРСК Центра и Приволжья» была разработана автоматизированная точка коммерческого учета электроэнергии в сетях класса напряжения 6 (10) кВ (далее – АТКУЭ)¹, основанная на использовании нетрадиционных первичных преобразователей (рис. 1).

¹ Сайт ООО НПО ЦИТ. Доступно по: <https://digitrans.ru/> Ссылка активна на 22 октября 2020.

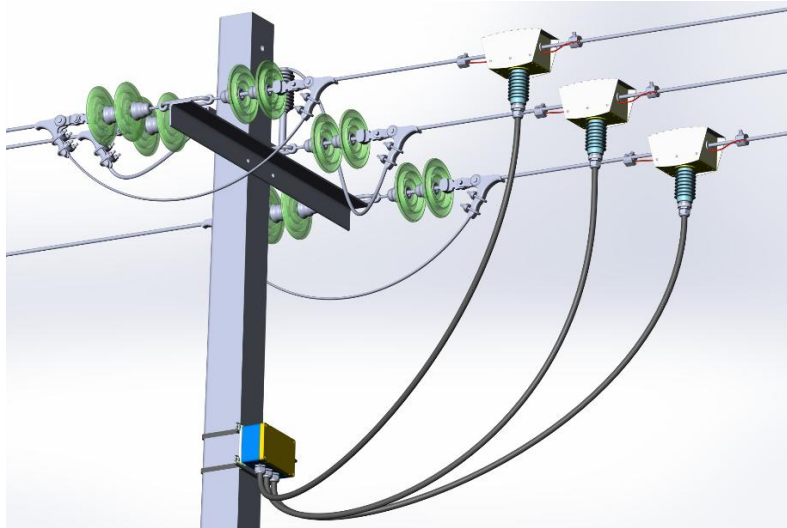


Рис. 1. Трехмерная модель АТКУЭ 6(10) кВ
Fig.1. Three-dimensional model of the 6(10) kV ASUE

Данное устройство предназначено для выполнения коммерческого учета электроэнергии на границе балансовой принадлежности (или месте, максимально приближенном к ней) объектов электроэнергетики смежных субъектов розничного рынка. Благодаря использованию нетрадиционных первичных преобразователей, имеющих низкие массогабаритные показатели, монтаж АТКУЭ выполняется на линии электропередач без разрыва токопровода и установки дополнительных монтажных конструкций. Кроме того, такое устройство не подвержено явлениям феррорезонанса, остаточной намагниченности и насыщения магнитопровода, а питание электроники осуществляется непосредственно от линии электропередачи.

Метрологические характеристики и надежность работы АТКУЭ являются основными эксплуатационными параметрами, определяющими качество её разработки и изготовления. Автоматизированная точка коммерческого учета электроэнергии должна нормально функционировать в сложных климатических условиях и при повреждениях в электрической сети (при температуре окружающего воздуха 40°C , в безоблачную погоду, в штиль, когда присутствуют значительные тепlopоступления на поверхность АТКУЭ от Солнца и при наличии однофазного замыкания на землю). В таких условиях одним из ключевых факторов, определяющих надежность работы АТКУЭ, является её тепловое состояние [12, 13], поскольку в качестве первичного преобразователя напряжения используется резистивный делитель. Применение таких технологий как тепловые трубки [14-16] для охлаждения элементов резистивного делителя невозможно с точки зрения обеспечения высоковольтной изоляции устройства. В связи с этим правильный выбор параметров резисторов и конструкции делителя напряжения АТКУЭ оказывает значительное влияние на её температурный режим работы, который может быть определен исключительно на имитационных моделях, учитывающих реальные условия эксплуатации. Емкостные делители, используемые в ряде аналогичных устройств [17,18], имеют такие недостатки как неравномерность амплитудно-частотной характеристики, препятствующая достоверному определению процентного содержания высших гармоник в кривой первичного напряжения, что необходимо для анализа качества электроэнергии, не всегда достаточную точность измерений, поскольку конденсаторы характеризуются диэлектрическими потерями и имеют существенную зависимость электрической емкости от приложенного напряжения и температуры, невозможность работы на постоянном токе, наличие остаточных зарядов, что приводит к высокой погрешности измерения при их повторном включении в переходных режимах [19-21].

Настоящая статья посвящена оценке теплового состояния АТКУЭ на имитационных моделях с целью определения оптимальных параметров её материалов и элементов.

Материалы и методы

Для исследования теплового состояния автоматизированной точки коммерческого учета электроэнергии 6(10) кВ была разработана гибридная трехмерная имитационная математическая модель, структура которой представлена на рис. 2.

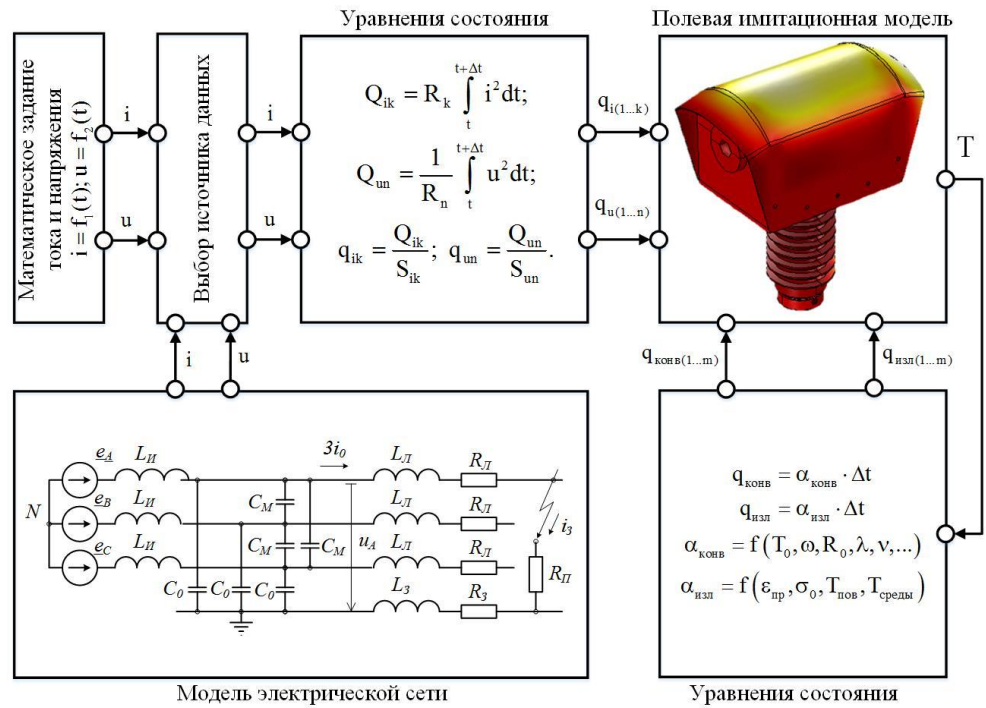


Рис. 2. Структура трехмерной гибридной имитационной модели АТКУЭ 6(10) кВ:

e_A, e_B, e_C – фазные ЭДС источника питания; L_H – эквивалентная индуктивность источника питания; C_0 – суммарная емкость фазы сети на землю; C_M – суммарная междофазная емкость сети; $3i_0$ – ток однофазного замыкания на землю; L_L и R_L – индуктивность и активное сопротивление поврежденной линии, соответственно; R_P – переходное сопротивление в месте повреждения; L_3 и R_3 – индуктивность и активное сопротивление контура обратного тока (земли), соответственно; u_A – напряжение на поврежденной фазе; $\alpha_{\text{конв}}$ – коэффициенты конвективной теплоотдачи от поверхностей различных конфигураций; $\alpha_{\text{изл}}$ – коэффициенты теплоотдачи излучением

Fig.2. e_A, e_B, e_C -phase EMF of the power supply; L_H - equivalent inductance of the power supply, C_0 - total network phase capacity per ground, C_m - total inter-phase network capacity, $3i_0$ - single-phase ground fault current; L_L and R_L - the inductance and active resistance of the damaged line, respectively, R_P - transient resistance at the point of damage; L_3 and R_3 - inductance and active resistance of the reverse current circuit (ground), respectively, u_A - voltage on the damaged phase; $\alpha_{\text{конв}}$ - coefficients of convective heat transfer from surfaces of various configurations, $\alpha_{\text{изл}}$ - radiation heat transfer coefficients

Отличительной особенностью разработанной имитационной модели является совмещение модели электрической сети 6 (10) кВ и модели тепловых полей АТКУЭ, что достигается за счет использования уравнений закона Джоуля-Ленца.

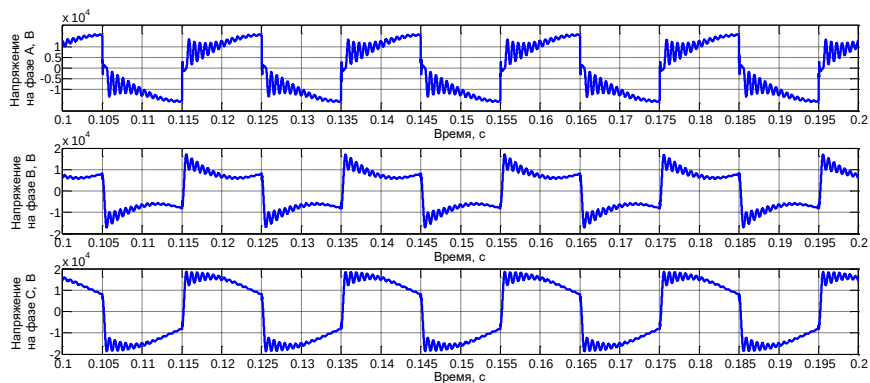
Блок математического задания тока и напряжения предназначен для аналитического или табличного формирования мгновенных значений тока, протекающего по первичному токопроводу, и напряжения прикладываемого к АТКУЭ. Данный блок используется при определении теплового состояния АТКУЭ в нормальном режиме работы, при грозовых и импульсных перенапряжениях, а также устойчивых повреждениях (например, устойчивых однофазных замыканиях на землю), в том числе при наличии гармонических искажений. Следует отметить, что при металлическом однофазном замыкании на землю (устойчивое повреждение) напряжение на неповрежденной фазе равно линейному напряжению сети (коэффициент перенапряжения равен $\sqrt{3}$).

Модель электрической сети используется для определения мгновенных значений токов и напряжений при дуговых перемежающихся однофазных замыканиях на землю (ДПОЗЗ) в сетях с изолированной нейтралью. Данный вид однофазного замыкания на землю и режим работы нейтрали выбраны исходя из максимально возможных длительных перенапряжений. Коэффициент перенапряжения при ДПОЗЗ в сети с изолированной нейтралью может достигать до 3,5-4 [22]. При других видах повреждений (устойчивые ОЗЗ и однократные самоустраняющиеся пробои изоляции) и в сетях с другими режимами работы нейтрали (заземление через дугогасящий реактор или через резистор) коэффициенты длительных перенапряжений не превышают указанных

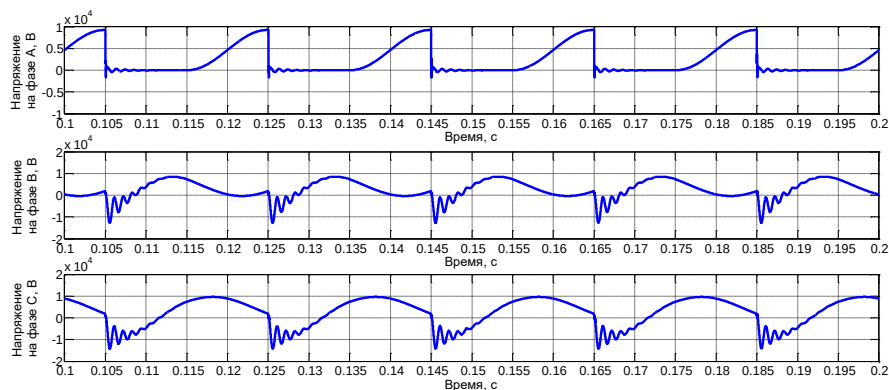
величин.

Моделирование ДПОЗЗ выполнено по следующим теориям:

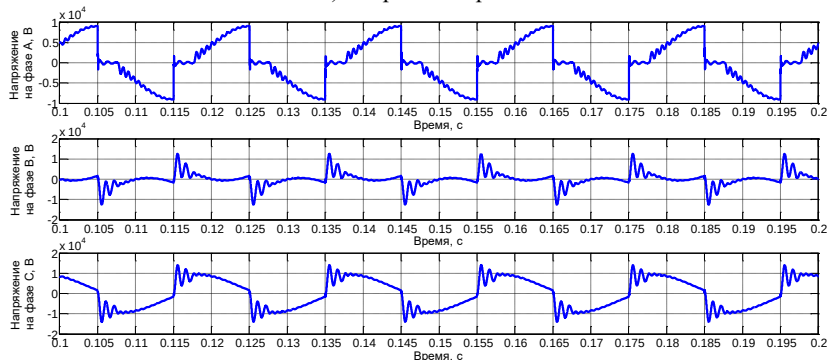
1. Теория Петерсена (рис. 3, а)[23].
2. Теория Петерса и Слепяна (рис. 3, б) [24].
3. Теория Белякова Н.Н. (рис. 3, в) [25].



а) теория Петерсена



б) теория Петерса и Слепяна



в) теория Белякова

Рис. 3. Напряжение при дуговом перемежающемся однофазном замыкании на землю фазы А в сети 6 кВ (емкостный ток сети 24,2 А)

Fig.3. Voltage at the arc intermittent single-phase earth fault of phase A in the 6 kV network (the capacitive current of the network is 24.2 A)

Полученные в результате расчета модели электрической цепи мгновенные значения токов и напряжений используются в интеграле Джоуля-Ленца для вычисления количества теплоты, выделяющегося на элементах АТКУЭ (q_u и q_i).

Полевая модель использует рассчитанные тепловыделения элементов АТКУЭ для определения её теплового состояния. Она включает уравнение теплового баланса (1), уравнения теплопроводности (2,3) и уравнения радиационного теплообмена между поверхностью и окружающей средой (4), уравнения поступления прямой и рассеянной солнечной радиации (5,6), дополненные граничными условиями тепловыделения на поверхности резистивного делителя и токопровода (7,8) и конвективного теплового потока (9)

$$Q_i + Q_u + Q_{\text{инс}}^{\text{пр}} + Q_{\text{инс}}^{\text{рас}} = Q_{\text{конв}} + Q_{\text{изл}}, \quad (1)$$

$$\rho(T) \cdot C_p(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = Q, \quad (2)$$

$$\vec{q} = -\lambda(T) \cdot \nabla T, \quad (3)$$

$$-\vec{n} \cdot \vec{q}_{\text{изл}} = \alpha_{\text{изл}} \cdot (T_{\text{пов}} - T_{\text{окр.ср}}), \quad (4)$$

$$q_{\text{инс}} = q_{\text{инс}}^{\text{пр}} + q_{\text{инс}}^{\text{рас}}, \quad (5)$$

$$q_{\text{инс}}^{\text{пр}} = F_{\text{ext.Bi}} \cdot \vec{i}_s \cdot q_{0,s} \cdot FER_{\text{Bi}}(T_{\text{Солнца}}), \quad (6)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{q} = q_u, \quad (7)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{q} = q_i, \quad (8)$$

$$-\vec{n} \cdot \vec{q} = \alpha_{\text{конв}} (T_{\text{пов}} - T_{\text{окр.ср}}), \quad (9)$$

где Q_i , Q_u – тепловые потоки, получаемые при прохождении тока через токопровод и от приложения напряжения на резистивный делитель, соответственно; $Q_{\text{инс}}^{\text{пр}}$, $Q_{\text{инс}}^{\text{рас}}$ – поступление теплоты от прямой и рассеянной солнечной радиации, соответственно; $Q_{\text{конв}}$, $Q_{\text{изл}}$ – конвективный и лучистый тепловые потоки от нагретой поверхности трансформатора к окружающему воздуху, соответственно; ρ – плотность материала; C_p – изобарная теплоемкость материала; T – температура; $\dot{q}$ – тепловой поток; λ – теплопроводность материала; ∇T – градиент температурного поля; $q_{\text{изл}}$ – удельный лучистый тепловой поток; $\alpha_{\text{изл}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением; $T_{\text{пов}}$ – температура на поверхности трансформатора; $T_{\text{среды}}$ – температура окружающей среды; $q_{\text{инс}}^{\text{пр}}$, $q_{\text{инс}}^{\text{рас}}$ – удельный тепловой поток от прямой и рассеянной солнечной радиации на поверхность; $F_{\text{ext.Bi}}$ – излучательная способность объекта; $q_{0,s}$ – плотность теплового потока от Солнца; $\vec{i}_s$ – вектор, описывающий местоположение Солнца относительно объекта, автоматически рассчитываемый в зависимости от координаты расположения объекта (географическая долгота, широта) и конкретного времени (часовой пояс, время, дата); $FER_{\text{Bi}}(T_{\text{Солнца}})$ – дробная излучательная способность при температуре Солнца, равной 5780 К; $\alpha_{\text{конв}}$ – конвективный коэффициент теплоотдачи от поверхностей различной конфигурации.

Данная система уравнений полевой модели дополняется уравнениями, описывающими коэффициент конвективной теплоотдачи для разных элементов АТКУЭ на основании^{2,3}.

Для задания наиболее неблагоприятных тепловых условий работы автоматизированной точки коммерческого учета электроэнергии 6(10) кВ в полевой модели был выполнен анализ изменения температуры воздуха и солнечной активности в летний период в Российской Федерации, а также было определено время их наибольшего суммарного значения.

Картина распределения средних из абсолютных максимумов температуры по регионам Российской Федерации представлена на рис. 4⁴. Средний из абсолютных максимумов температуры воздуха вычисляется как среднее многолетнее из абсолютных максимумов температуры за каждый отдельный год. Эта характеристика служит хорошим показателем наиболее высоких температур, наблюдаемых ежегодно в один из летних месяцев (как правило, в июне или июле). Анализ данных представленных в работах^{5,6} позволяет сделать вывод о том, что максимальные температуры воздуха находятся около отметки в 45 °С (Астраханская и Волгоградская области).

² Бухмиров, В.В. Тепломассообмен: учеб. пособие / В.В. Бухмиров. – Иваново, 2014. – 360 с.

³ Мартыненко, О.Г. Свободно-конвективный теплообмен: Справочник. Мн.: Наука и техника, 1982. 400 с.

⁴ Национальный атлас России. Том 2. Природа. Экология. Доступно по: <https://национальныйатлас.рф>. Ссылка активна на 22 октября 2020.

⁶ Свод правил СП 131.13330.2018 Строительная климатология. М: Минстрой России, 2018. 107 с.

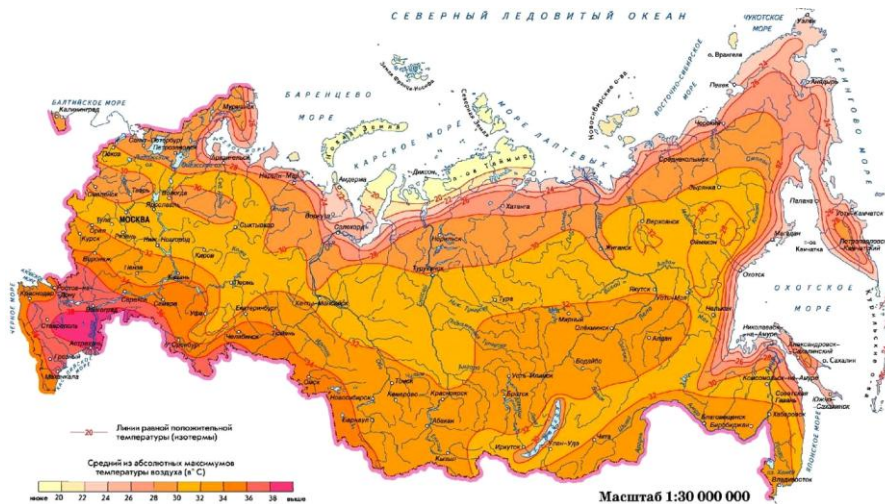


Рис. 4. Изотермы средних из абсолютных максимумов температуры воздуха, °С, по состоянию на 2010 год

Fig.4. Isotherms of the average of the absolute maximum air temperature, °C, as of 2010

Суточная амплитуда колебаний температуры воздуха зависит от интенсивности солнечной радиации, соотношения продолжительности дня и ночи и прозрачности атмосферы. Существенное значение имеют широта местности, высота ее над уровнем моря, время года и др. На экваторе амплитуда наибольшая, так как день и ночь имеют относительно равную продолжительность. На полюсах она наименьшая, поскольку летом солнце там совсем не заходит (полярный день). Рельеф и характер местности, погода и некоторые другие факторы оказывают определенное влияние на суточную амплитуду. Так, например, она менее выражена над большими водными поверхностями, чем над сушей, так как вода, обладая более высокой теплоемкостью, способна накапливать тепло в большей степени и медленнее его отдавать. При наличии растительного покрова или в пасмурную погоду суточная амплитуда также уменьшается, так как растительность, так же как и облачность, замедляет нагрев и охлаждение почвы. На основе данных по поступлению теплоты солнечной радиации⁷ и определенной ранее максимальной температуры воздуха в России был составлен наиболее «тяжелый» суточный ход температуры воздуха для условий работы АТКУЭ 6(10) кВ (табл. 1).

Таблица 1

Суточный ход температуры воздуха, используемый в модели (построен на основе данных для поселка городского типа Баскунчак Астраханской области (48 град. северной широты, 46,5 вост. долготы)⁸)

Время суток, часы	0	3	6	9	12	15	18	21
Температура воздуха, °С	36	32	36	40	43	45	42	38

Немаловажным фактором, влияющим на тепловое состояние АТКУЭ 6(10) кВ, является воздействие инсоляции. На рис. 5 представлены зависимости поверхностной плотности потока суммарной солнечной радиации (прямой и рассеянной) в июле от времени суток и месторасположения объекта, построенные на основании данных⁹ [26]. Анализ представленных данных показывает, что наибольший средний тепловой поток на территории Российской Федерации от Солнца составляет 920 Вт/м².

⁷ Львовский И.Б. Пособие 2.91 к СНиП 2.04.05-91. Расчет поступления теплоты солнечной радиации в помещения / И.Б. Львовский, Б.В. Баркалов. М.: Промстройпроект, 1991. 34 с.

⁸ Там же. табл. 7.

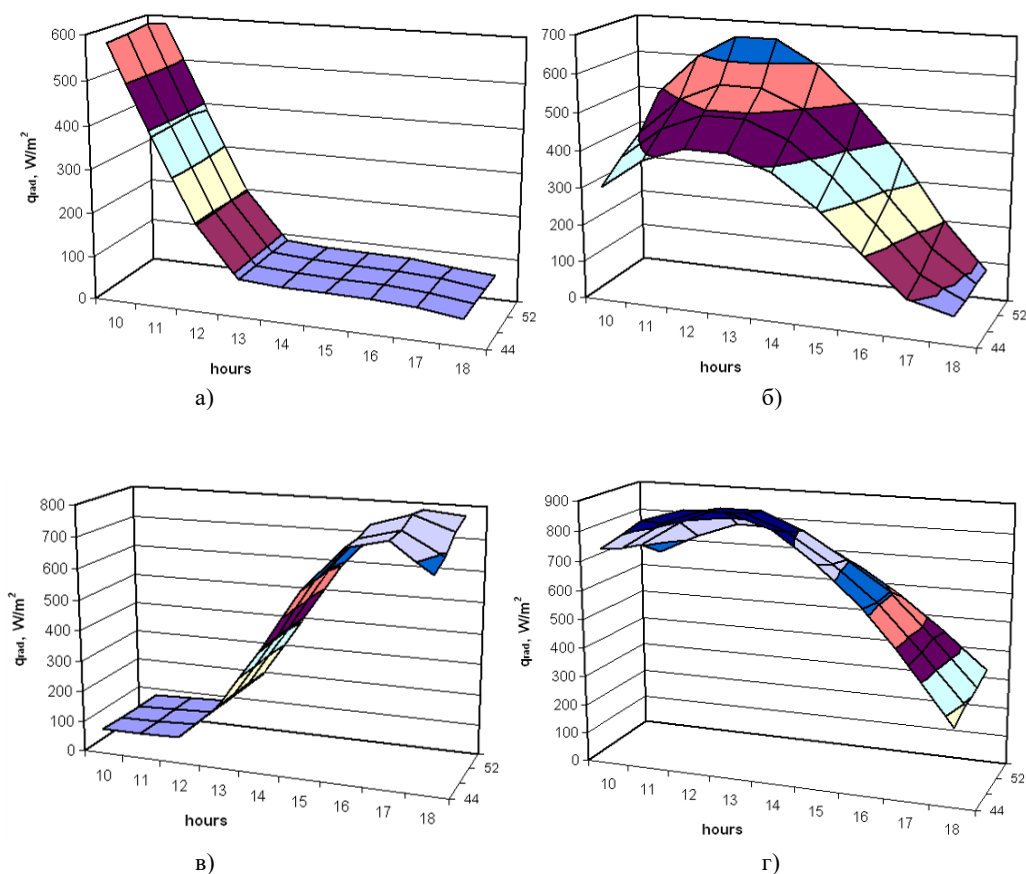


Рис. 5. Поверхностная плотность потока суммарной солнечной радиации (прямой и рассеянной) в июле, Вт/м², в зависимости от времени суток и месторасположения объекта (градусы северной широты) для восточной (а), южной (б), западной (в) вертикальных и горизонтальной (г) ориентаций поверхности

Fig.5. Surface flux density of total solar radiation (direct and scattered) in July, W / m², depending on the time of day and the location of the object (degrees north latitude) for the eastern (a), southern (b), western (c) vertical and horizontal (d) surface orientations

Следует также отметить, что в соответствии с ГОСТ 15150-69¹⁰ для изделий, поверхности которых подвергаются нагреву солнцем и имеют цвет отличный от белого или серебристо-белого, предельное рабочее значение температуры должно приниматься выше на 30 °С по сравнению с изделиями, которые не работают под прямым воздействием солнца. Данные требования также были учтены при проведении отдельной серии экспериментов на имитационных моделях.

Для обеспечения надежной работы автоматизированной точки коммерческого учета электроэнергии необходимо, чтобы её температура во всех режимах работы не превышала 155°С (при более высоких температурах начинается необратимая деградация материалов).

Результаты

Исследования теплового состояния АТКУЭ 6(10) кВ выполнялись в следующих режимах работы:

- 1) нормальный режим работы сети при номинальном напряжении на АТКУЭ (6/√3 и 10/√3 кВ);
- 2) нормальный режим работы сети при наибольшем рабочем напряжении на АТКУЭ (7,2/√3 и 12/√3 кВ);
- 3) устойчивое однофазное замыкание на землю – напряжение на АТКУЭ составляет 7,2 или 12 кВ;
- 4) дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю;
- 5) испытание изоляции АТКУЭ (20 кВ в течение 1 минуты – для номинального

¹⁰ ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды (с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5). Доступно по: <http://docs.cntd.ru/document/1200003320> Ссылка активна на 30 апреля 2020.

напряжения 6 кВ и при измерении частичных разрядов; 32 кВ в течение 1 минуты – для номинального напряжения 6 кВ и без измерений частичных разрядов; 28 кВ в течение 1 минуты – для номинального напряжения 10 кВ и при измерении частичных разрядов; 42 кВ в течение 1 минуты – для номинального напряжения 10 кВ и без измерений частичных разрядов).

В табл. 2 и 3 представлены результаты выполненных исследований теплового состояния АТКУЭ 6(10) кВ в указанных выше режимах при наличии и отсутствии инсоляции.

Таблица 2

Результаты исследования теплового состояния АТКУЭ 6(10) кВ на имитационной модели для условий эксплуатации

Режим	Максимальная температура резистивных элементов, °С					
	Без инсоляции		С инсоляцией		Требования ГОСТ 15150-69	
	R ₁	R ₂	R ₁	R ₂	R ₁	R ₂
Сеть с изолированной нейтралью, класс напряжения 6 кВ						
Номинальный режим, напряжение 6,0/√3 кВ	47,5	45,5	58,1	57,0	78,0	76,1
Номинальный режим, напряжение 7,2/√3 кВ	48,7	46,0	58,9	57,2	79,2	76,5
Устойчивое однофазное замыкание на землю, напряжение 7,2 кВ	56,1	48,7	64,0	58,9	86,7	79,2
Дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, номинальное напряжение сети 6 кВ, величина емкостного тока 24,2 А, теория Петерсона	84,3	58,9	85,8	66,2	115,3	89,5
Дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, номинальное напряжение сети 6 кВ, величина емкостного тока 24,2 А, теория Петерса и Слепяна	56,0	48,7	64,0	58,9	86,6	79,2
Дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, номинальное напряжение сети 6 кВ, величина емкостного тока 24,2 А, теория Белякова	56,2	48,7	64,1	58,9	86,8	79,3
Сеть с изолированной нейтралью, класс напряжения 10 кВ						
Номинальный режим, напряжение 10,0/√3 кВ	52,3	47,3	60,8	58,0	82,7	77,8
Номинальный режим, напряжение 12,0/√3 кВ	55,3	48,4	63,5	58,7	85,9	78,9
Устойчивое однофазное замыкание на землю, напряжение 12,0 кВ	74,5	55,3	77,9	63,5	105,2	85,9
Дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, номинальное напряжение сети 10 кВ, величина емкостного тока 20 А, теория Петерсона	157,7	84,8	144,0	86,2	188,9	115,68
Дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, номинальное напряжение сети 10 кВ, величина емкостного тока 20 А, теория Петерса и Слепяна	74,0	55,1	77,4	63,3	104,6	85,7
Дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, номинальное напряжение сети 10 кВ, величина емкостного тока 20 А, теория Белякова	66,1	52,3	71,5	61,4	96,6	82,8

Примечание 1. $R_2=3 \cdot R_1$.

Примечание 2. Величина емкостного тока выбрана в соответствии с требованиями ПУЭ для электрических сетей с изолированной нейтралью.

Таблица 3

Результаты исследования теплового состояния АТКУЭ 6(10) кВ на имитационной модели для условий лабораторных испытаний

Режим	Температура резистивных элементов, °C	
	R ₁	R ₂
Класс напряжения 6 кВ		
Испытание изоляции с измерением частичных разрядов, напряжение 20 кВ в течение 1 минуты	39,0	29,6
Испытание изоляции без измерения частичных разрядов, напряжение 32 кВ в течение 1 минуты	64,4	36,8
Класс напряжения 10 кВ		
Испытание изоляции с измерением частичных разрядов, напряжение 28 кВ в течение 1 минуты	52,3	34,1
Испытание изоляции без измерения частичных разрядов, напряжение 42 кВ в течение 1 минуты	92,9	45,5

Обсуждение

Анализ результатов выполненных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1) Конструкция АТКУЭ защищает первичный преобразователь напряжения на основе резистивного делителя от прямого воздействия солнечных лучей в период наибольшей суточной температуры воздуха (рис. 6, б). Прямое воздействие солнечных лучей на первичный преобразователь напряжения (рис. 6, а) происходит только в период температурного минимума окружающего воздуха (на восходе и закате Солнца). Данный вывод подтверждается сведениями, приведенными в работах [27, 28], где указано, что наибольшее значение температуры воздуха при ясной погоде фиксируется в период с 13 по 16 часов, когда поверхность почвы и расположенные на ней объекты достаточно прогреваются от Солнца, а температурный минимум наступает перед восходом Солнца, когда она наиболее охлаждена. Благодаря указанным обстоятельствам суточный график максимальной температуры резистивных элементов АТКУЭ является более равномерным по сравнению с максимальной температурой поверхностей АТКУЭ (рис. 7).

2) Максимальная температура резистивных элементов при отсутствии инсоляции наблюдается в период максимума температуры воздуха, а при наличии инсоляции – на восходе и закате Солнца.

3) Температура резистивных элементов при учете инсоляции в соответствии с требованиями ГОСТ 15150-69 путем увеличения температуры окружающего воздуха на 30 °C является значительно завышенной, а температура поверхностей АТКУЭ заниженной.

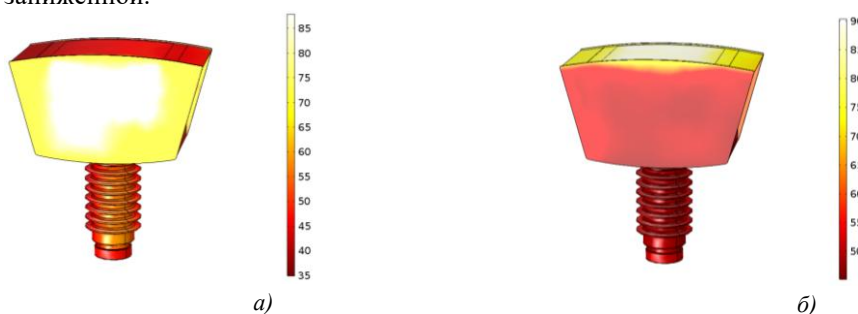


Рис. 6. Тепловое поле АТКУЭ при $U=10,0/\sqrt{3}$ кВ и $R=R_1$: а –6:00; б –15:00
Fig.6. ATCUE thermal field at $U=10,0/\sqrt{3}$ kV and $R=R_1$: а -6: 00; b -15:00

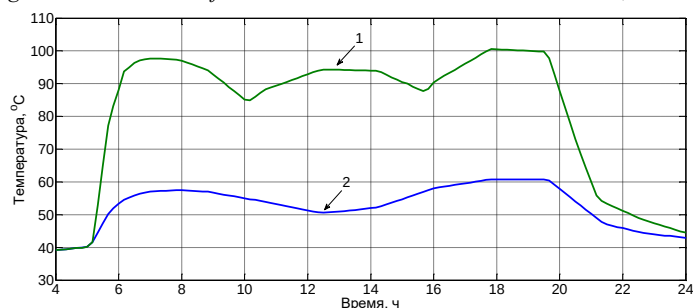


Рис. 7. Суточный график максимальной температуры поверхностей АТКУЭ (1) и резистивных элементов (2) при $U=10,0/\sqrt{3}$ кВ и $R=R_1$

Fig.7. Daily graph of the maximum surface temperature of ATCUS (1) and resistive elements (2) at $U=10,0/\sqrt{3}$ kV and $R=R_1$

Заключение

Результаты выполненных исследований показывают, что наибольший температурный градиент возникает при испытаниях высоковольтной изоляции, а наибольшую температуру резистивные элементы имеют при однофазных замыканиях на землю. В воздушных линиях электропередач процент дуговых замыканий достигает 80 % [29]. Наибольшее тепловыделение на резисторах происходит при ДПОЗЗ по теории Петерсона (примерно 1% от всех ДПОЗЗ). Известно, что емкостный ток в воздушных линиях электропередачи, ниже, чем в кабельных линиях [30], а, соответственно, и перенапряжения (тепловыделения на резисторах) при ДПОЗЗ в воздушных линиях также ниже по сравнению с полученными значениями (табл. 2). По мнению авторского коллектива, учитывая тот факт, что ДПОЗЗ по теории Петерса и Слепая, а также по теории Белякова наиболее распространены и тепловыделения при них совпадают с тепловыделениями при устойчивых ОЗЗ необходимо рассчитывать малогабаритные пункты коммерческого учета электроэнергии на длительный режим работы при последних из указанных повреждений. При этом расчет теплового состояния должен выполняться на имитационных моделях с учетом инсоляции и других факторов внешней среды.

Литература

1. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. Москва, 2012. 51 с. Доступно по: [https:// www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas). Ссылка активна на 22 октября 2020.
2. Концепция «Цифровая трансформация 2030». Москва, 2018 г. 31 с. Доступно по: https://www.rosseti.ru/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030. Ссылка активна на 22 октября 2020.
3. Colak I., Bayindir R, Sagioglu S. The Effects of the Smart Grid System on the National Grids. icSmartGrid: Proceedings of the conference 8th International Conference on Smart Grid; 17-19 June 2020; Paris, France; 2020.
4. Agalgaonkar Y.P., Hammerstrom D.J. Evaluation of Smart Grid Technologies Employed for System Reliability Improvement: Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Experience // IEEE Power and Energy Technology Systems Journal. 2017. V. 4. N2. pp. 24-31.
5. Bansal P., Singh A. Smart metering in smart grid framework: A review. PDGC: Proceedings of the conference Fourth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing; 22-24 Dec. 2016; Wanknaghat, India; 2017.
6. Грачева Е.И., Садыков Р.Р., Хуснутдинов Р.Р., Абдуллазянов Р.Э. Исследование параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов по эксплуатационным данным промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 10-18.
7. Васев А.Н., Мисбахов Р.Ш., Зиганшина А.И., Федотов В.В. Комбинированные системы сбора и передачи технологической и диагностической информации АСУТП электроустановок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 16-26.
8. Agalgaonkar Yashodhan P., Hammerstrom Donald J. Evaluation of Smart Grid Technologies Employed for System Reliability Improvement: Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Experience // IEEE Power and Energy Technology Systems Journal. 2017. V. 4. № 2. pp. 24-31.
9. Li Zhe, Dai Y., Wang Q., Dong X. Application of High-Voltage Electrical Energy Meter in Smart Grid. ICMCCE: Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering; 14-16 Sept. 2018; Huhhot, China; 2018.
10. Zhang A., Song S., Wang Ch., et al. Research of an integrated high-voltage energy metering device. CCC: Proceedings of the 36th Chinese Control Conference; 26-28 July 2017; Dalian, China; 2017.
11. Gebauer J., Podešva P., Fojtík D., Mahdal M. The Welding Current and Voltage Smart Sensor. ICCS: Proceedings of the conference 20th International Carpathian Control Conference; 26-29 May 2019; Krakow-Wieliczka, Poland; 2019.
12. Аль-Аомари О., Ваньков Ю.В., Костылева Е.Е., Валиев Р.Н. Методика обработки результатов тепловизионных обследований высоковольтного оборудования. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015; №11-12. С. 80-86.

13. Дмитриев А.В., Валиев И.И., Дмитриева О.С. Исследование работы термоэлектрического преобразователя в системе охлаждения энергетического оборудования. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015; № 11-12. с. 60-63.
14. Pengbo Yin, Zuoming Xu, Wei Hu, et al. Temperature Homogenization Technology of Current Carrying Conductor in the Valve Side Bushing of Converter Transformer Based on the Heat Pipe Theory. ICHVE: Proceedings of the IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application; 6-10 Sept. 2020; Beijing, China; 2020.
15. Xiaoling Yu, Zhiyuan Liu, Quanke Feng, et al. Research on a gravity heat pipe for high voltage vacuum interrupter. Proceedings of the 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum; 15-19 Sept. 2008; Bucharest, Romania; 2008.
16. Blumenfeld P.E., Prenger C., et al. High temperature superconducting current lead test facility with heat pipe intercepts// IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 1999. V. 9. № 2. pp. 527-530.
17. Kang B., Hou T., Bu Z., et al. High-voltage electrical energy meter with measurement chips floating at 10 kV potentials // IET Science, Measurement & Technology. 2016. V. 10. N3. pp. 159-166.
18. Xin Y., Mingshuai Ch., Xinyang Li, et al. Research of three-phase high-voltage energy metering device. CAC: Proceedings of the conference Chinese Automation Congress; 20-22 Oct. 2017; Jinan, China; 2018.
19. Журавлев А.А. Высоковольтный резистивный делитель на базе литого микропровода в стеклянной изоляции на рабочие напряжения 6-24 кВ переменного тока промышленной // Проблемы региональной энергетики. 2008. №3. С. 104-117.
20. Denicolai M., Hällström J. A Self-balanced, Liquid Resistive, High Impedance HV Divider. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering; 25-29 August 2005; Tsinghua University, Beijing, China; 2005. Paper J-05. Доступно по: <http://www.saunalahti.fi/dncmrc1/wprobe/wprobe.pdf>. Ссылка активна на 23 октября 2020.
21. Yongdong Li, Qing-da Meng, Po, Yang Zheyuan Zhao, et al. Analysis on the Influence Factors of Capacitor Voltage Transformer Dielectric Loss Measurement // Energy and Power Engineering. 2013. №5. pp. 1240-1242.
22. Воробьева Е.А. Совершенствование принципов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Иваново; 2018. Доступно по: http://ispu.ru/files/Avtoreferat_Vorobeia_E.A..pdf. Ссылка активна на 23 октября 2020.
23. Petersen W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss // ETZ. 1917. Н. 37, 38.
24. Peters I.E. Voltage Induced by Arcing Ground // Tr. AIEE. 1923. P. 478.
25. Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью // Электричество. 1957. № 5. С. 31–36.
26. Пыжов В.К., Смирнов Н.Н. Системы кондиционирования, вентиляции и отопления. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 528 с.
27. Погосян Х.П. Воздушная оболочка земли. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1962 291 с.
28. Шульгин А.М. Климат почвы и его регулирование. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1967. 302 с.
29. Горюнов В. Однофазное замыкание на землю. Можно ли решить проблему? // Новости электротехники. 2017. №2(104). Доступно по: <http://www.news.elteh.ru/arh/2017/104/04.php>. Ссылка активна на 23 октября 2020.
30. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. М: НТФ «Энергопрогресс», 2001. 104 с.

Авторы публикации

Готовкина Елена Евгеньевна – аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии, Ивановский государственный энергетический университет.

Яблоков Андрей Атанольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматического

управления электроэнергетическими системами (АУЭС) ИГЭУ; директор по науке и инновациям НПО «Цифровые измерительные трансформаторы».

Смирнов Николай Николаевич – старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики ИГЭУ.

Панащатенко Антон Витальевич – инженер НПО «ЦИТ».

Лебедев Владимир Дмитриевич – канд. техн. наук, заведующий АУЭС ИГЭУ; генеральный директор НПО «ЦИТ».

Добрягина Ольга Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры АУЭС ИГЭУ.

References

1. *Osnovnye polozheniya kontseptsii intellektual'noi energosistemy s aktivno-adaptivnoi set'yu*, Moscow, 2012. Available at: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas. Accessed to: 22 Oct 2020.
2. *Kontsepsiya "Tsifrovaya transformatsiya 2030"*, Moscow, 2018. Available at: https://www.rosseti.ru/Kontsepsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030. Accessed to: 22 Oct 2020.
3. Colak I, Bayindir R, Sagiroglu S. *The Effects of the Smart Grid System on the National Grids*. *icSmartGrid: Proceedings of the conference 8th International Conference on Smart Grid*; 17-19 June 2020; Paris, France; 2020. doi: 10.1109/icSmartGrid49881.2020.9144891
4. Agalgaonkar YP, Hammerstrom DJ. Evaluation of Smart Grid Technologies Employed for System Reliability Improvement: Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Experience. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*. 2017;4(2):24-31. doi: 10.1109/JPETS.2017.2683502
5. Bansal P, Singh A. *Smart metering in smart grid framework*. A review. PDGC: Proceedings of the conference Fourth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing; 22-24 Dec. 2016; Wanknaghat, India; 2017. doi: 10.1109/PDGC.2016.7913139
6. Gracheva EI, Sadykov RR, Khusnutdinov RR, et al. Investigation of the parameters of reliability of low voltage commutation devices on operating data of industrial enterprises. Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems. 2019;21:1-2:10-18. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-10-18.
7. Vasev AN, Misbakhov RSh, Ziganshina AI, et al. Combine communications optical network of scada of electric power station and substation. Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems. 2018;20(11):16-26. doi:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-16-26.
8. Agalgaonkar Yashodhan P, Hammerstrom Donald J. Evaluation of Smart Grid Technologies Employed for System Reliability Improvement: Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Experience. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*. 2017;4(2):24-31.
9. Li Zhe, Dai Y, Wang Q, et al. *Application of High-Voltage Electrical Energy Meter in Smart Grid*. ICMCCE: Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering; 14-16 Sept. 2018; Huhhot, China; 2018. doi: 10.1109/ICMCCE.2018.00028.
10. Zhang A, Song S., Wang Ch, et al. *Research of an integrated high-voltage energy metering device*. Proceedings of the 36th Chinese Control Conference; 26-28 July 2017; Dalian, China; 2017. doi: 10.23919/ChiCC.2017.8028551.
11. Gebauer J, Podešva P, Fojtík D, et al. *The Welding Current and Voltage Smart Sensor*. ICC: Proceedings of the conference 20th International Carpathian Control Conference; 26-29 May 2019; Krakow-Wieliczka, Poland; 2019. doi: 10.1109/CarpathianCC.2019.8766018.
12. Al-Aomari O, Vankov JV, Kostyleva EE, et al. Method of treatment results thermal imaging inspection of high voltage equipment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;11-12:80-86. doi: 10.30724/1998-9903-2015-0-11-12-80-86
13. Dmitriev AV, Valiev II, Dmitrieva OS. The study of thermoelectric converter in the

cooling system of the power equipment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;11-12:60-63. doi: 10.30724/1998-9903-2015-0-11-12-60-63.

14. Pengbo Yin, Zuoming Xu, Wei Hu, et al. *Temperature Homogenization Technology of Current Carrying Conductor in the Valve Side Bushing of Converter Transformer Based on the Heat Pipe Theory*. ICHVE: Proceedings of the IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application; 6-10 Sept. 2020; Beijing, China; 2020.

15. Xiaoling Yu, Zhiyuan Liu, Quanke Feng, et al. *Research on a gravity heat pipe for high voltage vacuum interrupter*. Proceedings of the 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum; 15-19 Sept. 2008; Bucharest, Romania; 2008.

16. Blumenfeld PE, Prenger C, et al. *High temperature superconducting current lead test facility with heat pipe intercepts*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 1999;9(2):527-530.

17. Kang B, Hou T, Bu Z, et al. High-voltage electrical energy meter with measurement chips floating at 10 kV potentials. *IET Science, Measurement & Technology*. 2016;10(3):159-166. doi: 10.1049/iet-smt.2014.0280.

18. Xin Y, Mingshuai Ch, Xinyang Li, et al. *Research of three-phase high-voltage energy metering device*. CAC: Proceedings of the conference Chinese Automation Congress; 20-22 Oct. 2017; Jinan, China; 2018. doi: 10.1109/CAC.2017.8243828

19. ZHuravlev AA. *Vysokovol'tnyj rezistivnyj delitel' na baze litogo mikroprovoda v steklyannoj izolyacii na rabochie napryazheniya 6-24 kV peremennogo toka promyshlennoj chastoty*. A.A. ZHuravlev, M.L. SHit, YU.I. Kolpaklvichb D.I. Kozhokaru, V.G. Klejmenov. Problemy regional'noj energetiki. 2008;3:104-117.

20. Denicolai M., Hällström J. *A Self-balanced, Liquid Resistive, High Impedance HV Divider*. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering; 25-29 August 2005; Tsinghua University, Beijing, China; 2005. Paper J-05. Available at: <http://www.saunalahti.fi/dncmrc1/wprobe/wprobe.pdf>. Accessed to: 23 Oct 2020.

21. Yongdong Li, Qing-da Meng, Po, Yang Zheyuan Zhao, et al. Analysis on the Influence Factors of Capacitor Voltage Transformer Dielectric Loss Measurement. *Energy and Power Engineering*. 2013;5:1240-1242.

22. Vorob'eva EA. *Sovershenstvovanie printsipov vypolneniya adaptivnykh tokovykh i admitansnykh zashchit ot zamykanii na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6-10 kV*. Ivanovo; 2018. Available at: http://ispu.ru/files/Avtoreferat_Vorobeia_E.A..pdf. Accessed: 23 Oct 2020.

23. Petersen W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. *ETZ*. 1917. H. 37, 38.

24. Peters IE. Voltage Induced by Arcing Ground. *Tr. AIEE*. 1923. P. 478.

25. Belyakov NN. *Investigation of overvoltage at arc earth faults in 6 and 10 kV networks with isolated neutral*. *Electricity*, 1957;5:31-36.

26. Pyzhov V.K., Smirnov N.N. *Sistemy konditsionirovaniya, ventilyatsii i otopleniya*. Moskva, Vologda: Infra-Inzheneriya, 2019. P. 528.

27. Pogosyan Kh.P. *Vozdushnaya obolochka zemli*. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1962. P. 291.

28. Shul'gin A.M. *Klimat pochvy i ego regulirovanie*. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1967. P. 302.

29. Goryunov V. *Odnofaznoe zamykanie na zemlyu. Mozhno li reshit' problemu?* *Novosti elektrotehniki*. 2017. № 2 (104). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2017/104/04.php>. Accessed to: 22 Oct 2020.

30. Shuin V.A. *Zashchity ot zamykanii na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV*. M: NTF «Energoprogress», 2001. P. 104.

Authors of the publication

Elena E. Gotovkina – Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia.

Andrey A. Yablokov – Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia; Research and Production Association "Digital Measurement Transformers".

Nikolay N. Smirnov – Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia.

© Е.Е. Готовкина, А.А. Яблоков, Н.Н. Смирнов, А.В. Панащатенко, В.Д. Лебедев, О.А. Добрягина

Anton V. Panashatenko – RPA «DMS» Ivanovo, Russia.

Vladimir D. Lebedev – Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia; RPA «DMS» Ivanovo, Russia.

Olga A. Dobryagina – Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia.

Получено

17 февраля 2021г.

Отредактировано

03 марта 2021г.

Принято

04 марта 2021г.