

Том 27, №3, 2021



Материаловедение. Энергетика

Санкт-Петербург

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА MATERIALS SCIENCE. POWER ENGINEERING

(ранее «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки»)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., главный редактор, научный руководитель
СПбПУ, академик РАН

Александров М.Л., член-корр. РАН

Згуровский М.З., ин. член РАН, академик НАН Украины

Клименко А.В., академик РАН

Костюк В.В., академик РАН

Лагарьков А.Н., академик РАН

Окрепилов В.В., академик РАН

Рудской А.И., академик РАН

Саркисов А.А., академик РАН

Федоров М.П., академик РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., главный редактор, научный руководитель
СПбПУ, академик РАН

Кондратьев С.Ю., зам. главного редактора, д-р техн. наук,
профессор СПбПУ

Аксёнов Л.Б., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Башкарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Боровков А.И., к.т.н., проректор по цифровой трансформации
СПбПУ

Гордеев С.К., д-р техн. наук, ст. научн. сотр. ЦНИИМ

Забонин В.Н., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Каляев И.А., д-р техн. наук, академик РАН

Колсун Михал, профессор Технического университета
г. Кошице (Словакия)

Кириллов А.И., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Коровкин Н.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Митяков А.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Михайлов В.Г., д-р техн. наук, профессор Бранденбургского
ТУ (Германия)

Райчик Ярослав, д-р техн. наук, профессор Ченстоховского
политехнического университета (Польша)

Рамасуббу С., PhD, Директор по исследованиям BISS,
ITW-India (P) Ltd (Индия)

Сергеев В.В., д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый
проректор СПбПУ

Тендлер М.Б., ин. член РАН, KTH Royal Institute
of Technology (Швеция)

Титков В.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Толочко О.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Фокин Г.А., д-р техн. наук, генеральный директор
ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»

Цеменко В.Н., д-р техн. наук, зав. каф. СПбПУ

EDITORIAL COUNCIL

Vasiliev Yu.S. — head of the editorial council, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

Aleksandrov M.L. — corresponding member of the Russian Academy of Sciences
Zgurovskiy M.Z. — foreign member of the Russian Academy of Sciences, full member of the National Academy of Sciences of Ukraine

Klimenko A.V. — full member of the Russian Academy of Sciences

Kostiuk V.V. — full member of the Russian Academy of Sciences

Lagar'kov A.N. — full member of the Russian Academy of Sciences

Okrepilov V.A. — full member of the Russian Academy of Sciences

Rudskoy A.I. — full member of the Russian Academy of Sciences

Sarkisov A.A. — full member of the Russian Academy of Sciences

Fedorov M.P. — full member of the Russian Academy of Sciences

EDITORIAL BOARD

Vasiliev Yu.S. — editor-in-chief, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Kondrat'ev S.Yu. — deputy editor-in-chief, Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Aksenov L.B. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Bashkarev A.Ya. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Borovkov A.I. — PhD in Technical Sciences, Vice Rector for Digital Transformation

Gordeev S.K. — Doctor of Technical Sciences, prof. CNIIM

Zaboin B.N. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Kayaev I.A. — full member of the Russian Academy of Sciences

Kolcun Michal — Ph.D., Technical University of Kosice (Slovak Republic)

Kirillov A.I. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Korovkin N.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Mityakov A.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Michailov V.G. — Doctor of Technical Sciences, prof. BTU (Germania)

Raychik Ya. — Doctor of Technical Sciences, prof. Czestochova Polytechnic University (Poland)

Ramasubbu S. — PhD, Lifetime Fellow, Indian Academy of Science, Research Director BISS, ITW-India (P) Ltd (India)

Sergeev V.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU, corresponding member of the RAS

Tendler M.B. — foreign member of the Russian Academy of Sciences, KTH Royal Institute of Technology (Sweden)

Titkov V.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Tolochko O.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Fokin G.A. — Doctor of Technical Sciences, General Director of LLC «Gazprom Transgaz St. Petersburg»

Tsemenko V.N. — Doctor of Technical Sciences, Head of Chair SPbPU

Журнал «Материаловедение. Энергетика» (ранее «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки») с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory», в базах данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), Google Scholar, EBSCO, ProQuest, ROAD, Index Copernicus, CNKI, RSCI (WoS).

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство Эл № ФС 77-78004 от 27.03.2020 г.)

С 2005 года журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Научной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibrary.ru>

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции (812) 294-22-86.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021

Содержание

Энергетика. Электротехника

Титков В.В., Кольчев А.В., Гулов А.М. Влияние грозозащитного троса на магнитную составляющую индуктированных перенапряжений воздушных линий электропередачи.....	5
Астафьев Г.С., Волошин К.В., Титков В.В. Повышение характеристик электростатической системы питания перманентной световой маркировки воздушных линий электропередачи....	17
Кривошеев С.И., Колодкин И.С., Магазинов С.Г., Очковская Ю.К., Резникова А.Д. Моделирование волновых процессов в вертикальном заземлителе при грозовом воздействии.....	27
Колобов В.В., Баранник М.Б., Ивонин В.В. Опыт эксплуатации устройств регистрации импульсных токов в нелинейных ограничителях перенапряжений.....	39
Высогорец С.П., Редькин С.М., Житенев М.В. Поиск современных инженерных решений автоматического управления техническим состоянием изоляции трансформаторов.....	50
Поляков В.С. Онлайн диагностика активной части силовых трансформаторов.....	63
Таджибаев А.И., Яровой В.С., Гаюров Л.Ш., Коркин Л.М. Комплексное использование волновых процессов для оценки состояния подшипниковых узлов.....	77
Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А., Мушников А.Н. Особенности поведения магнитных характеристик образцов из низколегированной конструкционной стали при упругом деформировании после предварительного циклического нагружения.....	86
Монастырский А.Е. Современные системы мониторинга технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов.....	97

Металлургия и материаловедение

Махмутов Т.Ю., Разумов Н.Г., Попович А.А. Разработка способа синтеза однофазных высокоэнтропийных керамических материалов с высокой степенью химической однородности на примере эквиатомного высокоэнтропийного карбида (TiZrHfTaNb)C.....	109
Рогожкин В.В., Горынин В.И., Кондратьев С.Ю., Мишин Е.Б., Коленов Е.В., Шеволдин А.В. Кулер против перегрева Европы.....	120
Стрельникова А.А., Скотникова М.А. Исследование влияния высокотемпературной деформации на свойства α - и β -фаз титанового сплава.....	134

Contents

Energetics. Electrical engineering

Titkov V.V., Kolychev A.V., Gulov A.M. The effect of a grounded wire on the magnetic component of induced overvoltages of overhead transmission power lines.....	5
Astafiev G.S., Voloshin K.V., Titkov V.V. Improving the characteristics of electrostatic power supply system of permanent light marking of overhead power lines.....	17
Krivosheev S.I., Kolodkin I.S., Magazinov S.G., Ochkovskaya J.K., Reznikova A.D. Wave processes modeling in the vertical grounding electrode under lightning impact.....	27
Kolobov V.V., Barannik M.B., Ivonin V.V. Experience of operating a condition monitoring system for metal-oxide surge arresters.....	39
Vysogorets V.S., Redkin R.S., Zhitenev Z.M. Search of modern engineering solutions for automatic control of transformer insulation technical state.....	50
Poliakov V.S. Online diagnostics of the active part of power transformers.....	63
Tadzhibaev A.I., Draganchev H., Yarovoy V.S., Gayurov L., Korkin L.M. Forecasting of the technical condition of rolling bearings based on vibration analysis.....	77
Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Mushnikov A.N. Peculiarities of magnetic behavior of low-alloy structural steel specimens under elastic deformation after preliminary cyclic loading.....	86
Monastyrskiy A.E. Modern systems for monitoring the technical condition of power oil-filled transformers.....	97

Metallurgy and Materials

Makhmutov T.Y., Razumov N.G., Popovich A.A. Development of synthesis method for singlephase high-entropy ceramic materials with a high degree of chemical homogeneity on the example of equiatomic high-entropy carbide (TiZrHfTaNb)C.....	109
Rogozhkin V.V., Gorynin V.I., Kondatyev S.Yu., Mishin E.B., Kolenov E.V., Shevoldin A.V. Cooler against overheating of Europe.....	120
Strelnikova A.A., Skotnikova M.A. Investigation of the effect of high-temperature deformation on the properties of the α - and β -phases of titanium alloy.....	134

ВЛИЯНИЕ ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА НА МАГНИТНУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ ИНДУКТИРОВАННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В электрических сетях Российской Федерации большее внимание стало уделяется надежной эксплуатации распределительных сетей напряжением 6–35 кВ. На эксплуатацию распределительных ВЛ 6–35 кВ оказывают существенное влияние молниевые перенапряжения, связанные с прямым ударом молнии в линию, и индуцированные перенапряжения, при ударах молнии в землю вблизи ВЛ. Воздействующие на ВЛ 6–35 кВ молниевые перенапряжения приводят к повышению аварийности ВЛ при эксплуатации из-за относительно невысокой импульсной электрической прочности линейной изоляции линий. Применение тросовой защиты на ВЛ 6–35 для защиты от молниевых перенапряжений ВЛ в РФ не рассматривается. Как показывают расчеты установка заземленного троса на ВЛ за счет коэффициентов связи троса с проводом снижает величину индуцированных перенапряжений. Представлена математическая модель расчета электромагнитной составляющей индуцированного перенапряжения на основе подхода, использующего волновое уравнение линии с распределенным по ее длине источником напряжения, создаваемым индуцируемой током молнии ЭДС при наличии заземленного троса на линиях электропередачи 35 кВ. Исследованы вопросы индуцированных перенапряжений, возникающих при повторных разрядах молнии, которые могут приводить к большим амплитудам магнитной индуцированной компоненты перенапряжений по сравнению с главным разрядом тока молнии. Электростатическая компонента индуцированных перенапряжений при повторных разрядах молнии имеет меньшие значения, так как разряд происходит по частично ионизованному каналу, в условиях которого лидерная стадия разряда характеризуется меньшими напряженностями электрического поля. Показано, что наличие троса на ВЛ 35 кВ с распределенной проводимостью приводит к появлению потенциала на тросе, при этом величина потенциала на тросе при крутых фронтах тока молнии близка к 50% от величины магнитной составляющей индуцированного напряжения на фазном проводе.

Ключевые слова: индуцированные перенапряжения; магнитная компонента перенапряжения; повторные удары молнии; воздушные линии с тросом; молниезащита.

Ссылка при цитировании:

Титков В.В., Колычев А.В., Гулов А.М. Влияние грозозащитного троса на магнитную составляющую индуцированных перенапряжений воздушных линий электропередачи // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 5–16. DOI: 10.18721/JEST.27301

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

V.V. Titkov, A.V. Kolychev, A.M. Gulov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

THE EFFECT OF A GROUNDED WIRE ON THE MAGNETIC COMPONENT OF INDUCED OVERVOLTAGES OF OVERHEAD TRANSMISSION POWER LINES

In the electric grids of the Russian Federation, the reliable operation of distribution grids with a voltage of 6–35 kV is attracting more and more attention. Their operation is under significant influence of lightning overvoltages associated with a direct lightning strike into the line, and induced overvoltages when lightning strikes the ground near the overhead line. The lightning overvoltages affecting the 6–35 kV overhead lines lead to an increase in their accident rate during operation due to the relatively low impulse electric strength of the linear insulation of the lines. Cable protection against lightning overvoltages is not used for the 6–35 kV overhead lines in the Russian Federation. As calculations show, the installation of a grounded cable on overhead lines due to the coefficients of the connection between the cable and the wire reduces the magnitude of the induced overvoltages. The paper presents a mathematical model for calculating the electromagnetic component of an induced overvoltage based on an approach that uses the wave equation of a line with a voltage source distributed along its length, created by an EMF induced by lightning current in the presence of a grounded wire on 35 kV power lines. The issues of inductive overvoltage arising during repeated lightning discharges, which can lead to large amplitudes of the magnetic inductive component of overvoltages in comparison with the main discharge of the lightning current, are investigated. The electrostatic component of induced overvoltages has lower values during repeated lightning discharges, since the discharge occurs through a partially ionized channel, in which the leader stage of the discharge is characterized by lower electric field strengths. It is shown that the use of a grounded wire with distributed conductivity on a 35 kV overhead line causes a potential on the wire, which at steep fronts of the lightning current is close to 50% of the value of the magnetic component of the induced voltage on the phase wire.

Keywords: Induced overvoltage, magnetic component of overvoltage, repeated return lightning strikes, overhead line with grounded wire; lightning protection.

Citation:

V.V. Titkov, A.V. Kolychev, A.M. Gulov, The effect of a grounded wire on the magnetic component of induced overvoltages of overhead transmission power lines, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (03) (2021) 5–16, DOI: 10.18721/JEST.27301

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Одной из основных причин аварий воздушных ЛЭП является поражение молнией [1–4]. Наряду со случаями прямых ударов молнии в элементы конструкции воздушной линии опасные перенапряжения на линиях классов 6–35 кВ возникают при ударе молнии в землю вблизи линии [3–7]. Данные перенапряжения носят название индуктированных, а их физическая природа связана с двумя факторами. Первый из них это электростатическое воздействие канала разряда молнии на провода линии на стадии своего формирования, когда он представляет собой заряженную плазму. Второй фактор бесконтактного воздействия молнии на провод ЛЭП – магнитная связь провода с током молнии. Последний достигает наибольших значений в результате формирования обратного разряда и перехода канала молнии в плазменное состояние с относительно высокой электропроводностью [8]. При этом амплитуда тока первого молниевых импульса может достигать 200 кА, а время нарастания до максимума имеет порядок 10 мкс.

Согласно ПУЭ [9] трос используется на ВЛ 35 кВ на подходе к ПС в рамках молниезащиты подстанций. Во многих странах на ВЛ распределительного класса (11 кВ, 20 кВ, 24 кВ, 33 кВ) широко применяется тросовая защита. Применение заземленных тросов на распределительных воздушных линиях среднего класса напряжения не очень эффективно из-за низкой импульсной прочности линейной изоляции. С другой стороны, применение заземленного троса может существенно снизить амплитуду воздействующих индуктированных перенапряжений на линейную изоляцию ВЛ.

Для защиты ВЛ от индуктированных перенапряжений в последнее время нашли широкое применение защитные аппараты – нелинейные ограничители перенапряжения [10–15]. Использование защитных тросов и ограничителей перенапряжения описано в стандарте IEEE Std. 1410–1997 [16]. На рис. 1 представлена зависимость, показывающая эффект ослабления заземленного

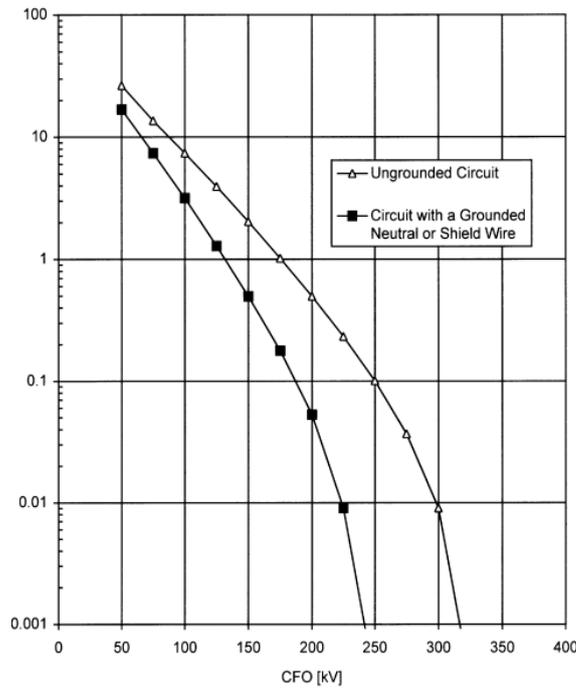


Рис. 1. Число перенапряжений с амплитудой, превышающей импульсную прочность изоляции, $U_{50\%}$ на 1/100 км в год при учете заземленного проводника

Fig. 1. The number of overvoltages with an amplitude exceeding the impulse insulation strength, $U_{50\%}$ per 1/100 km per year when taking into account the grounded wire

проводника, рассчитанная с использованием упрощенной формулы «коэффициента экранирования», предложенной Раском, которая, в общем случае дает завышенную оценку соответствующего эффекта уменьшения наведенных напряжений фазного проводника.

Численные модели расчета индуцированных перенапряжений

Для численной оценки амплитуды индуцированного напряжения на проводах линии при наличии заземленного троса в руководствах предлагается использовать формулу вида [3, 4]:

$$U_{инд[B]} = \frac{h_{cp}}{b} I_M \cdot (1 - k_{т.пр}) \cdot k_{э} + k_m \cdot \frac{h_{cp}}{b} \cdot I_M \quad (1)$$

Для линий без троса:

$$U_{инд[B]} = (k_m + k_э) I_M \frac{h_{cp}}{b} \cong 30 I_{M[A]} \frac{h_{cp}}{b}, \quad (2)$$

где I_M – амплитуда тока молнии, h_{cp} – средняя высота подвеса провода, b – расстояние от места удара молнии до проекции провода на горизонтальную поверхность земли (рис. 2), k_m – коэффициент магнитной связи, $k_э$ – коэффициент электростатической связи, $k_{т.пр}$ – коэффициент связи троса и провода. Очевидно, что (1) и (2) являются эмпирическими формулами и не имеет ясной связи с физической природой явления. В частности, электростатическая компонента, описываемая в рамках (2), зависит от амплитуды тока молнии, в то время как на стадии разряда, при котором электростатическое влияние существенно (лидерная фаза) ток по каналу

разряда составляет десятки, максимум сотни ампер, а не килоампер, как на главной стадии [7]. Также явное несоответствие физике явления имеет место и в «магнитной» компоненте, которая согласно (1), (2), пропорциональна амплитуде тока молнии, в то время как величина индуктируемого на проводе напряжения в соответствии с законом Фарадея пропорциональна скорости измерения тока молнии dI/dt . При этом, если в рамках эмпирического подхода формула (1) может оставаться приемлемой при оценке электростатической компоненты индуктированного перенапряжения, то оценка магнитной составляющей с помощью (1) и (2) вызывает сомнение. Очевидность данного предположения имеет место при оценке индуктированных перенапряжений, вызываемых повторными ударами молнии, которые следуют с интервалами, измеряемыми десятками долями секунды после первого разряда [5]. Особенностью токовых импульсов повторных разрядов является меньшие в 2-3 раза амплитуды и на порядок меньшее (около 1 мкс) время нарастания (рис. 3 [5]), что приводит к существенному росту dI/dt и соответствующему росту амплитуды перенапряжения. Поэтому, по крайней мере к повторным разрядам молнии, оценку (2) нельзя считать применимой.

В рамках данной работы предпринимается попытка теоретической оценки магнитной составляющей индуктированного перенапряжения, вызываемого молнией при учете заземленного троса.

Полная ЭДС взаимной индукции, возбуждаемая в петле провод-грунт (рис. 2) вследствие магнитной связи с расположенном в точке $x = 0$ каналом разряда, равна нулю вследствие антисимметричного направления нормальной к плоскости петли компоненты вектора напряженности магнитного поля канала разряда в произвольных точках x и $-x$ бесконечного провода. Поэтому в обозначениях рис. 2 в проводе при $x > 0$ и $x < 0$ возникают равные и противоположные по знаку распределенные (в расчете на единицу длины линии [В/м]) ЭДС $E(x)$.

Точные оценки электромагнитной составляющей индуктированного перенапряжения могут быть сделаны на основе предложенного в свое время А.И. Долгиновым [4] подхода, использующего волновое уравнение линии с распределенным по ее длине источником напряжения, созда-

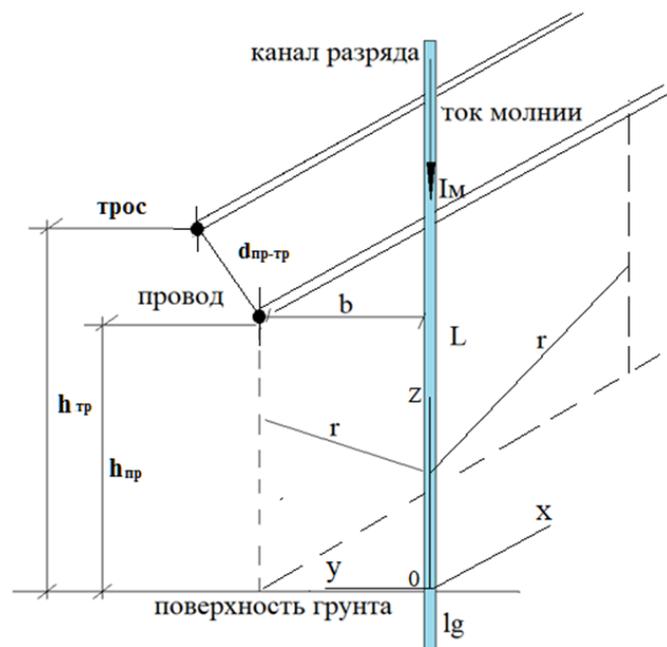


Рис. 2. К расчетной модели магнитной составляющей индуктированного перенапряжения
 Fig. 2. The design model of the magnetic component of the induced overvoltage

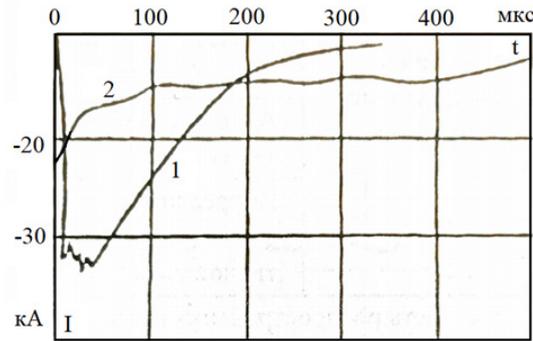


Рис. 3. Типичная осциллограмма импульса тока первой (1) и последующих (2) составляющих многократного разряда молнии отрицательной полярности
 Fig. 3. Typical oscillogram of a current pulse of the first (1) and subsequent (2) components of a multiple discharge of lightning of negative polarity

ваемым индуктируемой током молнии ЭДС на проводе (1) и тросе (2). Ниже представлена система телеграфных уравнений для двух связанных емкостной и индуктивной связью проводов (верхняя фаза – грозотрос):

$$-\frac{\partial i_1}{\partial x} = C'_{11} \frac{\partial u_1}{\partial t} + C'_{12} \frac{\partial (u_1 - u_2)}{\partial t} + g'_{11} u_1 + g'_{12} u_2, \quad (3)$$

$$-\frac{\partial i_2}{\partial x} = C'_{12} \frac{\partial u_1}{\partial t} + C'_{22} \frac{\partial (u_2 - u_1)}{\partial t} + g'_{12} u_1 + g'_{22} u_2, \quad (4)$$

$$-\frac{\partial u_1}{\partial x} = L'_{11} \frac{\partial i_1}{\partial t} + L'_{12} \frac{\partial i_2}{\partial t} + R'_1 i_1 - E'_1(x), \quad (5)$$

$$-\frac{\partial u_2}{\partial x} = L'_{12} \frac{\partial i_1}{\partial t} + L'_{22} \frac{\partial i_2}{\partial t} + R'_2 i_2 - E'_2(x), \quad (6)$$

$$E'_1(x) \approx E'_2(x), \quad (7)$$

где C', g', L', R' – погонные параметры линии: емкость, проводимость утечки, индуктивность и резистивное сопротивление соответственно, $u = u(x, t)$, $i = i(x, t)$ – напряжения и ток линии в точке x в момент времени t ,

$$E'(x) = \frac{\mu_0 I' h x}{4\pi} \frac{\left(L + \sqrt{L^2 + b^2 + x^2} \right) \sqrt{L^2 + b^2 + x^2} - \left(\sqrt{l_g^2 + b^2 + x^2} - l_g \right) \sqrt{l_g^2 + b^2 + x^2}}{\left(L + \sqrt{L^2 + b^2 + x^2} \right) \left(\sqrt{l_g^2 + b^2 + x^2} - l_g \right) \sqrt{l_g^2 + b^2 + x^2} \sqrt{L^2 + b^2 + x^2}}$$

– индуктируемая в проводе ЭДС в расчете на единицу длины; индексом 1 отмечены параметры фазного провода, индексом 2 параметры троса, а индексом 12 взаимные параметры провода и троса.

В качестве примера рассмотрим одноцепную ВЛ 35 кВ на опорах ПБ35-1 (рис. 4). В расчетах будет рассмотрена пара проводов – верхний провод АС 120/19 (высота подвеса 18,5 м) и грозотрос ТК-35 (высота подвеса 20,5 м).

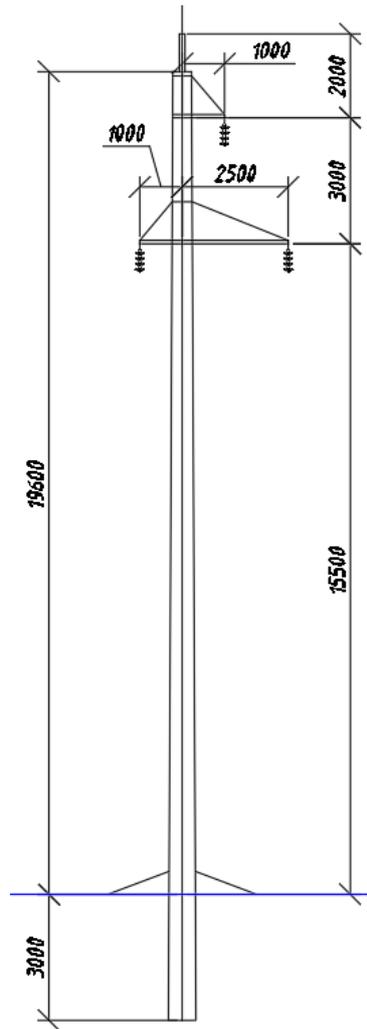


Рис. 4. Эскиз опоры ПБ35-1

Fig. 4. Line tower PB35-1

Необходимо добавить способ учета точек заземления грозотроса. Для этого используется зависимость проводимости утечки для грозотроса от координаты, показанная на рис. 5 при длине пролета 150 м.

В модели COMSOL это глобально определенная функция:

$$cabwave(x) = G_s + G_{gr} \cdot linwave(x)^{22},$$

где G_s – нормальная проводимость утечки (при отсутствии дефектов и загрязнения изоляторов равная нулю) G_{gr} [См/м] – усредненная по линейному размеру фундамента опоры (расстояние между сваями) проводимость ее заземления, $linwave(x)$ – линейно-треугольная периодическая функция с периодом равным удвоенной длине пролета.

Высокая четная степень (в нашем случае 22) позволяет регулировать длину зоны влияния точки заземления троса на величину погонной проводимости утечки вблизи опоры.

Поскольку индуцируемая ЭДС пропорциональна скорости изменения тока молнии, то в простейшем модельном расчете импульс тока молнии можно описать косоугольной формой, исходя из заданных значений времени нарастания τ_f и спада τ_{bf} и амплитуды тока молнии.

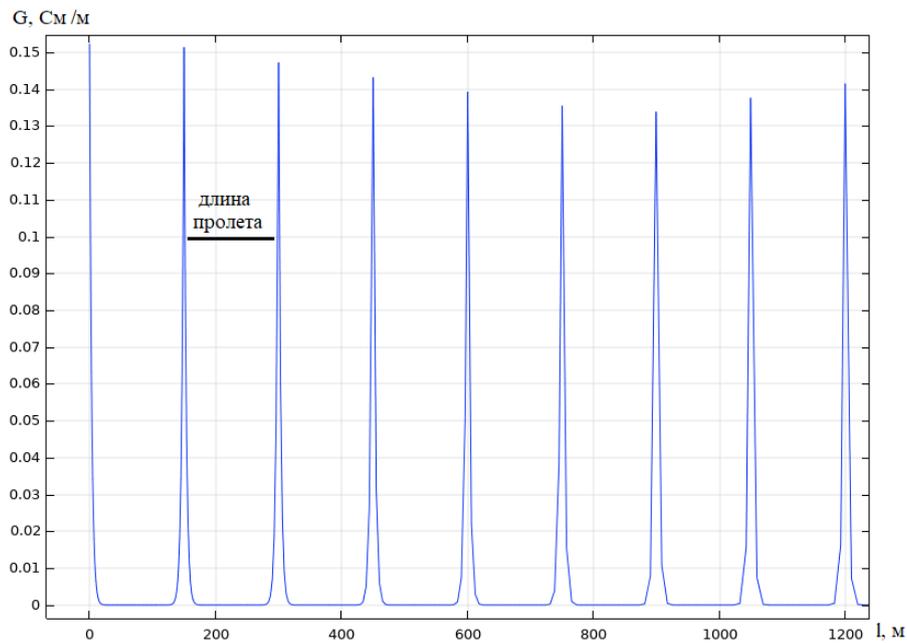


Рис. 5. Зависимость проводимости утечки для грозотроса от координаты
 Fig. 5. Dependence of the leakage conductivity for the ground wire on the coordinate

Результаты

Результаты расчета системы волновых уравнений (3) для системы фаза – трос для индуктируемого воздействия с учетом конечной зоны охвата провода индуктируемой ЭДС вследствие конечной скорости распространения электромагнитной волны, создаваемой каналом молнии, приведены на рис. 6 провода и рис. 7 для заземленного троса для случая первичного импульса молнии ($\tau_f = 10$ мкс, $\tau_{bf} = 100$ мкс, $I_m = 100$ кА, $h = 18,5$ м, $b = b_{\min} = 60$ м).

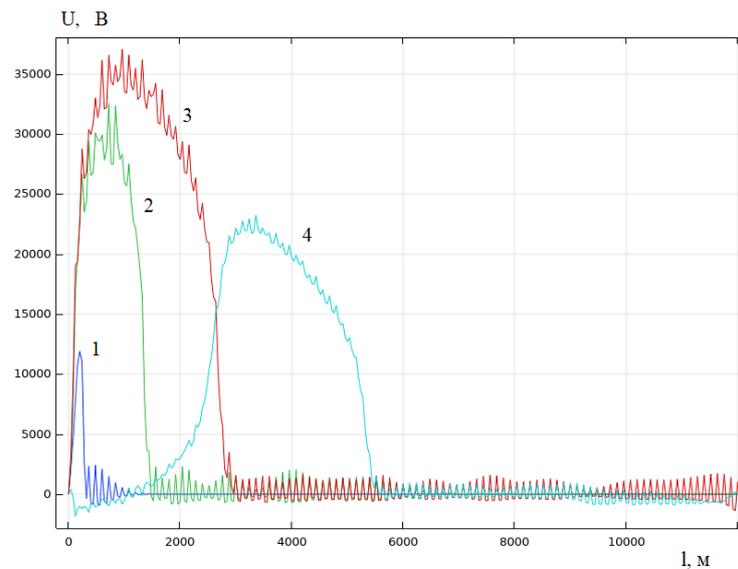


Рис. 6. Распределение индуктированного напряжения вдоль провода
 в моменты времени 1 мкс (1), 5 мкс (2), 10 мкс (3), 20 мкс (4)
 Fig. 6. Distribution of the induced voltage along the wire at times of 1 μ s (1), 5 μ s (2), 10 μ s (3), 20 μ s (4)

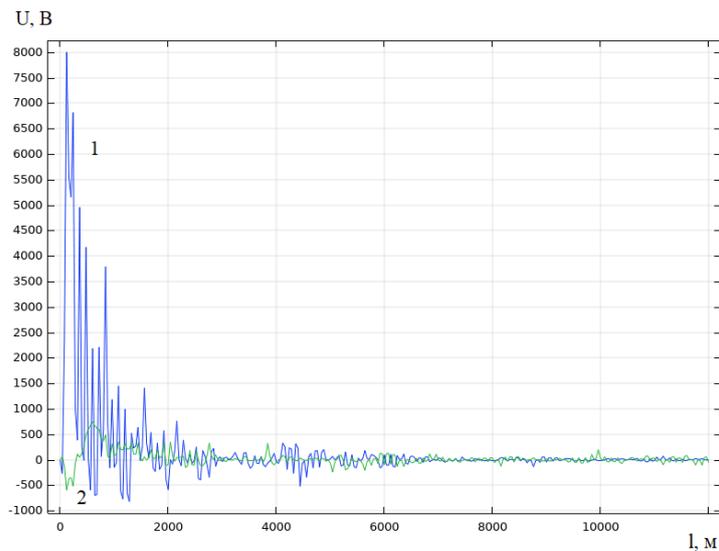


Рис. 7. Распределение индуктированного напряжения вдоль грозотроса в моменты времени 10 мкс (1), 20 мкс (2)
 Fig. 7. Distribution of the induced voltage along the ground wire at times of 10 μ s (1), 20 μ s (2)

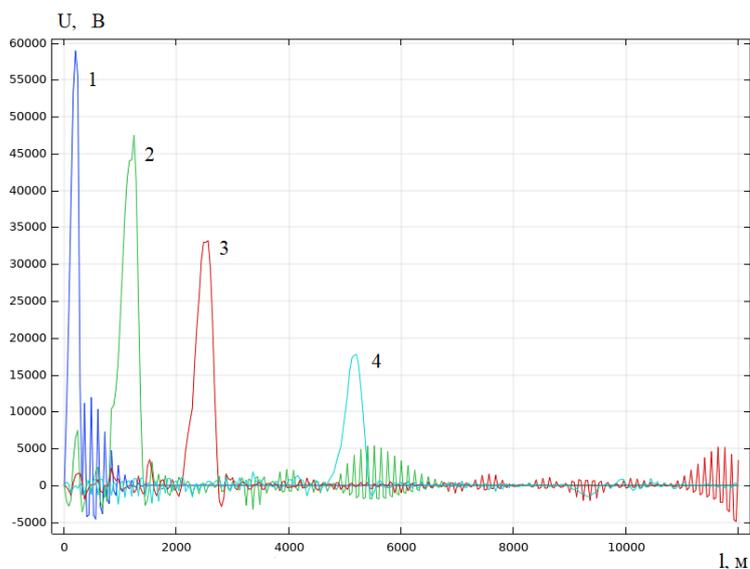


Рис. 8. Распределение индуктированного повторным ударом молнии напряжения вдоль провода в моменты времени 1 мкс (1), 5 мкс (2), 10 мкс (3), 20 мкс (4)
 Fig. 8. Distribution of the induced voltage along the wire at times of 1 μ s (1), 5 μ s (2), 10 μ s (3), 20 μ s (4) with repeated lightning strikes

Из рис. 6 и рис. 7 следует, что амплитуда магнитной составляющей индуктированного напряжения на проводе составляет 36 кВ и 8 кВ на тросе. При удалении места удара молнии в два раза ($b = 120$ м) получим амплитуды напряжения: 24 кВ на проводе и 1,9 кВ на тросе; при $b = 180$ м: 18 кВ и 1,8 кВ соответственно.

Магнитная составляющая индуктированных перенапряжений, вызванная повторным ударом молнии с характерными параметрами $\tau_f = 1$ мкс, $\tau_{bf} = 500$ мкс, $I_m = 50$ кА для аналогичных прочих условий составляет 60 кВ на проводе (рис. 8) и 28 кВ на тросе (рис. 9).

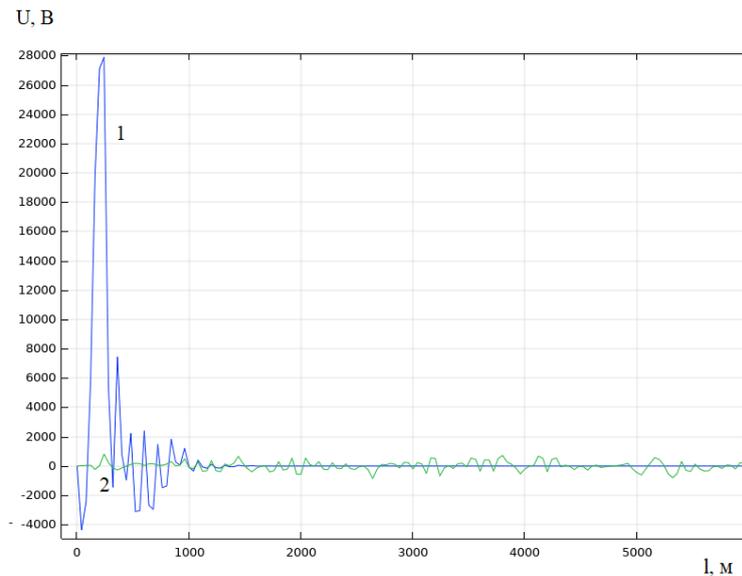


Рис. 9. Распределение индуцированного повторным ударом молнии напряжения вдоль грозотроса в моменты времени 1 мкс (1), 20 мкс (2)

Fig. 9. Distribution of the induced voltage along the ground wire at times of 1 μ s (1), 20 μ s (2) with repeated lightning strikes

При удалении места удара молнии в два раза ($b = 120$ м) амплитуды индуцированного напряжения: 21 кВ на проводе и 14 кВ на тросе; при $b = 180$ м: 6 кВ и 4,5 кВ соответственно.

Как видно из рис. 6, длина участка линии охваченного наиболее опасными перенапряжениями с учетом антисимметричной отрицательной волны, распространяющейся в области $x < 0$ составляет несколько километров. При этом при тех же условиях индуцированное напряжение на тросе охватывает меньшие по длине участки линии (рис. 7).

Наличие троса с учетом распределения его проводимости утечки вдоль пролета приводит при ударах молнии к появлению потенциала на тросе. При амплитуде тока молнии $I_m = 100$ кА величина напряжения на тросе может составлять 22% от индуцированного напряжения на проводе. При увеличении расстояния (более 120 м, $6 \times 3 h_{тр}$) величина напряжения на тросе уменьшается и составляет менее 10% от $U_{инд.пр}$. При воздействии разрядов молнии с крутыми фронтами вызванная повторным ударами молнии с характерными параметрами $\tau_f = 1$ мкс, $\tau_{bf} = 100$ мкс, $I_m = 50$ кА величина индуцированного напряжения на тросе может составлять 47% от индуцированного напряжения на проводе.

Выводы

Важными практическими выводами в отношении магнитной компоненты индуцированного молнией на проводе и тросе ВЛ напряжения, которые можно сделать на основе данного исследования являются:

- влияние удаления точки удара молнии от воздушной линии существенно слабее, чем предсказывает оценочная формула (1), поэтому для линий класса 6-10 кВ, обладающих относительно невысоким запасом импульсной электрической прочности, индуцированные перенапряжения представляют существенный фактор, повышающий аварийность;
- поскольку грозотрос заземляется лишь в отдельных точках, расположенных на опорах линии, то импульс тока молнии вызывает на нем появление электрического потенциала в пролетах;
- появление в зоне удара молнии высоких потенциалов на тросе, снижает разность потенциалов, воздействующих на линейную изоляцию воздушной линии;

– повторные удары могут приводить кратно большим амплитудам магнитной индуктированной компоненты перенапряжения по сравнению с главным импульсом тока молнии.

Таким образом применение грозозащитного троса на ВЛ 6-35 кВ может существенно уменьшить число аварийных отключений ВЛ из-за индуктированных перенапряжений на линиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Халилов Ф.Х., Титков В.В. Перенапряжения и молниезащита. М: Лань, 2016. 224 с.
- [2] Гумерова Н.И., Колычев А.В., Халилов Ф.Х. Молниезащита электрических сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения. СПб: Издательство Политехнического университета, 2011. 369 с.
- [3] Разевиг Д.В. Техника высоких напряжений. М: Энергия, 1976. 488 с.
- [4] Разевиг Д.В. Техника высоких напряжений. М: ГЭИ, 1963. 473 с.
- [5] Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений РД 153-34.3-35.125-99. СПб: , 1999.
- [6] Кучинский Г.С. Техника высоких напряжений. СПб: Энергоатомиздат, 2003. 608 с.
- [7] Базуткин В.В., Кадомская К.П., Костенко М.В., Михайлов Ю.А. Перенапряжения в электрических системах и защита от них. СПб: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
- [8] Верещагин И.П. Электрофизические основы техники высоких напряжений. М: Издательский дом МЭИ, 2010. 704 с.
- [9] Правила устройства электроустановок. 7-ое издание, переработанное и дополненное. М: 2003.
- [10] Gu S., Chen W., He J., Shen H., Zhang S. Development of surge arresters with series gap against lightning breakage of covered conductors on distribution lines // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. № 4(22). С. 2191–2198.
- [11] Yokoyama S. Distribution surge arrester behavior due to lightning induced voltages // IEEE Trans. Power Del. 1986. № 1(PWRD-1). С. 171–178.
- [12] Nakada K., Yokoyama S., Yokota T., Asakawa A., Kawabata T. Analytical study of failure rates of surge arresters on power distribution lines due to winter lightning // Japan-Korea Joint Symp. Electrical Discharging High Voltage Engineering. 1997. С. 221–224.
- [13] Morooka Y., Yokoyama S., Asakawa A. Protection of power distribution lines against lightning-induced overvoltages by means of surge arresters and overhead ground wire // 8th Int. Symp. High Voltage Engineering. 1993. С. 397–400.
- [14] Piantini A. Lightning protection of overhead power distribution lines // 29th International Conference on Lightning Protection. 2008. № June. С. 1–29.
- [15] Халилов Ф.Х., Котляров Э.Р. Отказ от тросовых молниеотводов и трубчатых разрядников на воздушных линиях 35-150 кВ в районах Крайнего Севера // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2015. № 2(219). С. 41–47.
- [16] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines IEEE Std. 1410, 1997.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТИТКОВ Василий Васильевич – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.
E-mail: titkovprof@yandex.ru

КОЛЫЧЕВ Александр Валерьевич – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
E-mail: alkoly4ev@yandex.ru

ГУЛЮВ Александр Михайлович – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: algulov@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 27.06.2021

REFERENCES

- [1] **F.Kh. Khalilov, V.V. Titkov**, Perenapryazheniya i molniyezashchita. M: Lan, 2016. 224 с. (Khalilov F.Kh., Titkov V.V. Overvoltage and lightning protection. Moscow: Lan', 2016. 224 p.)
- [2] **N.I. Gumerova, A.V. Kolychev, F.Kh. Khalilov**, Molniyezashchita elektricheskikh setey srednego, vysokogo i sverkhvysokogo napryazheniya. SPb: Izdatelstvo Politekhnicheskogo universiteta, 2011. 369 с. (Gumerova N.I., Kolychev A.V., Khalilov F.Kh. Lightning protection of electrical networks of medium, high and ultra-high voltage. St. Petersburg: Publishing house of the Polytechnic University, 2011. 369 p.)
- [3] **D.V. Razevig**, Tekhnika vysokikh napryazheniy. M: Energiya, 1976. 488 с. (Razevig D.V. High Voltage Engineering. Moscow: Energy, 1976. 488 p.)
- [4] **D.V. Razevig**, Tekhnika vysokikh napryazheniy. M: GEI, 1963. 473 с. (Razevig D. V., High Voltage Engineering. Moscow: GEI, 1963. 473 p.)
- [5] Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setey 6-1150 kV ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazheniy RD 153-34.3-35.125-99. SPb: , 1999. (Guidelines for the protection of electrical networks 6-1150 kV against lightning and internal overvoltage RD 153-34.3-35.125-99. St. Petersburg: 1999.)
- [6] **G.S. Kuchinskiy**, Tekhnika vysokikh napryazheniy. SPb: Energoatomizdat, 2003. 608 с. (Kuchinskiy G.S. High voltage engineering. St. Petersburg: Energoatomizdat, 2003. 608 p.)
- [7] **V.V. Bazutkin, K.P. Kadomskaya, M.V. Kostenko, Yu.A. Mikhaylov**, Perenapryazheniya v elektricheskikh sistemakh i zashchita ot nikh. SPb: Energoatomizdat, 1995. 320 с. (Bazutkin V.V., Kadomskaya K.P., Kostenko M.V., Mikhailov Y.A. Overvoltage in electrical systems and protection against them. Textbook for universities. St. Petersburg: Energoatomizdat, 1995. 320 p.)
- [8] **I.P. Vereshchagin**, Elektrofizicheskiye osnovy tekhniki vysokikh napryazheniy. M: Izdatelskiy dom MEI, 2010. 704 с. (Vereshchagin I.P. Electrophysical foundations of high voltage engineering. Moscow: Publishing House MEI, 2010. 704 p.)
- [9] Pravila ustroystva elektroustanovok. 7-oye izdaniye, pererabotannoye i dopolnennoye. M: , 2003. (Rules for electrical equipment installation. Moscow: 2003.)
- [10] **S. Gu, W. Chen, J. He, H. Shen, S. Zhang**, Development of surge arresters with series gap against lightning breakage of covered conductors on distribution lines // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. № 4(22). pp. 2191–2198.
- [11] **S. Yokoyama**, Distribution surge arrester behavior due to lightning induced voltages // IEEE Trans. Power Del. 1986. № 1(PWRD-1). pp. 171–178.
- [12] **K. Nakada, S. Yokoyama, T. Yokota, A. Asakawa, T. Kawabata**, Analytical study of failure rates of surge arresters on power distribution lines due to winter lightning // Japan-Korea Joint Symp. Electrical Discharging High Voltage Engineering. 1997. pp. 221–224.
- [13] **Y. Morooka, S. Yokoyama, A. Asakawa**, Protection of power distribution lines against lightning-induced overvoltages by means of surge arresters and overhead ground wire // 8th Int. Symp. High Voltage Engineering. 1993. pp. 397–400.
- [14] **A. Piantini**, Lightning protection of overhead power distribution lines // 29th International Conference on Lightning Protection. 2008. № June. pp. 1–29.
- [15] **F.Kh. Khalilov, E.R. Kotlyarov**, Otkaz ot trosovykh molniyeotvodov i trubchatykh razryadnikov na vozdushnykh liniyakh 35-150 kV v rayonakh Kraynego Severa // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2015. № 2(219). pp. 41–47. (Khalilov F.Kh., Kotlyarov E.R. Avoiding

the use of protection wire and tubular rods of 35-150 kV for lightning protection of overhead power lines and substations in conditions of Far North // St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology. 2015. № 2(219). pp. 41–47.)

[16] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines IEEE Std. 1410, 1997.

THE AUTHORS

TITKOV Vasily V. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: titkovprof@yandex.ru

KOLYCHEV Aleksandr V. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: alkoly4ev@yandex.ru

GULOV Aleksandr M. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: algu1ov@yandex.ru

Received: 27.06.2021

DOI: 10.18721/JEST.27302

УДК 621.327

*Г.С. Астафьев, К.В. Волошин, В.В. Титков*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ПЕРМАНЕНТНОЙ СВЕТОВОЙ МАРКИРОВКИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Важными элементами системы непрерывной световой маркировки проводов воздушных линий 35 – 110 кВ являются газоразрядная лампа и электростатическая антенна. В работе рассмотрена возможность применения электростатических антенн сложной конфигурации для повышения светимости газоразрядных ламп. Показано, что рамочные антенны в условиях ограничения максимального габарита позволяют получить больший рабочий ток и яркость газоразрядной лампы, чем в случае стандартно прямолинейной антенны. Для оценки электрической емкости сложных пространственных антенн из тонкого профиля кругового сечения использовался метод интегрального уравнения первого рода относительно распределения линейной плотности заряда на элементах конструкции. С использованием инструментов COMSOL Compiler и MATLAB Compiler было разработано прикладное программное обеспечение, в котором осуществляется ввод геометрических параметров, визуализация конструкции антенны и расчет электрической емкости. Выполнены оценки пространственных смещений сложных антенн под воздействием ветровых нагрузок.

Ключевые слова: световой маркер воздушной линии, газоразрядная лампа, электрическая емкость, расчет методом интегрального уравнения, прямолинейная антенна, рамочная антенна, ветровые нагрузки.

Ссылка при цитировании:

Астафьев Г.С., Волошин К.В., Титков В.В. Повышение характеристик электростатической системы питания перманентной световой маркировки воздушных линий электропередачи // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 17–26. DOI: 10.18721/JEST.27302

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*G.S. Astafiev, K.V. Voloshin, V.V. Titkov*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

IMPROVING THE CHARACTERISTICS OF ELECTROSTATIC POWER SUPPLY SYSTEM OF PERMANENT LIGHT MARKING OF OVERHEAD POWER LINES

Gas-discharge lamp and electrostatic antenna are important elements of the system of permanent light marking of 35–110 kV overhead power lines. The paper considers the possibility of using electrostatic antennas of irregular shape to increase the luminous intensity of gas-discharge lamps. It is shown that the frame antennas under the conditions of limiting the maximum size allow higher operating current and brightness of the gas-discharge lamp than in case of a standard rectilinear antenna. To estimate the electrical capacity of the irregularly shaped antennas made of a thin circular cross-section profile, the authors applied the method of an integral equation of the

first kind with respect to the distribution of the linear charge density on the structural elements. Using the COMSOL Compiler and MATLAB Compiler tools, the authors developed application software, which allows geometric parameters input, antenna design visualization, and calculation of the electrical capacitance. The spatial displacements of irregularly shaped antennas under the influence of wind loads are estimated.

Keywords: overhead power line light marker, gas-discharge lamp, electric capacity, integral equation calculations, rectilinear antenna, frame antenna, wind loads.

Citation:

G.S. Astafiev, K.V. Voloshin, V.V. Titkov, Improving the characteristics of electrostatic power supply system of permanent light marking of overhead power lines, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (03) (2021) 17–26, DOI: 10.18721/JEST.27302

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Широко применяющиеся системы световой маркировки проводов воздушных линий электропередачи высокого напряжения с помощью газоразрядных ламп используют принцип емкостного отбора энергии в электрическом поле фазных проводов [1–4]. Типичное устройство подобного типа показано на рис. 1.

Необходимый уровень напряжения на газоразрядной лампе (1) обеспечивается разностью напряжения, наводимого на линейной электростатической антенне (5) и фазном проводе, соединенным проводящим шлейфом (4) со вторым полюсом газоразрядной лампы. Потенциал антенны определяется ее емкостными связями с остальными фазными проводами линии C_b , C_c и землей $C_{ас}$ [5–8]. Данная схема успешно применяется для линий класса напряжения 220 кВ и выше [9]. В этом случае достаточный ток лампы обеспечивает габарит линейной антенны в несколько метров. При этом для линий указанного класса, как показано в [9] необходимый уровень напряжения на лампе обеспечивается емкостями C_b , C_c . Адаптация данной системы маркировки проводов для воздушных линий класса 110 кВ и ниже требует при обеспечении необходимой яркости свечения в прежнем дизайне непомерно длинных антенн, превосходящих 10 м. Поэтому задачей данной работы является более тщательный анализ электрических процессов в системе питания перманентного маркера на основе газоразрядной лампы и изучение возможностей модификации электростатических антенн в приемлемых габаритах для повышения разрядного тока лампы.

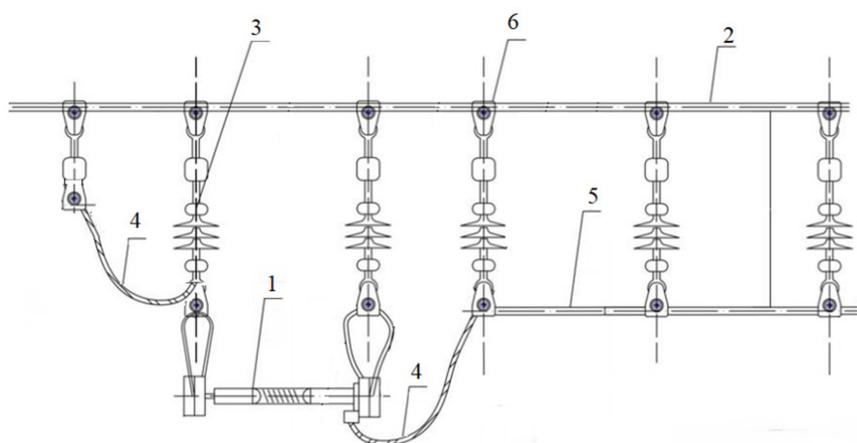


Рис. 1. Схема расположения лампы (1) и антенны (5) на фазном проводе (2):
3 – изолятор, 4 – проводниковый шлейф, 6 – зажим

Fig. 1. The installation scheme of a gas-discharge lamp (1) and antenna (5) on the phase wire (2):
3 – insulator, 4 – connecting wire, 6 – clip

Методы

Простейшим и в тоже время достаточно эффективным подходом к анализу токов и напряжений в системе питания светового маркера (рис. 1) является модель постоянного электрического сопротивления лампы. При этом рассчитываемые действующие значения токов и напряжений в схеме замещения (рис. 2) соответствуют стендовым измерениям тока лампы, сохраняющего форму, близкую к синусоидальной.

Средняя величина сопротивления лампы по данным измерений составляет величину $R_{\text{лампы}} = 0.3 \text{ МОм}$.

Рассмотрим токи и напряжения в схеме рис. 2 применительно к линиям класса 110 кВ, для которых обнаружена недостаточная яркость свечения маркера. В случае антенн линейной формы (рис. 1) входящие в схему замещения емкости оцениваются простыми формулами для длинных проводников цилиндрической формы. В частности, емкость антенны длиной L относительно фазного провода рассчитывается как

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 L}{\ln\left(\frac{D}{R}\right)},$$

где D – расстояние между проводом и антенной, R – радиус сечения антенны.

Оценка емкостей в базовой системе питания (рис. 1) с помощью последней формулы применительно к ВЛ 110 кВ на опорах ПСБ-110-1 (рис. 3) дает при установке антенны на фазу А следующие значения: емкость между антенной и фазой А $C_a = 78.9 \text{ пФ}$, между антенной и фазой В $C_b = 58 \text{ пФ}$, между антенной и фазой С $C_c = 57.7 \text{ пФ}$, между антенной и землей $C_{\text{аз}} = 56.5 \text{ пФ}$.

Действующие значения фазных напряжения для линии класса напряжения – 110 кВ составляют $U_{\text{фаз } 110 \text{ кВ}} = 63.5 \text{ кВ}$. Аналогичный [9] расчет тока лампы без учета емкости антенны по отношению к земле дает для тока лампы $I_{\text{л}} = 3.47 \text{ мА}$. При этом уточненное с учетом емкости $C_{\text{аз}}$ значение тока составит $I_{\text{л}} = 4.59 \text{ мА}$.

При вариации высоты подвеса (расстояния между антенной и фазным проводом, на котором она закрепляется) величина отбираемой мощности зависит от соотношения между емкостью антенны на землю и всеми остальными емкостями – C_a , C_b и C_c . С увеличением высоты подвеса антенны растет емкость между ней и землей. При этом емкости антенна-фазные провода снижаются в меньшей степени. Поэтому расчеты показывают увеличение тока через лампу, а наблюдения – увеличение яркости ее свечения.

Для увеличения предела отбираемой мощности (прежде всего увеличения тока через лампу) и оценки возможностей снижения линейных габаритов целесообразно исследовать отличные от прямолинейной формы антенн. Это позволит оптимизировать конструкцию путем уменьшения некоторых геометрических размеров, например длины антенны. При этом простые формулы для емкости между длинными цилиндрами становятся не применимыми. Поэтому для антенн сложной формы использовался численный метод площадок [10–12]. Применительно к рассматриваемой задаче речь идет о линейном распределении линейной плотности заряда $\tau(l_1)$ и $\tau(l_2)$, которые находятся в результате решения интегрального уравнения

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{l_1, l_2} \frac{\tau(l) dl}{\sqrt{(x(l)-x)^2 + (y(l)-y)^2 + (z(l)-z)^2}} = U(x, y, z), \quad (1)$$

где x, y, z – координаты точек лежащих на проводниках l_1 и l_2 . При этом если точка x, y, z находится на первом проводнике $U(x, y, z) = U_1$, а в случае принадлежности точки x, y, z к проводнику 2

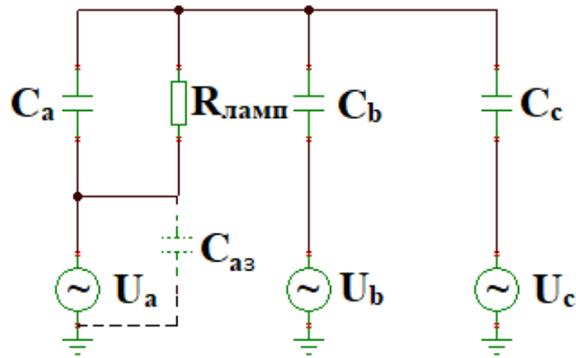


Рис. 2. Схема замещения системы питания с моделью постоянного сопротивления лампы $R_{\text{лампы}}$
 Fig. 2. The equivalent circuit of the power supply system with the constant lamp resistance

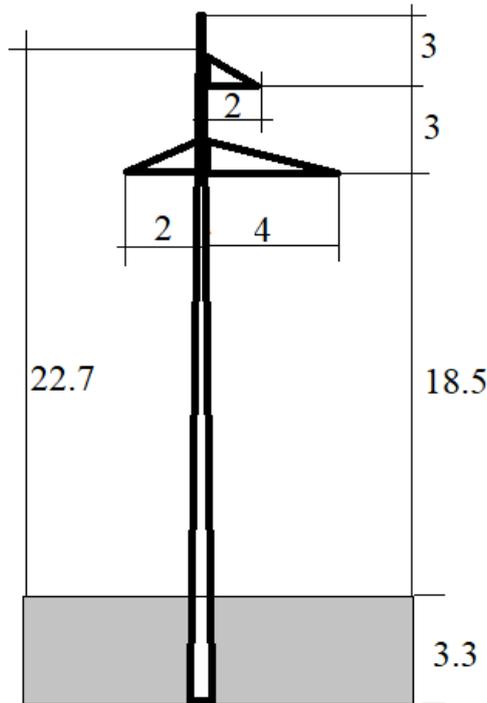


Рис. 3. Эскиз опоры ПСБ-110-1
 Fig. 3. Sketch of transmission tower ПСБ-110-1

$U(x, y, z) = U_2$. В результате решения уравнения (1) определяется распределения линейной плотности заряда $\tau(l)$, которое позволяет рассчитать полный заряд одного из проводников, например, $q_1 = \int_{l_1} \tau(l) dl$ и искомую емкость $C_{12} = q_1 / |U_1 - U_2|$.

При численной реализации интеграл в левой части (1) заменяется конечной суммой с аппроксимацией ядра уравнения какой-либо квадратурой, связанной с разбиением отрезков l_1 и l_2 на малые конечные элементы. например с использованием метода трапеций. При этом интегральное уравнение (1) трансформируется в линейную систему уравнений относительно заряда на

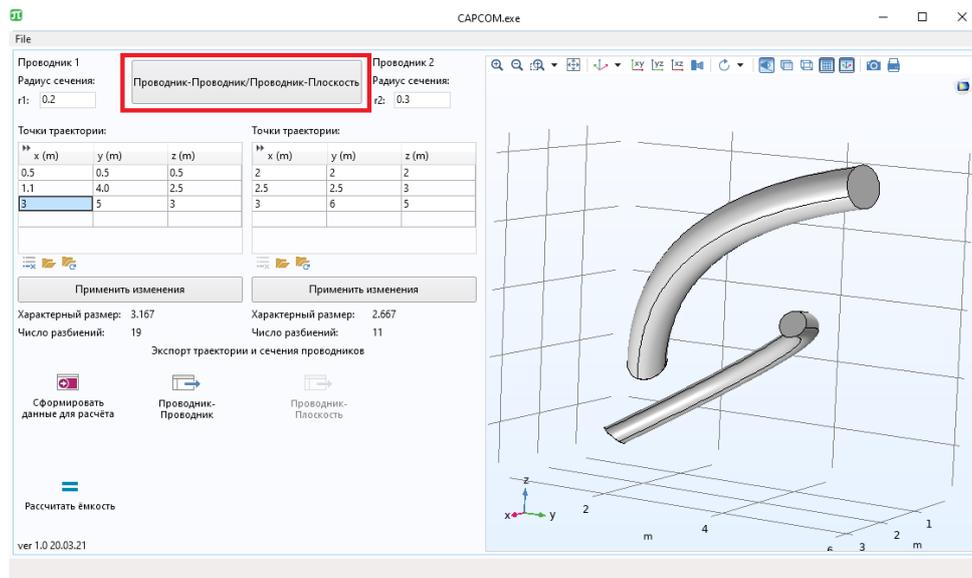


Рис. 4. Интерфейс приложения CAPCOM
 Fig. 4. The interface of CAPCOM application

каждом из таких элементов. После решения системы заряд проводника 1 вычисляется простым суммирование зарядов его элементов. Описанный метод расчета емкости тонких проводников произвольной формы реализован в качестве автономного приложения, использующего для ввода траекторий проводников интерфейс на базе COMSOL Multiphysics (рис. 4).

Результаты и обсуждение

С помощью описанной выше технологии были выполнены оценки емкостей в схеме замещения (рис. 2) применительно к конфигурации промежуточной опоры (рис. 3) для антенн различной конфигурации и размеров. В частности анализировались: стандартная линейная антенна длиной 6 и 10 м, рамочные прямоугольные антенны 6×0.5 мм с продольной линейной вставкой (рис. 5) и без нее. Результаты этих расчетов представлены табл. 1.

Таблица 1

Расчетные емкости антенн из трубчатого профиля диаметром 21.6 мм различной конфигурации по отношению к фазам и поверхности земли ВЛ-110 кВ при высоте подвеса 0.25 м

Table 1

Calculated capacities of antennas made of a tubular profile with a diameter of 21.6 mm for different configurations with respect to the phases and the earth's surface for power line 110 kV at suspension antenna size of 0.25 m

Антенна	C_a	C_b	C_c	$C_{зем}$
	Φ			
1. Прямолинейная (6 м)	3.94E-11	2.81E-11	2.78E-11	2.65E-11
2. Прямолинейная (10 м)	6.65E-11	4.56E-11	4.51E-11	4.21E-11
3. Рамочная 6×0.5 мм	7.33E-11	5.23E-11	5.18E-11	5.03E-11
4. Рамочная 6×0.5 мм с продольной линейной вставкой (вертикальный подвес)	8.73E-11	5.90E-11	5.84E-11	5.70E-11
5. Рамочная 6×0.5 мм с продольной линейно вставкой (горизонтальный подвес)	8.16E-11	5.96E-11	5.93E-11	5.80E-11

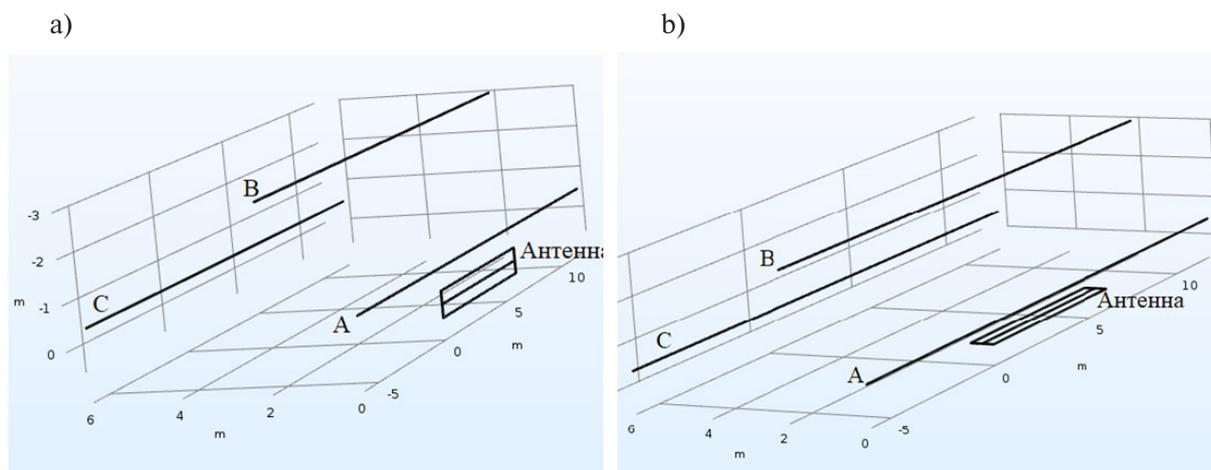


Рис. 5. Рамочная антенна с продольной линейной вставкой.
 а – вертикальное, б – горизонтальное крепление к проводу

Fig. 5. Loop antenna with longitudinal linear insert. a – vertical, b – horizontal fastening to the wire

При численных оценках тока лампы, с использованием приведенной выше схемы замещения, установлено, что в независимости от соотношения между емкостями величина рабочего тока зависит от средней величины емкости по отношению ко всем элементам системы, что видно из табл. 2.

Таблица 2

Расчетный рабочий ток лампы (мА) при различных конфигурациях антенн

Table 2

Calculated lamp operating current (mA) for various antenna configurations

Антенна	Линейная, 10 м	Рамка 6 × 0.5 м со вставкой,	
		параллельно земле	перпендикулярно земле
Высота подвеса 0.5 м Диаметр профиля, 24 мм	3.86	4.73	4.72
Высота подвеса, 0.25 м Диаметр профиля, 24 мм		4.73	4.72
Диаметр профиля, 12 мм Высота подвеса, 0.25 м		4.36	4.4
Диаметр профиля, 12 мм Высота подвеса, 0.5 м		4.41	4.44

В частности, применение рамочной антенны с уменьшенным до 6 м максимальным габаритом позволяет получить превосходящий на 20% ток лампы по сравнению со случаем стандартной линейной антенны длиной 10 м. (табл. 2). Следует отметить также, что на величину электрической емкости и, следовательно, на рабочий ток лампы влияет размер сечения профиля, из которого изготавливается антенна. Уменьшение диаметра профиля в два раза приводит к уменьшению рабочего тока лампы на 5%, в то время как масса конструкции уменьшается в два раза.

Применение антенн сложных конфигураций, в частности рамочных, нуждается также в оценке влияния ветровых нагрузок на конструкцию, поскольку ее аэродинамическое сопротивление возрастает [13–14]. Для оценки отклонения конструкции при вертикальном подвесе рамки от

равновесного положения под воздействием ветра воспользуемся стандартными соотношениями, применяемыми для подобных расчетов применительно к проводам воздушных линий [15]. При этом сила ветровой нагрузки на провод длиной l и диаметром сечения d оценивается формулой

$$F = 0.6 * \rho v^2 l d \sin^2 \varphi, \quad (2)$$

где v – скорость ветра, $\rho = 1.2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха, φ – угол между направлением ветра и осью провода. Поскольку диаметр профиля значительно меньше расстояния между линейными элементами антенны, то обтекание каждого из них потоком ветра можно считать независимым и рассчитывать аэродинамическую силу как сумму аэродинамических сил, действующих на отдельные элементы. Поэтому в (2) в качестве длины l используется сумма длин всех элементов конструкции антенны. В частности, для рассматриваемой здесь рамочной антенны $6 \times 0.5 \text{ м}$ с линейной вставкой $l = 19 \text{ м}$. Угол отклонения γ конструкции от вертикального положения находится из соотношения $\text{tg } \gamma = F/Mg$, где $M = m'l$ – масса конструкции, m' – погонная масса профиля, $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения. Для наименее благоприятного режима обтекания конструкции $\varphi = 90^\circ$ имеем:

$$\text{tg } \gamma = \frac{0.6\rho v^2 d}{m'g}. \quad (3)$$

Смещение нижней кромки антенны от оси провода составит:

$$h_a = d_a \text{tg } \gamma,$$

где $d_a = 0.5 \text{ м}$ высота рамки антенны.

Для принимаемой для средней полосы РФ нормативной скорости ветра 10 м/с . Расчетные смещения от оси провода вертикально ориентированной рамочной антенны $6 \times 0.5 \text{ м}$ со вставкой приведены в табл. 3.

Таблица 3

Отклонения (см) рамочной антенны $6 \times 0.5 \text{ м}$ со вставкой при скорости ветра 10 м/с

Table 3

Deviations (cm) of the loop antenna $6 \times 0.5 \text{ м}$ with linear insert at a wind speed of 10 м/с

Сталь $24 \times 2 \text{ мм}$	Сталь $12 \times 1 \text{ мм}$	Алюминиевый сплав $24 \times 2 \text{ мм}$	Алюминиевый сплав $12 \times 1 \text{ мм}$
8	16	23	47

Из рассмотренных здесь профилей наименьшие смещения обеспечивает антенна из стальной трубы $24 \times 2 \text{ мм}$. При размещении маркера на некотором удалении от стойки опоры приведенные значения смещений антенны не являются опасными, т.к. расстояния между фазами составляет величину около 6 м . Как следует из (3), наименьшими углами отклонения характеризуется профиль сплошного сечения (пруток), обладающий наименьшим значением отношения d/m' .

Для анализа поведения рамочной антенны с горизонтальным (параллельно земле) размещением, приведенные выше оценки неприменимы, поскольку протяженные элементы попадают в возмущенный впереди расположенным элементом поток (рис. 6). В общем случае целесообразны более тщательные натурные или численные исследования аэродинамических характеристик разрабатываемых антенн сложной формы.

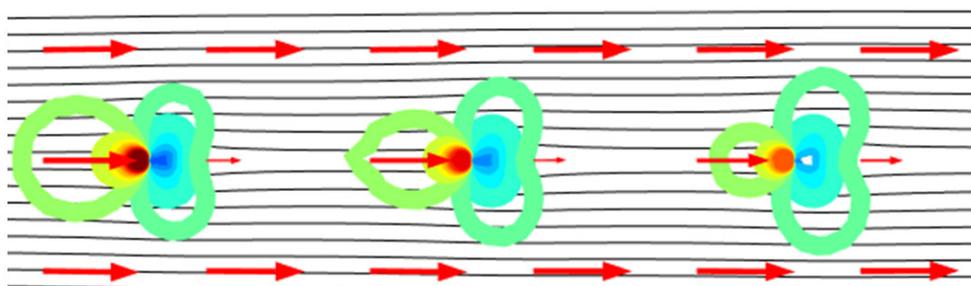


Рис. 6. Изобары и вектор скорости воздушного потока при обтекании рамочной антенны с горизонтальным размещением

Fig. 6. Isobars and vector of air flow velocity in flowing around a loop antenna with horizontal fastening

Заключение

Эффективность систем перманентной световой маркировки газоразрядными лампами проводов воздушных линий электропередачи может быть повышена путем применения электростатических антенн сложной формы. В частности, рамочные антенны позволяют при меньшей длине увеличить рабочий ток и яркость лампы. Такой подход позволяет избежать чрезмерно длинных антенн при маркировке линий 35 – 110 кВ.

Снижение массовых характеристик сложных антенн достигается применением трубчатых профилей меньшего диаметра. При этом электрическая емкость антенны снижается незначительно.

Наличие у антенны сложной формы делает необходимым в общем случае исследование их аэродинамических характеристик и перемещений системы маркировки под действием ветровых нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Маркеры воздушных линий электропередач. СТО 34.01-2.2-016-2016 ПАО РОССЕТИ 02.11.2016.
- [2] РУЭСТОП ГА-95 Руководство по электросветотехническому обеспечению полетов в гражданской авиации Российской Федерации. Департамент воздушного транспорта Российской Федерации.
- [3] ИКАО, Руководство по проектированию аэродромов – Часть 4 – Визуальные средства, 2004.
- [4] **Jenkins A.R.** Avian collisions with power lines: A global review of causes and mitigation with a South African perspective / Jenkins A.R., Smallie J.J., Diamond M. // Bird Conservation International. – 2010. – Т. 20. – № 3. – С. 263–278. DOI: 10.1017/S0959270910000122
- [5] **Oliveira J., Carrasco G.** Electromagnetic transient study in the signaling system of the towers of the Orinoco river crossing // 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, TDC'06. – 2006. – С. 1–6. DOI: 10.1109/TDCLA.2006.311581
- [6] Capacitive power tapping from insulated shield wire of overhead high voltage transmission lines with tuning / Shu S., Zheng Y., Xia K. [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2021. – Т. 36. – № 1. – С. 191–204. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2980163
- [7] Development of power supply system for obstruction lights exploiting induced current which flows through overhead ground wires / Yamaguchi T., Takano S., Naganuma O. [et al.] // Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. – 2002. – Т. 3. – № ASIA PACIFIC. – С. 2176–2180. DOI: 10.1109/tdc.2002.1177800
- [8] Electric field analysis in warning light for power lines of high voltage / Güemes J.A., Iraolagoitia A., Fernández P. [et al.] // Renewable Energy and Power Quality Journal. – 2012. – Т. 1. – № 10. – С. 1230–1234. – DOI: 10.24084/repqj10.659

[9] Первая Российская система постоянной световой маркировки проводов линий электропередач высокого напряжения / И.О. Иванов, А.Е. Монастырский, А.С. Резник [и др.] // Материаловедение. Энергетика. – 2020. – Т. 26. – № 2. – С. 20–30. DOI: 10.18721/JEST.26202

[10] **Иоссель Ю.Я., Качанов Э.С., Струнский М.Г.** Расчет электрической емкости // Ленинград, Энергоиздат, 1981.

[11] **Бессолицын А.В.** Использование численного расчета трехмерного электростатического поля для определения собственных и взаимных емкостей проводов воздушной линии / А.В. Бессолицын, М.Г. Попов, Е.Н. Хорошина // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2010. – № 2-2(100). – С. 55–59.

[12] **Юфанова Ю.В.** Расчет электрической емкости тонких осесимметричных тел / Ю.В. Юфанова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2002. – № 3. С. 6–9.

[13] Правила устройства электроустановок – 7-е издание. Глава 2.5. – 2003.

[14] Анализ действия гололедно-ветровых и электродинамических нагрузок в пролетах с произвольным расположением проводов / И.И. Сергей, Ю.В. Бладыко, Е.Г. Пономаренко [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2012. – № 1. – С. 38–44.

[15] **Кучинский Г.С., Кизветтер В.Е., Пинталь Ю.С.** Изоляция установок высокого напряжения // М.: Энергоатомиздат, 1987.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АСТАФЬЕВ Георгий Сергеевич – студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: astafiev.gs@edu.spbstu.ru

ВОЛОШИН Кирилл Валерьевич – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: kir_vol@mail.ru

ТИТКОВ Василий Васильевич – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.
E-mail: titkovprof@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 26.06.2021

REFERENCES

[1] Markery vozdushnykh liniy elektroperedach (Markers for overhead power lines. corporative standart). STO 34.01-2.2-016-2016 PAO ROSSETI 02.11.2016.

[2] RUESTOP GA-95 Rukovodstvo po elektrosvetotekhnicheskomu obespecheniyu poletov v grazhdanskoj aviatsii Rossiyskoy Federatsii. Departament vozdušnogo transporta Rossiyskoy Federatsii (The Guide to electrical and lighting equipment flights in the civil aviation of the Russian Federation. Air transport Department of the Russian Federation). 1995.

[3] ICAO, Aerodrome Design Manual – Part 4 – Visual Aids, 2004.

[4] **A.R. Jenkins, J.J. Smallie**, Avian collisions with power lines: a global review of causes and mitigation with a South African perspective, Bird Conservation International, 20(3) (2010) 263–278. DOI: 10.1017/S0959270910000122

- [5] **J. Oliveira, G. Carrasco**, Electromagnetic Transient Study in the Signaling System of the Towers of the Orinoco River Crossing, 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America (2006) 1–6. DOI: 10.1109/TDCLA.2006.311581
- [6] **S. Shu, Y. Zheng, K. Xia, G. Qi**, Capacitive Power Tapping From Insulated Shield Wire of Overhead High Voltage Transmission Lines With Tuning, IEEE Transactions on Power Delivery, 36(1) (2021) 191–204. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2980163
- [7] **T. Yamaguchi, S. Takano, O. Naganuma, M. Matsuoka, H. Nakamura, K. Tomonaga**, Development of power supply system for obstruction lights exploiting induced current which flows through overhead ground wires, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 3(ASIA PACIFIC) (2002) 2176–2180. DOI: 10.1109/TDC.2002.1177800
- [8] **J.A. Güemes, A. Iraolagoitia, P. Fernández, J. Sánchez**, Electric field analysis in warning light for power lines of high voltage, Renewable Energy and Power Quality, 1(10) (2012) 1230–1234. DOI: 10.24084/repqj10.659
- [9] **I.O. Ivanov, A.Y. Monastyrskiy, A.S. Reznik, V.V. Titkov, A.O. Grebtsov, G.N. Fedorenko**, The first Russian system of permanent light marking of high voltage overhead power lines, Materials Science. Power Engineering, 26(2) (2020) 20–30. DOI: 10.18721/JEST.26202
- [10] **Yu.Ya. Iossel, E.S. Kachanov, M.G. Strunskiy**, Raschet elektricheskoy yemkosti (Calculation of electrical capacity)//Leningrad, Energoizdat, 1981.
- [11] **A.V. Bessolitsyn, M.G. Popov, E.N. Horoshinina**, Using the numerical calculation of three-dimensional electrostatic field to determine self and mutual capacitance wires overhead line, Materials Science. Power Engineering, 2 (2010) 55–59.
- [12] **Yu.V. Yufanova**, Raschet elektricheskoy yemkosti tonkikh osesimmetrichnykh tel (Calculation of electrical capacity of thin axisymmetric bodies), Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika, 3(2002) 6–9.
- [13] **Pravila ustroystva elektroustanovok (National Electrical Code)**, (2003).
- [14] **I. Sergey, Y. Bladyko, Y. Panamarenka, B. Tsemekhman, V. Tarasov**, Action analysis for ice, wind and electro dynamic loads in spans with arbitrary wire layout, Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations, (1) (2012) 38–44.
- [15] **G.S. Kuchinskiy, V.Ye. Kizevetter, Yu.S. Pinal**, Izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya (Insulation of high voltage installations) // M.: Energoatomizdat, 1987.

THE AUTHORS

ASTAFIEV Georgiy S. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: astafiev.gs@edu.spbstu.ru

VOLOSHIN Kirill V. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: kir_vol@mail.ru

TITKOV Vasily V. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: titkovprof@yandex.ru

Received: 26.06.2021

DOI: 10.18721/JEST.27303

УДК 621.3.053.1

*С.И. Кривошеев, И.С. Колодкин,
С.Г. Магазинов, Ю.К. Очковская, А.Д. Резникова*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕ ПРИ ГРОЗОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В работе приведены результаты испытания заземляющих устройств (ЗУ) линии электропередач при импульсном воздействии. Выполнено моделирование растекание тока вертикальных электродов, разных длин в грунтах с различными электрофизическим параметрами в волновой постановке связанного электромагнитного поля. На основе полученных результатов определены основные действующие факторы, влияющие на формирование волновых процессов вертикального заземлителя – в грунтах с высокими диэлектрической проницаемости и/или удельным сопротивлением волновые процессы наблюдаются более явно; увеличение длины электрода приводит к уменьшению частоты высокочастотной колебательной составляющей тока заземлителя в однородном грунте. Наблюдаемые волновые процессы могут сказаться на переходном импедансе ЗУ и могут повлиять на эффективность защитных мероприятий с использованием, например, нелинейных ограничителей перенапряжений.

Ключевые слова: заземляющее устройство, импеданс, переходная характеристика, грозовое воздействие, молниезащита.

Ссылка при цитировании:

Кривошеев С.И., Колодкин И.С., Магазинов С.Г., Очковская Ю.К., Резникова А.Д. Моделирование волновых процессов в вертикальном заземлителе при грозовом воздействии // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 27–38. DOI: 10.18721/JEST.27303

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*S.I. Krivosheev, I.S. Kolodkin,
S.G. Magazinov, J.K. Ochkovskaya, A.D. Reznikova*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

WAVE PROCESSES MODELING IN THE VERTICAL GROUNDING ELECTRODE UNDER LIGHTNING IMPACT

The paper presents the results of testing grounding devices (GD) of power lines under impulse impact. The modeling of current spreading in vertical electrodes of various lengths in soils with different electrophysical parameters in the wave formulation of a coupled electromagnetic field is carried out. On the basis of the results obtained, the main factors affecting the formation of wave processes of a vertical ground electrode were determined: in soils with high dielectric permittivity and/or specific resistance, wave processes are observed better; an increase in the length of the electrode leads to a decrease in the frequency of oscillations of the ground electrode current in the homogeneous soil.

The observed wave processes can affect the transient impedance of the GD and the effectiveness of lightning protection using, for example, non-linear surge arresters.

Keywords: grounding device, impedance, transient characteristics, lightning impact, lightning protection.

Citation:

S.I. Krivosheev, I.S. Kolodkin, S.G. Magazinov, J.K. Ochkovskaya, A.D. Reznikova, Wave processes modeling in the vertical grounding electrode under lightning impact, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (03) (2021) 27–38, DOI: 10.18721/JEST.27303

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Заземляющее устройство (ЗУ) электроустановок и линий электропередач выполняется для обеспечения работы электрооборудования (ЭО) в номинальном режиме, безопасной работы персонала и защиты ЭО от перенапряжений и сверхтоков. Данные задачи являются важными составляющими систем электроснабжения (СЭС). Неверная разработка ЗУ влечёт за собой нарушения работы СЭС, опасность поражения людей электрическим током и выход из строя ЭО. Поэтому расчётам, испытаниям и разработкам ЗУ посвящено много работ [1–7] и выпущены рекомендательные нормативные документы государственных [8, 9] и международного уровней.

Одной из функций ЗУ является отвод тока молнии в землю для защиты ЭО СЭС [10]. Молниезащита от прямых ударов молнии в ЭО выполняется при помощи установки над распределительными устройствами (РУ) молниеотводов и/или молниезащитной сетки, соединённых с помощью заземляющих проводников с ЗУ подстанции. Молниезащита ЛЭП от прямого попадания молнии выполняется при помощи грозотроса, соединённого заземляющими проводниками с ЗУ ЛЭП напрямую или через искровой промежуток [11]. Молниезащита ЭО от набегающих грозовых волн по ЛЭП выполняется при помощи защитных аппаратов (разрядников, нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН)), установленных на входе ЛЭП в РУ, которые обеспечивают отвод тока молнии в ЗУ подстанции.

Для эффективного отвода тока молнии в землю необходимо, чтобы импеданс ЗУ находился в заданных контролируемых пределах. Завышенный импеданс ЗУ может привести к протеканию части тока молнии через ЭО или вызвать обратное перекрытие с заземлённых частей ЭО на токопроводящие части, находящиеся под рабочим напряжением, вследствие увеличения потенциала ЗУ.

Импеданс ЗУ при импульсном воздействии может существенно отличаться от стационарного сопротивления, вследствие проявления реактивной составляющей импеданса ЗУ [12–14] и волнового характера распространения электромагнитной волны вдоль заземлителя [15]. Контролировать импеданс ЗУ при грозовом воздействии можно на стадии проектирования и при помощи инструментальных измерений в ходе эксплуатации.

В данной работе приводятся результаты испытаний ЗУ опор при воздействии высоковольтным электрическим импульсом. А также результаты моделирования ЗУ [16] в волновом режиме, на примере вертикальных электродов, длиной 5 м и 20 м в грунтах с различными электрофизическими свойствами.

Целью работы является определение основных действующих факторов, влияющих на формирование волновых процессов ЗУ. Научная ценность заключается в описании численной модели расчёта волновых процессов ЗУ в среде Comsol Multiphysics и анализе волновых процессов вертикального электрода при стекании тока молнии.

Методы

Испытание ЗУ опор высоковольтным электрическим импульсом

Для испытаний ЗУ опор в работах [17] ранее был разработан генератор импульсов ГИ 1.2/50 (ГСС), схема которого приведена на рис. 1. Работа генератора заключается в разряде конденсатора C1, предварительно заряженного до напряжения ~ 10 кВ, через разрядник РУ-62 на нагрузку.

При разряде на активную нагрузку ГИ формирует импульс напряжения по форме соответствующий стандартному грозовому импульсу по ГОСТ, см. рис. 2, при этом форма ток совпадает с формой напряжения.

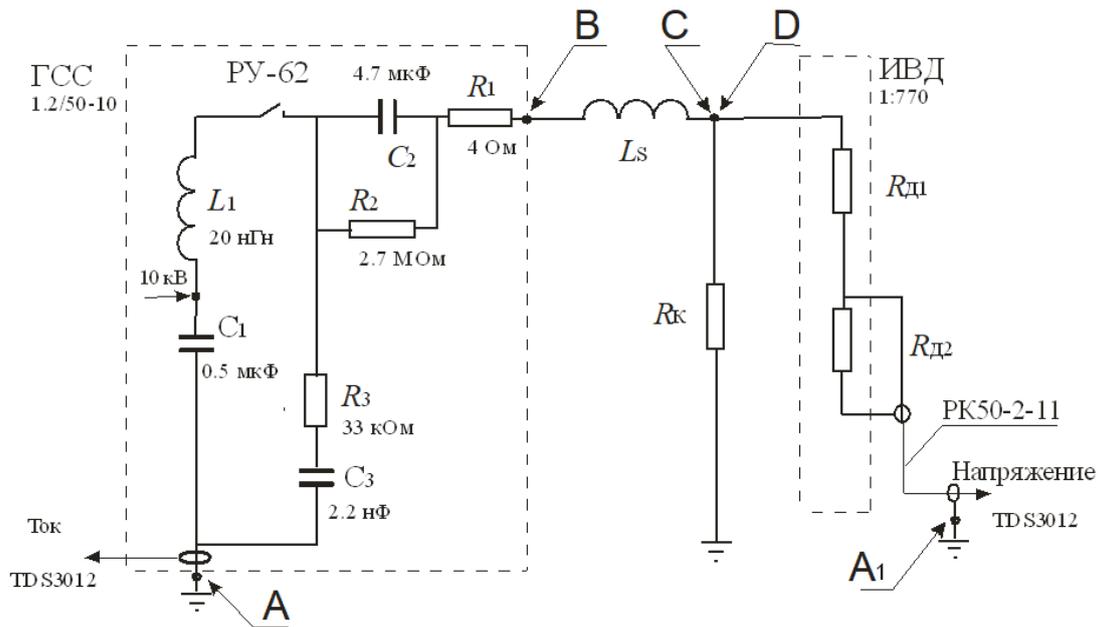


Рис. 1. Схема генератора для испытания ЗУ на импульсное высоковольтное воздействие
 Fig. 1. Scheme of the generator for testing of the grounding device for high voltage impulse impact

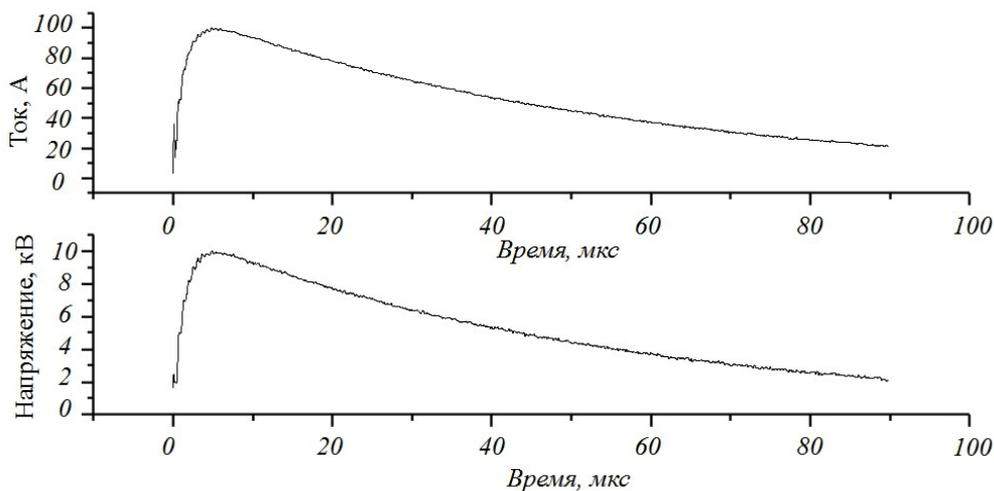


Рис. 2. Формирование стандартного грозового импульса, при разряде ГИ на активную нагрузку R = 100 Ом
 Fig. 2. Formation of a standard lightning impulse when the generator is discharged to an active load

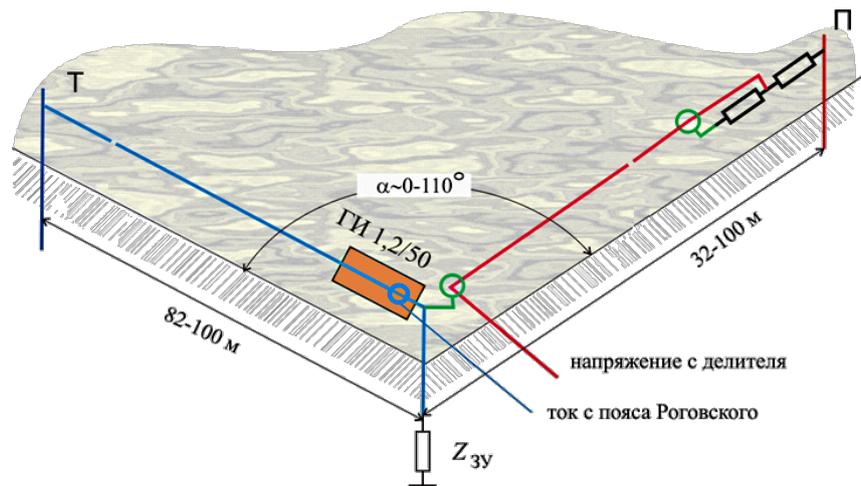


Рис. 3. Схема испытания ЗУ опоры на импульсное воздействие
 Fig. 3. Testing scheme of the grounding device for impulse impact

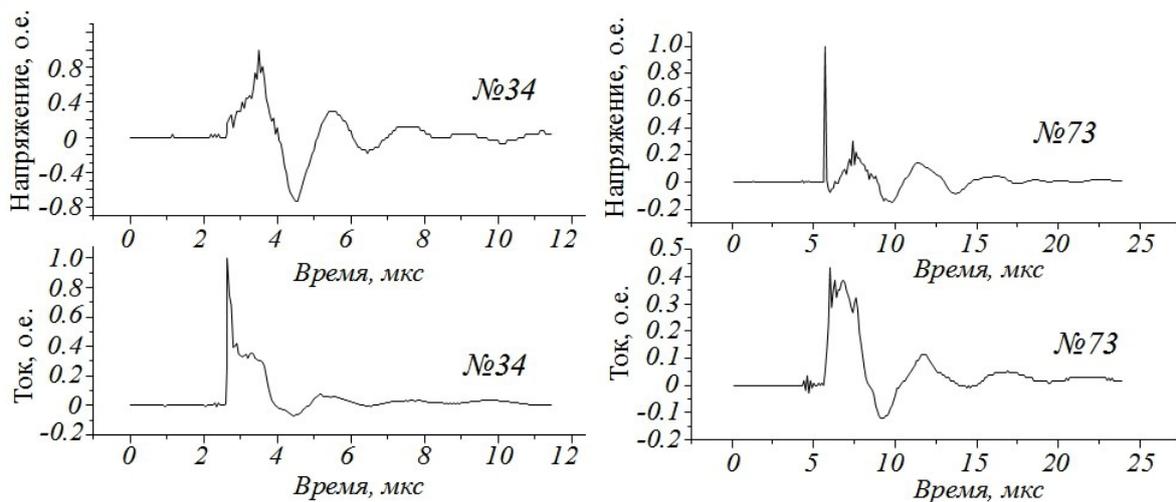


Рис. 4. Результаты испытаний ЗУ опор линии 400 кВ с грозотросом
 (разные номера соответствуют разным опорам). По данным [18].

Fig. 4. Texting results of the grounding device of the overhead line 400 kV with ground wire

Схема подключения генератора ГИ 1,2/50 к ЗУ опоры приведена на рис. 3. Один вывод ГИ подключается к ЗУ опоры, а другой заземляется при помощи обособленного токового вертикального электрода Т на расстоянии 82 – 100 м от опоры.

Измерение тока проводится при помощи пояса Роговского, установленного на токовый провод, соединяющий ГИ и ЗУ опоры. Для измерения потенциала опоры под углом $\alpha = 0 - 110^\circ$ прокладывается коаксиальный кабель, оплётка которого с одной стороны подключается к ЗУ опоры, а с другой через делитель напряжения к потенциальному отдельностоящему вертикальному заземлителю. Жила данного кабеля с одной стороны подключается к средней точки делителя напряжения, с другой стороны производится измерение напряжения между жилой и оплёткой.

Используя данный генератор проводились испытания ЗУ опор двухцепной ВЛ 400 кВ с грозотросом ПС «Выборгская» – Госграница. Результаты испытаний ЗУ некоторых опор приведены

на рис. 4. По результатам испытаний видно, что кривые тока отличаются от кривых напряжения по форме, что свидетельствует о том что в импедансе ЗУ присутствует реактивная составляющая.

На осциллограммах ЗУ видны колебательные процессы, которые могут вызваны реактивной составляющей ЗУ или переотражением электромагнитных волн в заземлителях. Частоты этих колебаний на разных опорах разные, возможно это объясняется разными длинами заземлителей и разными скоростями электромагнитных волн в грунтах с различными диэлектрическими проницаемостями. Многообразие реакций ЗУ может быть связано не только с разной топологией заземляющих элементов, но и различными электрофизическими характеристиками грунтов, в которых они установлены. Параметры грунтов не только определяющим образом влияют на стационарное сопротивление ЗУ, но и определяют характер пространственно-временного распределения тока в грунте. Реакция ЗУ на импульсное воздействие определяет и эффективность использования нелинейных ограничителей напряжения. Так, в [19, 20] отмечается, что переходное сопротивление ЗУ определяет появление высокочастотной составляющей на фронте импульса при срабатывании ОПН. На примере моделирования процессов растекания тока в стержневом заземлителе ниже показано влияние параметров грунтов и размеров заземлителя на характер тока в нем при воздействии стандартного грозового импульса.

Моделирование волновых процессов вертикального электрода

В данной работе используется программная среда Comsol Multiphysics для моделирования связанного электро-магнитного поля вертикального заземлителя при грозовом воздействии методом конечных элементов. Решения уравнений электрической части поля выполняется в модуле AC/DC – electric currents (ec) относительно электрического потенциала V, магнитной части поля в модуле AC/DC: magnetic fields (mf) относительно векторного магнитного потенциала A:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \bar{J}_{ec} = Q, \\ \bar{J}_{ec} \sigma \bar{E}_{ec} + \frac{\partial \varepsilon \bar{E}_{ec}}{dt} + \bar{J}_{e,ec}, \\ \bar{E}_{ec} = -\nabla V; \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \bar{H} = \bar{J}_{mf}, \\ \bar{B} = \nabla \times \bar{A}, \\ \bar{J}_{mf} = \sigma \bar{E}_{mf} + \bar{J}_{e,mf}, \\ \bar{E}_{mf} = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t}; \end{array} \right.$$

где J, J_e – полная и внешняя плотность тока; E – напряжённость электрического поля; B – индукция магнитного поля; H – напряжённость магнитного поля; $\sigma, \varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ – электропроводность и диэлектрическая проницаемость соответственно ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); ec, mf – индексы обозначения переменных которые получаются в результате решения электрической и магнитной части, соответственно.

В магнитной части задачи по умолчанию не учитывается ток смещения, учтём его во внешней плотности тока $J_{e,mf}$, а так же установим связь двух приведённых систем уравнений электрического и магнитного полей осуществляется через внешние плотности тока J_e :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{J}_{e,mf} = \sigma \bar{E}_{ec} + \frac{\partial \varepsilon (\bar{E}_{ec} + \bar{E}_{mf})}{dt} = -\sigma \nabla V - \frac{\partial \varepsilon \nabla V}{dt} - \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2}, \\ \bar{J}_{e,ec} = \sigma \bar{E}_{mf} + \frac{\partial \varepsilon \bar{E}_{mf}}{dt} = -\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2}. \end{array} \right.$$

Данные связующие уравнения учитывают не только токи проводимости, но и токи смещения, включающие вторые производные по времени векторного магнитного потенциала, что

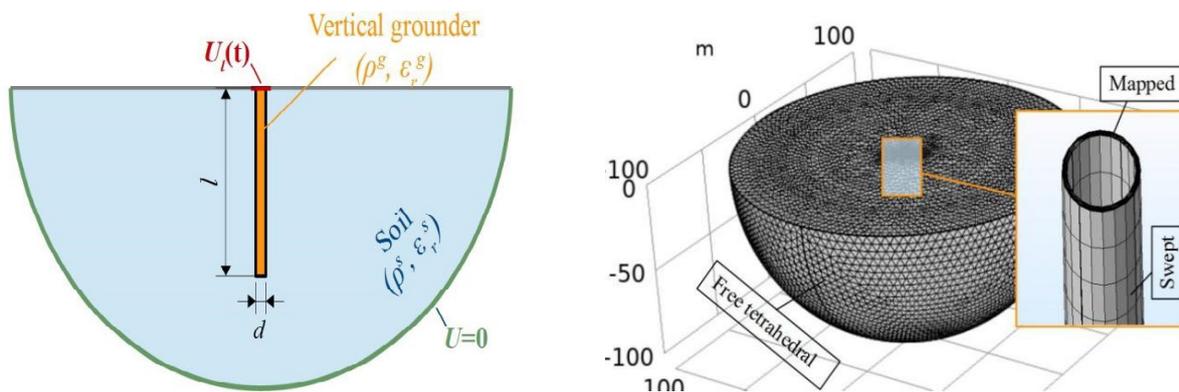


Рис. 5. Геометрия расчётной модели вертикального заземлителя и расчётная сетка

Fig. 5. Geometry of the modeling vertical grounding electrode and computational mesh

позволяет описать волновые электромагнитные процессы. Вообще говоря, в среду Comsol Multiphysics включён отдельный модуль расчёта волновых электромагнитных полей относительно векторного магнитного потенциала с учётом его второй производной по времени, однако в данном модуле имеется ограничение в виде задания внешнего воздействия только с сосредоточенными параметрами.

Геометрия двумерной осесимметричной модели и расчётная сетка приведены на рис. 5.

В качестве внешнего воздействия задаётся потенциал на конце заземлителя, который находится на поверхности земли:

$$U(t) = 200 \cdot 10^3 \left(e^{-t/(0.5 \cdot 10^{-6})} - e^{-t/(67 \cdot 10^{-6})} \right).$$

На удалённой границе грунта задаётся нулевой потенциал. На верхней границе грунта задаётся равенство нулю нормальной компоненты плотности тока. На всех внешних границах расчётной области нормальная составляющая векторного магнитного потенциала равна нулю.

Расчётная сетка вертикального заземлителя выполнена при помощи метода Swept - последовательное вытягивание плоской сетки, предварительно построенной на торце заземлителя, вдоль его длины на определённые промежутки.

Результаты моделирования и анализ

Моделирование проведено для вертикальных заземлителей двух длин 5 м и 20 м в грунтах с удельными сопротивлениями ρ в диапазоне от 500 Ом·м до 2500 Ом·м и относительными диэлектрическими проницаемостями ϵ_r в диапазоне от 1 до 25. По результатам моделирования вычислен ток стекающий в заземлитель, путём интегрирования нормальной компоненты полной плотности токи на верхней границе заземлителя. На рис. 6 представлен ток стекающий с заземлителя, длиной 5 м. По полученным зависимостям видно, что увеличение диэлектрической проницаемости и/или увеличение удельного сопротивления грунта ведёт к лучшему проявлению волновых процессов в заземлителе. Это может быть объяснено тем, что увеличение диэлектрической проницаемости ведёт к увеличению доли тока смещения в полном токе, а увеличение удельного сопротивления ведёт к уменьшению доли тока проводимости в полном токе, стекающем с заземлителя. И то и другое приводит к увеличению влияния вторых производных по времени в уравнениях электромагнитного поля, которые описывают волновые процессы.

В рассматриваемом диапазоне параметров ρ и ϵ_r , максимальные значения составляют $\rho = 2500$ Ом·м и $\epsilon_r = 25$, при которых волновые процессы наиболее выражены, см. рис. 6в, синяя

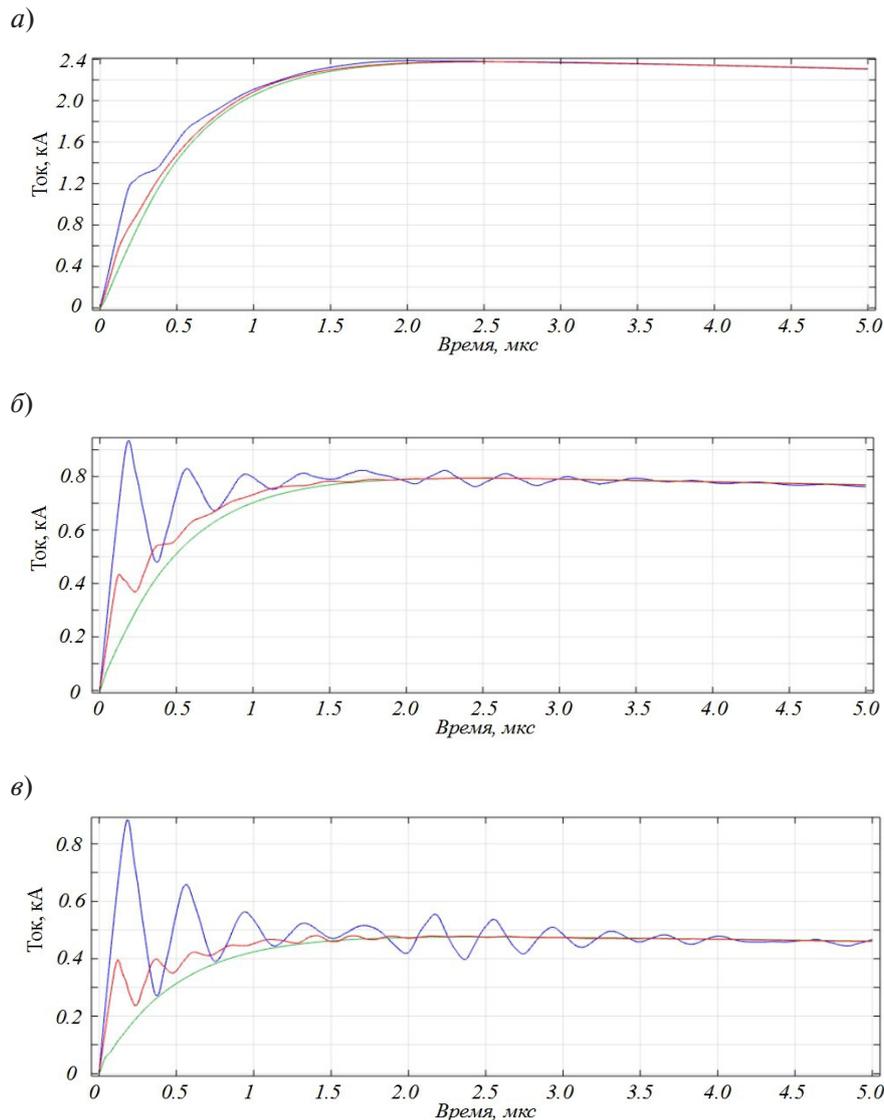


Рис. 6. Результаты моделирования стекания тока с вертикального заземлителя, длиной 5 м, при грозовом импульсе напряжения и разных значениях удельного сопротивления ρ и диэлектрической проницаемости ϵ грунта: а) $\rho = 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, б) $\rho = 1500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, в) $\rho = 2500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; зелёная кривая – $\epsilon_r = 1$, красная – $\epsilon_r = 10$, синяя $\epsilon_r = 25$.

Fig. 6. Results of modeling the current flow from a vertical ground electrode, 5 m long, under the action of the lightning voltage pulse and different values of the resistivity ρ and dielectric constant ϵ_r of the soil: а) $\rho = 500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, б) $\rho = 1500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, в) $\rho = 2500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$; green curve – $\epsilon_r = 1$, red – $\epsilon_r = 10$, blue $\epsilon_r = 25$

кривая. Расстояние между экстремумами кривой составляет 0,1(6) мкс, что соответствует времени пробега электромагнитной волны по заземлителю, длиной 5 м, туда и обратно со скоростью $v = (\epsilon\mu)^{-1/2} = 60 \text{ м/мкс}$. В момент времени 1,(6) мкс видно наложение электромагнитной волны, отражённой от удалённой расчётной граница грунта, находящейся на расстоянии 50 м от заземлителя.

Для сравнения на рис. 7 представлены результаты стекания тока с заземлителя 20 м. По данным графикам так же видно, что с увеличением диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления грунта волновые процессы наблюдаются более явно. Для случая наиболее выраженного волнового процесса ($\rho = 2500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $\epsilon_r = 25$) время между экстремумами тока составляет 0,(6) мкс, что так же соответствует времени пробега электромагнитной волны вдоль заземлителя и обратно.

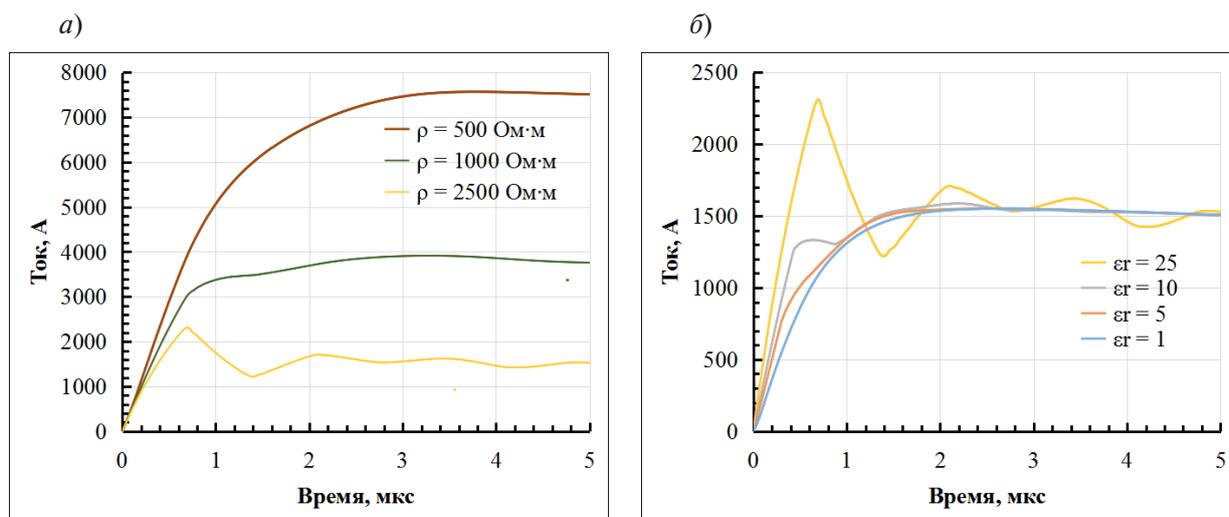


Рис. 7. Результаты моделирования стекания тока с вертикального заземлителя, длиной 20 м, при грозовом импульсе напряжения и разных значениях удельного сопротивления ρ и диэлектрической проницаемости ϵ грунта: а) $\epsilon_r = 25$, б) $\rho = 2500$ Ом·м

Fig. 7. Results of modeling the current flow from the vertical ground electrode, 20 m long, under the action of the lightning voltage impulse and different values of the resistivity ρ and dielectric constant ϵ of the soil: а) $\epsilon_r = 25$, б) $\rho = 2500$ Ohm·m

Сравнение графиков рис. 6, 7 свидетельствует о том, что частота колебательной высокочастотной составляющей тока, стекающего с заземлителя, зависит от длины электрода и уменьшается с увеличением длины.

Заключение

Стеkanie тока в ЗУ при грозовом воздействии зависит от электрофизических свойств грунта и геометрии заземлителей. В случае высоких диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления грунта могут наблюдаться волновые процессы, которые проявляются в виде колебательной высокочастотной составляющей тока, стекающего с заземлителя. Частота этих колебаний в однородном грунте увеличивается с уменьшением длины одиночного вертикального заземлителя. Данные высокочастотные колебания определяют характер переходного сопротивления ЗУ и могут повлиять на эффективность защитных мероприятий с использованием, например, нелинейных ограничителей перенапряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. Москва: Энергия, 1978.
 [2] Baba Y., Rakov V.A. On the interpretation of ground reflections observed in small-scale experiments simulating lightning strikes to towers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005. № 3(47). С. 533–542. DOI: 10.1109/TEMC.2005.852220
 [3] Lima A.B., Paulino J.O.S., Boaventura W.C., Guimaraes M.F. Transient ground impedance measurement using a very short current lead // 2013 International Symposium on Lightning Protection, SIPDA 2013. 2013. С. 177–183. DOI: 10.1109/SIPDA.2013.6729242
 [4] Karaki S., Yamazaki T., Nojima K., Murase H., Takahashi H., Kojima S., Yokota T. Transient Impedance Of Gis Grounding Grid // IEEE Transactions on Power Delivery. 1995. № 2(10). С. 723–731. DOI: 10.1109/61.400859

- [5] Lima A.B., Paulino J.O.S., Boaventura W.C., Lopes I.J.S., Guimarães M.F., Chisholm W.A., Jamali B., Bologna F. Transient grounding impedance and transient resistivity measurements using a very short current lead // *Electric Power Systems Research*. 2015. (118). С. 69–75. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.05.014
- [6] Korovkin N.V., Krivosheev S.I., Shishigin D.S., Minevich T.G., Boronin V.N. Mathematical modelling of grounding systems under impact of pulse currents // *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018*. 2018. (2018-January). С. 686–691. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317187
- [7] Adamyan Y.E., Kolodkin I.S., Krivosheev S.I., Magazinov S.G., Titkov V.V., Iakushov K.V. A relation of the parameters of grounding device with the level of over-voltage when a surge arrester triggered // *Proceedings – 2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2020*. 2020. DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269253
- [8] Правила устройства электроустановок. Издание 7.
- [9] ГОСТ Р 58882-2020 «Заземляющие устройства. Системы уравнивания потенциалов. Заземлители. Заземляющие проводники».
- [10] International Electrotechnical Commission. IEC 62305 – Protection against lightning 2013.
- [11] Schmitt H., Winter W. Simulation of Lightning Overvoltages in Electrical Power Systems // *International Conference on Power Systems Transients*. 2001. No. 1. P. 6.
- [12] Reza S., Javad G. The effect of grounding system modeling on lightning-related studies of transmission lines // *Journal of Applied Research and Technology*. 2017. № 6(15). С. 545–554.
- [13] Harid N. Experimental Investigation of Impulse Characteristics of Transmission Line Tower Footings // *Journal of Lightning Research*. 2012. № 1(4). С. 36–44. DOI: 10.2174/1652803401204010036
- [14] Fujita Y., Morii H., Kubo T. A method for reducing grounding impedance // *Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi)*. 2013. № 1(185). С. 27–35. DOI: 10.1002/ej.22405
- [15] Герасимович Д.А., Дерюгина Е.А. Математическое моделирование импульсных характеристик вертикальных стержневых заземлителей // *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика: междунар. науч.-техн. жур.* 2012. (1). С. 5–8.
- [16] Adamyan Y.E., Krivosheev S.I., Kolodkin I.S., Magazinov S.G., Ochovskaya J.K. Features of Grounding System Modeling under Lightning Impact // *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021*. 2021. С. 1345–1348. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396667
- [17] Кривошеев С.И., Бочаров Ю.Н., Коровкин Н.В., Нетреба К.И., Шишигин С.Л. Идентификация RLC параметров заземляющих устройств опор воздушных линий м тросом импульсным методом // *труды кольского научного центра РАН*. 2010. № 1(1). С. 26–32.
- [18] Новикова А.Н., Лубков А.Н., Шмараго О.В., Галкова Л.И., Бельцер В.Р., Прохореня О.А., Кривошеев С.И., Ненашев А.П., Арфентьев А.А. Анализ результатов измерений сопротивления заземления опор ВЛ с тросом при модернизации заземляющих устройств // *Электрические станции*. 2007. (9). С. 53–59.
- [19] Adamian Y.E., Krivosheev S.I., Korovkin N. V., Monastyrsky A.E., Bocharov Y.N., Kolodkin I.S., Kuli-gin P.I., Titkov V. V. Dependence of over-voltage level of different voltage class surge arrestors on grounding device parameters. Experimental study and simulation // *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*. 2016. (2016-December). С. 1888–1892. DOI: 10.1109/APPEEC.2016.7779817
- [20] Korobeynikov S., Ilushov N., Krivosheev S., Loman V., Magazinov S. Suppression of Incoming High-Frequency Overvoltage in Transformer Coils // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020. С. 1–1. DOI: 10.1109/tpwr.2020.3031592

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КРИВОШЕЕВ Сергей Иванович — профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.
E-mail: ksi.mgd@gmail.com

КОЛОДКИН Иван Сергеевич — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: is.kolodkin@gmail.com

МАГАЗИНОВ Сергей Геннадьевич — ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
E-mail: magazinov_sg@mail.ru

ОЧКОВСКАЯ Юлия Константиновна — студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: o.julya13@yandex.ru

РЕЗНИКОВА Анастасия Дмитриевна — студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: reznikova.anastasia97@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 05.07.2021

REFERENCES

- [1] **Ye. Ya. Ryabkova**, Zazemleniya v ustanovkakh vysokogo napryazheniya [Grounding in high voltage installations]. Moskva: Energiya, 1978.
- [2] **Y. Baba, V.A. Rakov**, On the interpretation of ground reflections observed in small-scale experiments simulating lightning strikes to towers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005. № 3(47). S. 533–542. DOI: 10.1109/TEMC.2005.852220
- [3] **A.B. Lima, J.O.S. Paulino, W.C. Boaventura, M.F. Guimaraes**, Transient ground impedance measurement using a very short current lead // 2013 International Symposium on Lightning Protection, SIPDA 2013. 2013. S. 177–183. DOI: 10.1109/SIPDA.2013.6729242
- [4] **S. Karaki, T. Yamazaki, K. Nojima, H. Murase, H. Takahashi, S. Kojima, T. Yokota**, Transient Impedance Of Gis Grounding Grid // IEEE Transactions on Power Delivery. 1995. № 2(10). S. 723–731. DOI: 10.1109/61.400859
- [5] **A.B. Lima, J.O.S. Paulino, W.C. Boaventura, I.J.S. Lopes, M.F. Guimarães, W.A. Chisholm, B. Jamali, F. Bologna**, Transient grounding impedance and transient resistivity measurements using a very short current lead // Electric Power Systems Research. 2015. (118). S. 69–75. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.05.014
- [6] **F. Korovkin, S.I. Krivosheev, D.S. Shishigin, T.G. Minevich, V.N. Boronin**, Mathematical modelling of grounding systems under impact of pulse currents // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018. 2018. (2018-January). S. 686–691. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317187
- [7] **Y.E. Adamyan, I.S. Kolodkin, S.I. Krivosheev, S.G. Magazinov, V.V. Titkov, K.V. Iakushov**, A relation of the parameters of grounding device with the level of over-voltage when a surge arrester triggered // Proceedings – 2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2020. 2020. DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269253
- [8] **Pravila ustroystva elektroustanovok. Izdaniye 7** [Electrical installation rules. Edition 7].

- [9] GOST R 58882-2020 «Zzemlyayushchiye ustroystva. Sistemy uravnivaniya potentsialov. Zazemliteniye. Zzemlyayushchiye provodniki [Grounding devices. Potential equalization systems. Earthing switches. Grounding conductors]».
- [10] International Electrotechnical Commission. IEC 62305 – Protection against lightning 2013.
- [11] **H. Schmitt, W. Winter**, Simulation of Lightning Overvoltages in Electrical Power Systems // International Conference on Power Systems Transients. 2001. № 1. S. 6.
- [12] **S. Reza, G. Javad**, The effect of grounding system modeling on lightning-related studies of transmission lines // Journal of Applied Research and Technology. 2017. № 6(15). S. 545–554.
- [13] **N. Harid**, Experimental Investigation of Impulse Characteristics of Transmission Line Tower Footings // Journal of Lightning Research. 2012. № 1(4). S. 36–44. DOI: 10.2174/1652803401204010036
- [14] **Y. Fujita, H. Morii, T. Kubo**, A method for reducing grounding impedance // Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi). 2013. № 1(185). S. 27–35. DOI: 10.1002/eej.22405
- [15] **D.A. Gerasimovich, Ye.A. Deryugina**, Matematicheskoye modelirovaniye impulsnykh kharakteristik vertikalnykh sterzhnevnykh zazemliteley // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obyedineniy SNG. Energetika: mezhdunar. nauch.-tekhn. zhur. 2012. (1). S. 5–8.
- [16] **Y.E. Adamyan, S.I. Krivosheev, I.S. Kolodkin, S.G. Magazinov, J.K. Ochovskaya**, Features of Grounding System Modeling under Lightning Impact // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021. 2021. S. 1345–1348. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396667
- [17] **S.I. Krivosheev, Yu.N. Bocharov, N.V. Korovkin, K.I. Netroba, S.L. Shishigin**, Identifikatsiya RLC parametrov zzemlyayushchikh ustroystv opor vozduzhnykh liniy m trosom impulsnym metodom // trudy kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. 2010. № 1(1). S. 26–32.
- [18] **A.N. Novikova, A.N. Lubkov, O.V. Shmarago, L.I. Galkova, V.R. Beltser, O.A. Prokhorenya, S.I. Krivosheev, A.P. Nenashev, A.A. Arfentyev**, Analiz rezultatov izmereniy soprotivleniya zazemleniya opor VL s trosom pri modernizatsii zzemlyayushchikh ustroystv // Elektricheskiye stantsii. 2007. (9). S. 53–59.
- [19] **Y.E. Adamian, S.I. Krivosheev, N.V. Korovkin, A.E. Monastyrsky, Y.N. Bocharov, I.S. Kolodkin, P.I. Kuligin, V.V. Titkov**, Dependence of over-voltage level of different voltage class surge arrestors on grounding device parameters. Experimental study and simulation // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC. 2016. (2016-December). S. 1888–1892. DOI: 10.1109/APPEEC.2016.7779817
- [20] **S. Korobeynikov, N. Ilushov, S. Krivosheev, V. Loman, S. Magazinov**, Suppression of Incoming High-Frequency Overvoltage in Transformer Coils // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. S. 1–1. DOI: 10.1109/tpwr.2020.3031592

THE AUTHORS

KRIVOSHEEV Sergey I. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: ksi.mgd@gmail.com

KOLODKIN Ivan S. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: is.kolodkin@gmail.com

MAGAZINOV Sergey G. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: magazinov_sg@mail.ru

OCHKOVSKAYA Julia K. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: o.julya13@yandex.ru

REZNIKOVA Anastasiya D. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: reznikova.anastasia97@gmail.com

Received: 05.07.2021

DOI: 10.18721/JEST.27304

УДК 621.311

*В.В. Колобов, М.Б. Баранник, В.В. Ивонин*Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,
г. Апатиты, Мурманская обл., Россия

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТРОЙСТВ РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЯХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

В статье представлена недорогая система мониторинга состояния находящихся в эксплуатации металлооксидных ограничителей перенапряжений (ОПН). Разработанная система объединяет два метода, используемых в настоящее время для оценки состояния ограничителей перенапряжений – регистрацию разрядных токов, протекающих через ОПН под воздействием перенапряжений, и комплексный анализ тока утечки. В состав системы входит комплект датчиков – преобразователей тока проводимости с функцией регистрации импульсных токов (ПТПР) – и один измерительный блок. ПТПР измеряет величину заряда, переносимого импульсом разрядного тока, осуществляет пороговую селекцию импульсов, регистрирует дату и время. Данные регистрации сохраняются в энергонезависимой памяти. Измерительный блок системы, подключаемый последовательно к каждому ПТПР, считывает зарегистрированные данные, а также выполняет комплексный анализ тока проводимости ОПН – выделяет активную составляющую полного тока, определяет фазовый угол между приложенным к ограничителю напряжением и первой гармоникой тока проводимости, осуществляет гармонический анализ тока утечки. В качестве опорного сигнала используется напряжение одной из фаз измерительного трансформатора напряжения подстанции, поступающее по радиоканалу от передающего блока системы. Разработанная система мониторинга состояния ОПН была установлена на нескольких распределительных подстанциях. Многолетняя опытная эксплуатация системы показала, что комплексный анализ тока проводимости позволяет не только выявлять ухудшение технического состояния ОПН, но и определять причины деградации характеристик защитного аппарата. Данные регистрации разрядных токов предоставляют полезную информацию о частоте и интенсивности грозовых и коммутационных перенапряжений, возникающих на конкретном участке сети, эффективности работы ОПН и количестве энергии, поглощенной ОПН за время эксплуатации. В статье рассмотрены принцип работы, технические характеристики и аппаратная реализация предлагаемой системы. Представлены результаты опытной эксплуатации.

Ключевые слова: металлооксидные ограничители перенапряжений, диагностика, регистратор импульсов, импульсные токи, анализ тока проводимости.

Ссылка при цитировании:

Колобов В.В., Баранник М.Б., Ивонин В.В. Опыт эксплуатации устройств регистрации импульсных токов в нелинейных ограничителях перенапряжений // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 3. С. 39–49. DOI: 10.18721/JEST.27304

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

V.V. Kolobov, M.B. Barannik, V.V. Ivonin

NERC KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia

EXPERIENCE OF OPERATING A CONDITION MONITORING SYSTEM FOR METAL-OXIDE SURGE ARRESTERS

The paper presents a low-cost system for monitoring the condition of metal-oxide surge arresters (MOSAs) in service. The developed system integrates two methods currently used for evaluating the condition of surge arresters: registration of transient overvoltages experienced by a MOSA and analysis of leakage current. The system includes a set of sensors, a surge counters equipped with leakage current sensors (SCLCS), and one measuring unit. The SCLCS measures the current pulse charge, performs threshold selection of pulses, and registers the date and time. The registration data is stored in non-volatile memory. A measurement module connected successively to each SCLCS reads the registered data and also performs a comprehensive analysis of the MOSA leakage current: it identifies the resistive component of the total current; determines the phase angle between the voltage applied to the surge arrester and the first harmonic of the leakage current; performs a harmonic analysis of the leakage current. The voltage of one of the phases of a substation potential transformer is used as a reference signal, which is received via the radio channel from the transmitting unit of the system. The developed system for monitoring the condition of metal-oxide surge arresters was installed at several distribution substations. Long-term pilot operation of the system has shown that a comprehensive analysis of the leakage current allows not only to identify the deterioration of the technical condition of the MOSA, but also to determine the causes of degradation of the characteristics of the protective device. Data obtained by a SCLCS provides useful information on lightning and switching transient overvoltages arising in a particular network segment, the efficiency of the arrester operation, and the amount of energy absorbed by the MOSA. The paper describes the hardware implementation, operational principles, and main technical specifications of the proposed system. The results of the pilot testing of the system are presented.

Keywords: metal oxide surge arrester; condition monitoring; surge counter; discharge currents; the charge of surge current; leakage current analysis.

Citation:

V.V. Kolobov, M.B. Barannik, V.V. Ivonin, Experience of operating a condition monitoring system for metal-oxide surge arresters, Materials Science. Power Engineering, 27 (03) (2021) 39–49, DOI: 10.18721/JEST.27304

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Metalloоксидные ограничители перенапряжений (ОПН) используются для защиты оборудования и функциональных компонентов подстанций и линий электропередачи от грозовых и коммутационных перенапряжений [1]. Соответственно, периодический контроль или мониторинг состояния ОПН позволяет вовремя выявить их неисправность и, тем самым, повысить надёжность функционирования энергосистемы в целом [2].

В настоящее время на высоковольтных подстанциях наиболее распространёнными методами диагностики состояния ОПН под рабочим напряжением являются: тепловизионный контроль; измерение и анализ тока проводимости; регистрация импульсных токов, протекающих через ОПН под воздействием грозовых и коммутационных перенапряжений [3].

Тепловизионный контроль позволяет быстро выявить ОПН с аномально нагретыми зонами, но для выяснения причин локального нагрева используются другие методы диагностики, как правило, измерение активной составляющей тока утечки.

Периодическое изменение активной составляющей тока проводимости и контроль ее изменения за время эксплуатации ОПН является эффективным и информативным методом диагностики состояния ОПН, так как он позволяет выявить ухудшение защитных свойств ОПН, обусловленных такими причинами, как: деградация вольт-амперных характеристик (ВАХ) оксидно-цинковых элементов; увлажнение внутренней поверхности корпуса ОПН вследствие его разгерметизации; загрязнение внешней поверхности корпуса ОПН [4].

Защитные характеристики современных ОПН не ухудшаются из-за длительного воздействия рабочего напряжения, а ВАХ их варисторов не деградируют из-за химических реакций с окружающей атмосферой. Деградация общей ВАХ современных типов ОПН преимущественно происходит под воздействием импульсных разрядных токов.

Для регистрации разрядных токов используются устройства, включаемые между нижним изолированным фланцем ОПН и заземляющим устройством подстанции, с различной функциональностью – от простых пороговых счетчиков импульсов, до систем мониторинга, регистрирующих форму импульсов и энергетические параметры разрядных токов.

В ЦЭС КНЦ РАН была разработана недорогая автономная и портативная система мониторинга состояния ОПН в процессе эксплуатации. Система позволяет осуществлять «онлайн» мониторинг разрядных токов с разделением импульсов по величине заряда и проводить периодический контроль активной составляющей и гармонического состава полного тока проводимости ОПН.

Структура и принцип работы системы

В состав системы диагностики состояния ОПН в процессе эксплуатации в общем случае входит несколько датчиков – преобразователей тока проводимости ОПН с функцией регистрации импульсных токов (ПТПР), и один общий измерительный блок [5]. ПТПР устанавливаются на ограничители перенапряжений подстанции и в автономном режиме регистрируют разрядные импульсы тока через ОПН, сохраняя данные регистрации в энергонезависимой памяти. Измерительный блок предназначен для считывания данных из памяти каждого ПТПР, а также для измерения активной составляющей и гармонического состава полного тока утечки ОПН с использованием трансформатора тока (ТТ2 на рис. 1), входящего в состав ПТПР, в качестве первичного датчика тока проводимости ОПН.

Первоначально ПТПР находится в «спящем» режиме, в котором функционируют только часы реального времени. При возникновении перенапряжения на ОПН и, соответственно, прохождении импульса разрядного тока через трансформатор тока 1 (ТТ1 на рис. 1), во вторичной обмотке возникает импульс тока, повторяющий форму разрядного импульса тока. Так как этот импульс может иметь разную полярность, то он подается на схему выпрямления. С выхода схемы выпрямления импульс тока положительной полярности поступает параллельно на входы двух интеграторов (ИНТ). На выходе ИНТ1 и ИНТ2 формируются постоянные напряжения, уровень которых определяется зарядом импульса тока на входе ИНТ и постоянными времени интеграторов τ_{i1} и τ_{i2} . ИНТ1 является дискриминатором порогового уровня. Если заряд импульса тока через ОПН превышает порог в 25 мкКл (такой заряд имеет грозовой импульс тока 8/20 мкс с амплитудой 1.25 А или импульс тока 30/60 мкс с амплитудой 0.45 А), то выходное напряжение ИНТ1 переводит ПТПР в режим измерения заряда импульса тока через ОПН. ИНТ2 является измерительным. Напряжение $U_{\text{ИНТ2}}$ подается на 10-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

ПТПР позволяет измерять заряд импульса тока в диапазоне 25 мкКл – 200 мКл. Кроме того устройство выполняет селекцию зарегистрированных импульсов тока, а именно, отдельно подсчитывается количество импульсов тока несущие заряд превышающим порог в 25 мКл. Такой заряд соответствует грозовому импульсу тока 8/20 мкс с амплитудой 1250 А или импульсу тока 30/60 мкс с амплитудой 450 А.

Отметим, что часы реального времени определяют время с точностью до одной секунды. Когда происходит регистрация импульса тока, текущее значение времени сохраняется в памяти. За оставшийся временной интервал до увеличения значения текущего времени на одну секунду, могут быть зарегистрированы еще несколько импульсов тока, время регистрации которых будет совпадать с первым импульсом. Поэтому для всех импульсов, зарегистрированных в пределах одной секунды, вводится обозначение «событие». За время начала «события» принимается показания часов реального времени, зафиксированные для первого импульса в «событии». При увеличении значения единиц секунд, последующие импульсы считаются относящимися к новому «событию». Подробнее определение «события» и поясняющие временные диаграммы приведены в [6].

После перехода ПТПР в «спящий» режим в памяти устройства сохраняется следующая информация о «событии»: порядковый номер «события»; дата и время «события»; общее количество

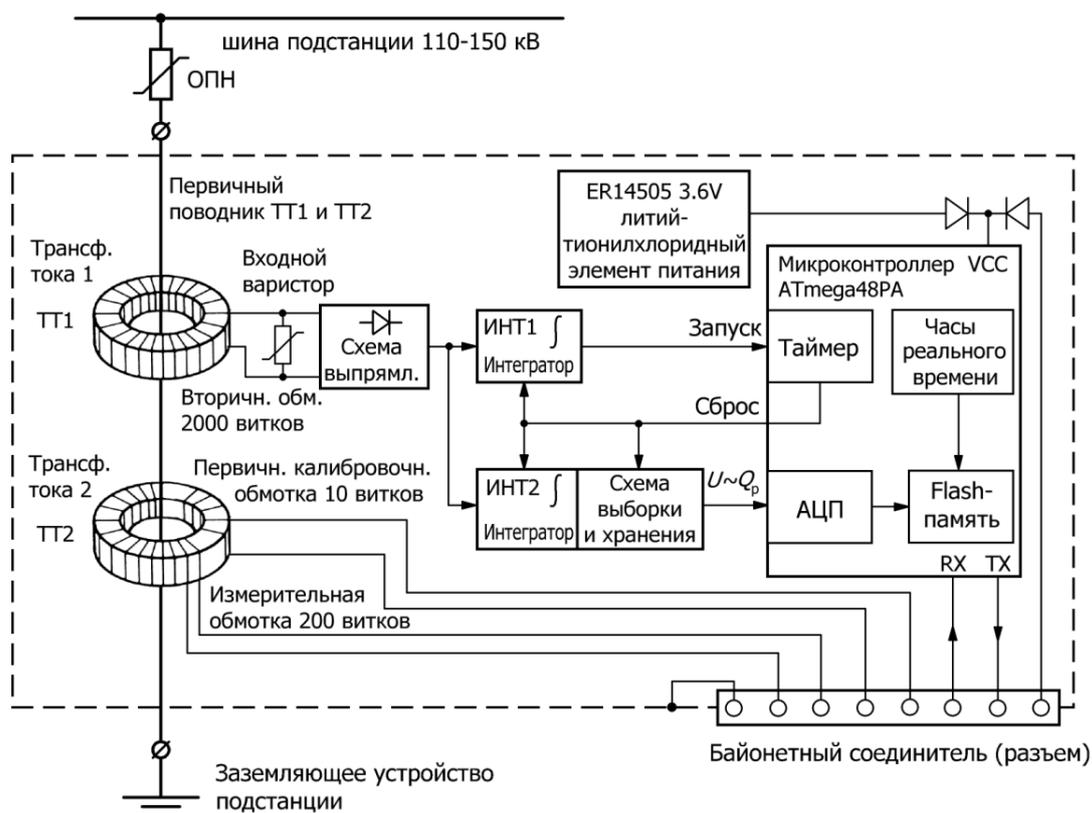


Рис. 1. Структурная схема преобразователя тока проводимости ОПН с функцией регистрации импульсных токов (ПТПР)

Fig. 1. Functional block diagram of the surge counter with integrated leakage current sensor (SCLCS)

импульсов в «событии» (для всех импульсов в «событии» $Q \geq 25$ мкКл) и количество импульсов из них, для которых $Q \geq 25$ мкКл; суммарный заряд всех импульсов тока в «событии».

Также в памяти ПТПР хранится идентификационный номер устройства и суммарная информация о зарегистрированных разрядных токах через ОПН: количество зарегистрированных «событий» за время работы ПТПР; количество разрядных импульсов тока зарегистрированных за все время; количество импульсов, для которых $Q \geq 25$ мкКл; величина суммарного заряда Q_{Σ} , перенесенного импульсами тока через ОПН за все время регистрации.

Как видно из рис. 1, большинство функциональных узлов ПТПР, таких как часы реального времени, АЦП, таймер, FLASH-память, входят в состав микроконтроллера (МК) устройства. Питание ПТПР осуществляется от литий-тионил хлоридного элемента ER14505 напряжением 3.6 В и емкостью 2400 мА·ч. Прогнозируемое время работы ПТПР от одного элемента питания составляет 8-10 лет.

Трансформаторы тока и печатная плата с электронными компонентами размещены в металлическом герметичном корпусе. Для разработанных ПТПР были использованы корпуса от датчиков тока проводимости, которыми оснащались ОПН первого поколения.

Внизу на корпусе ПТПР расположен многывыводный байонетный разъем, выводы которого соединены с выводами микроконтроллера. Также выводы разъема соединены с измерительной и калибровочной вторичными обмотками трансформатора тока, который используется как первичный датчик для измерения тока проводимости ОПН.

Для отображения хранящейся в памяти ПТПР информации используется измерительный блок системы диагностики состояния ОПН в процессе эксплуатации «СКАТ» [7]. Измерительный модуль подключается с помощью интерфейсного кабеля к разъему ПТПР и информация о результатах регистрации импульсных токов через ОПН отображается на дисплее измерительного блока. При этом МК ПТПР питается от источника питания измерительного модуля.

Рассмотрим результаты опытной эксплуатации преобразователя тока проводимости с функцией регистрации импульсов тока, проходящих через ОПН, на примере нескольких устройств, установленных на подстанциях ПС-30, ПС-112 и ПС-203А [8] в начале грозового сезона 2014 г.

На ПС-30 были установлены шесть регистраторов – на ОПН каждой фазы первой и второй системы шин 150 кВ. Установленные устройства позволяли регистрировать импульсные токи, протекающие через ОПН под воздействием грозовых и коммутационных перенапряжений, возникающих на системах шин 150 кВ ПС-30 и линиях Л-153, Л-154. Двухцепная линия Л 153/154 соединяет ПС Выходной и ПС-11А с отпайкой на ПС-30 Оленегорск.

Проанализируем результаты регистрации импульсных токов через ОПН 2-ой системы шин 150 кВ ПС-30, приведенные в табл. 1.

16 апреля регистратором зафиксированы поочередные срабатывания ОПН каждой из фаз 2-ой системы шин. ПС-30 (№ 1-3 в табл. 1). Зарегистрированные импульсные токи через ОПН объясняются перенапряжениями на Л-154, возникшими в ходе исследований, проводимых 16 апреля 2014 г. ЦЭС КНЦ РАН на ПС-11А. Целью исследований являлось получение экспериментальных данных по перенапряжениям на изоляции выключателей на подстанции ПС-11А, возникающих при отключении ненагруженной линии Л-154 под рабочим напряжением.

После обработки результатов опытов было установлено, что выключения ненагруженной линии не сопровождались вторичными пробоями в камерах выключателей а, следовательно, не возникали перенапряжения на Л-154, тогда как опыты включения приводили к возникновению перенапряжений на линии и, соответственно, на ОПН. По осциллограммам напряжений были определены точные времена подачи тока в линию и амплитуды коммутационных импульсов [9]. При коммутации в 16:58:31 максимальную амплитуду имел коммутационный импульс на фазе А, в 17:08:12 – на фазе С, в 17:24:37 – на фазе В, что приводило к срабатыванию ОПН соответствующей фазы (№ 1-3 в табл. 1). Кроме того, эти коммутационные перенапряжения на линии Л-154 были записаны регистратором геоиндуктированных токов, установленным в нейтрали АТ 2 330/150кВ ПС Выходной [9, 10].

28 июля зафиксированы импульсы тока через ОПН фазы В и фазы А с зарядом 1.65 мКл и 0.47 мКл соответственно (№ 12-13 в табл. 1). В этот день наблюдалась грозовая активность, соответственно регистратор зафиксировал импульсные токи через ОПН от грозовых перенапряжений на линии Л-154. Это подтверждают и осциллограммы, полученные регистратором ГИТ, установленным на ПС Выходной [9]. Форма тока в нейтрали АТ-2 на осциллограммах – период промышленной частоты – свидетельствует о том, что на линии вследствие удара молнии произошло перекрытие изоляции на землю и короткое замыкание с последующим отключением линии, что подтверждается диспетчерской документацией.

Другое грозовое перенапряжение на Л-154 с последующим срабатыванием ОПН фазы А, зафиксированное 8 августа в 20:52:53 (№ 14 в табл. 1), также совпадает по времени с импульсом тока, записанным регистратором ГИТ на ПС Выходной. Форма тока показывает, что отключения линии не произошло. Это подтверждается и диспетчерской документацией.

Результаты регистрации импульсных токов через ОПН первой системы шин ПС-30 (линия Л-153) приведены в табл. 2.

27 июня 2014 года зафиксированы многократные срабатывания ОПН фазы С. Эти импульсы тока объясняются процессом выхода из строя с последующим разрушением конструкции ОПН фазы С. Как выяснилось впоследствии, причиной аварии послужило попадание влаги на вну-

тренную поверхность оболочки ОПН вследствие разгерметизации конструкции (в течение всего дня 27 июня в Оленегорске наблюдались осадки в виде дождя). В период времени с 20:29:11 по 21:28:13 регистратор зафиксировал 360 «событий», позволяющих «проследить» процесс выхода ОПН из строя.

Таблица 1

**Результаты регистрации импульсных токов через ОПН
трех фаз 2^{-ой} системы шин 150 кВ ПС-30 (линия Л-154)**

Table 1

**Results of registration of pulse currents through the surge arresters
of three phases of the 2nd bus system 150 kV PS-30 (line L-154)**

№	Дата	Время	Общее число импульсов, фаза	Число имп. заряд более 25 мКл	Заряд, прошедший через ОПН (мКл)			Установленная причина импульсных токов через ОПН
					А	В	С	
1	16.04.14	16:58:31	1А		0.47	–	–	Включение выключателей на ПС-11А
2	16.04.14	17:08:12	1С		–	–	1.18	
3	16.04.14	17:24:37	1В		–	4.25	–	
4	06.05.14	06:06:44	2А, 2В, 1С		0	0	0	Коммутационные перенапряжения на 2-ой системе шин
5	06.05.14	06:12:53	2В		–	0	–	
6	06.05.14	15:26:55	2В, 1С		–	0	0	
7	28.06.14	00:22:51	79А, 120В, 56С		0	0.95	0	
8	01.07.14	17:05:52	22А, 236В, 25С		0	0.47	0	
9	08.07.14	16:20:46	25А, 23В	5В	4.73	293.0	–	
10	08.07.14	16:21:44	29А, 2В, 10С		133.2	0	37.11	
11	09.07.14	14:47:25	2В, 1С		–	0	0	
12	28.07.14	17:17:42	1В		–	1.65	–	Попадание молнии в Л-154
13	28.07.14	17:20:24	1А		0.47	–	–	
14	08.08.14	20:52:53	1А		0.24	–	–	Коммутационные перенапряжения на 2-ой системе шин
15	21.08.14	10:31:57	22А, 53В		0	0	–	
16	22.09.14	06:19:11	2А, 2В, 1С		0	0	0	
17	26.09.14	15:16:12	10А, 46В		0	0	–	
18	26.09.14	19:35:30	1В		–	0	–	
19	26.09.14	19:48:28	1В		–	0	–	

В течение всего указанного периода времени через ОПН протекали импульсные токи, вызванные не приводящими к короткому замыканию пробоями по увлажненной внутренней поверхности оболочки ОПН. В одном «событии» количество импульсов составляло от 1 до 7, а их суммарный заряд достигал 0.47 мКл. Величина заряда импульсов имела случайное распределение по времени и не увеличивалась. Интервал между «событиями» составлял от единиц до нескольких десятков секунд. Большие интервалы могут объясняться тем, что образовавшийся проводящий канал на внутренней поверхности оболочки ОПН успевал подсыхать за время серии незавершившихся разрядов. Из-за большого количества эти «события» в табл. 2 не приведены. На последней минуте (21:28) частота следования «событий» увеличилась – пробой происходили практически каждую секунду. За последнюю секунду (21:28:13) зафиксирован 21 импульс, 15 из которых имели

Таблица 2

**Результаты регистрации импульсных токов через ОПН
трех фаз 1^{-ой} системы шин 150 кВ ПС-30 (линия Л-153)**

Table 2

**Results of registration of pulse currents through the surge arresters
of three phases of the 1st bus system 150 kV PS-30 (line L-153)**

№	Дата	Время	Общее число импуль- сов, фаза	Число имп. заряд более 25 мКл	Заряд, прошедший через ОПН (мКл)			Установленная причина импульсных токов через ОПН
					А	В	С	
1	08.10.13	11:33:23	15А		0	–	–	Коммутационные перенапряжения на 2-ой системе шин
2	06.05.14	05:52:01	1А, 1В		0	0	–	
3	27.06.14	20:29:11– 21:28:13 360 событий	21С последнее событие	15С последнее событие	–	–	3606 последнее событие	Авария ОПН фазы С

Таблица 3

Результаты регистрации импульсных токов через ОПН линии ОЛ-156 ПС-112

Table 3

Results of registration of pulse currents through the surge arresters of PS-156 line OL-154

№	Дата	Время	Заряд, прошедший через ОПН (мКл)			Примечание	Установленная причина импульсных токов через ОПН
			фаза А	фаза В	фаза С		
1	07.06.14	18:19	–	0	–	Откл. Л-155, АПВ-успешный	Грозовые перенапряжения
2	07.06.14	18:47	–	9.22	0		
3	07.06.14	18:51	–	2.13	–	Откл. Л-155, АПВ-успешный	
4	07.06.14	18:52	0	0	0.24		
5	07.06.14	19:02	0	–	–		
6	07.06.14	19:14	–	–	0		
7	31.07.14	21:52	1.89	0.71	0.24		
8	14.08.14	18:34	0	1.89	–	Откл. Л-155, 156 АПВ-успешный	
9	15.08.14	18:03	5.91	6.85	38.76		

заряд более 25 мКл. Суммарный заряд последнего «события» составил более 3.6 Кл (№3 в табл. 2). Далее произошло разрушение ОПН.

Комплект из трех ПТПР был установлен также на ОПН 150 кВ линии ОЛ-156 (отпайка Л-156) подстанции ПС-112. Сразу отметим, что все срабатывания ОПН идентифицированы по причине возникновения и связаны с грозовыми перенапряжениями. При анализе результатов регистрации (табл. 3) использовалась информация об отключениях линий, предоставленная диспетчерской службой (приведена в столбце «примечания» таблицы). Большое количество «собы-

тий» 7 июня 2014 г. обусловлено сильной грозой в этот день. В 18:19 зарегистрировано попадание молнии в линию Л-155 с перекрытием изоляции и отключением линии с последующим успешным АПВ. При этом наведенное напряжение на Л-156 привело к срабатыванию ОПН фазы В, но импульс тока имел малый заряд (№1 в табл. 3). В 18:47 и в 18:52 регистратор импульсов срабатывал из-за грозового перенапряжения на фазе В и фазе С, соответственно (№2, 4 в табл. 3). По величине заряда импульсов можно заключить, что попадание молнии произошло в линию Л-156. В 18:51 сработал ОПН фазы В (№3 в табл. 3), что вызвано попаданием молнии в провод этой фазы линии Л-156. При этом произошло перекрытие изоляции и отключение линии с последующим успешным АПВ.

31.07.14 в 21:52 регистратор зафиксировал токи от грозового перенапряжения на линии, причем, судя по измеренной величине заряда импульса тока, попадание молнии произошло в провод фазы А, а ОПН других фаз сработали от наведенных напряжений (№7 в табл. 3). Грозовое перенапряжение на линии не вызвало перекрытия изоляции и отключения линии.

14.08.14 зафиксировано срабатывание ОПН фаз А и В от грозового перенапряжения. Это «событие» сопровождалось отключением обеих линий Л-155, 156 с последующим успешным АПВ (№8 в табл. 3).

15.08.14 в 18:34 зарегистрированы импульсные токи через ОПН всех фаз со значительным зарядом (№9 в табл. 3). Максимальный заряд – 38.76 мКл – прошел через ОПН фазы С, что свидетельствует о попадании молнии в провод этой фазы. ОПН остальных фаз сработали от наведенных напряжений. Грозовое перенапряжение на линии не привело к перекрытию изоляции и отключению линии.

Еще один комплект ПТПР был установлен на ОПН 150 кВ линии ОЛ-114 (отпайка Л-114) подстанции ПС-203А. Результаты регистрации токов приведены в табл. 4. Все срабатывания регистратора на ПС 203А также объясняются грозовой активностью.

Таблица 4

Результаты регистрации импульсных токов через ОПН линии ОЛ-114 ПС-203А

Table 4

Results of registration of pulse currents through the surge arresters of PS-203A line OL-114

№	Дата	Время	Заряд, прошедший через ОПН (мКл)			Примечание	Установленная причина импульсных токов через ОПН
			фаза А	фаза В	фаза С		
1	07.06.14	19:00	–	–	133.7	Откл. Л-114 АПВ-успешный	Грозовые перенапряжения
2	31.07.14	21:50	0	2.6	–	Откл. Л-114 АПВ-успешный	

Во время сильной грозы 7 июня в 19:00 зарегистрировано срабатывание ОПН фазы С ПС-203А со значительным зарядом импульса тока – 133.7 мКл (№3 в табл. 3). Причина – грозовое перенапряжение от попадания молнии в провод этой фазы линии Л 114. При этом произошло перекрытие изоляции и отключение линии с последующим успешным АПВ (№1 в табл. 4). Аналогичное явление зафиксировано в 21:52 во время грозы 31.07.14 (№2 в табл. 4), при этом, исходя из показаний регистратора, удар молнии пришелся в провод фазы В линии Л-114.

Сравнивая данные регистраторов, установленных на трех подстанциях, можно сделать заключение, что защищаемое ОПН оборудование ПС-30 подвержено как коммутационным, так и грозовым перенапряжениям, а причиной срабатывания ОПН подстанций ПС-112А и ПС-203А являются только грозовые перенапряжения.

Таким образом, опытную эксплуатацию преобразователя тока проводимости с функцией регистрации импульсов тока, проходящих через ОПН под воздействием грозовых и коммутационных перенапряжений, можно считать успешной.

Выводы

В статье описана разработанная недорогая, но многофункциональная система мониторинга состояния ОПН в ходе эксплуатации. Система обеспечивает два метода контроля состояния ОПН, а именно, регистрацию разрядных токов, вызванных грозовыми и коммутационными перенапряжениями, воздействующими на ОПН, и измерение активной составляющей и гармонического состава тока проводимости, протекающего через ОПН под воздействием приложенного рабочего напряжения.

Анализируя опыт эксплуатации в течение грозового сезона 2014 года двенадцати регистраторов ПТПР, установленных на трех подстанциях, можно заключить:

1. Разработанное устройство регистрирует импульсные токи через ОПН, вызванные как коммутационными, так и грозовыми перенапряжениями.

2. Информация о срабатывании ОПН, полученная с помощью устройства, позволяет убедиться в функционировании защитного аппарата и получить данные относительно интенсивности перенапряжений на соответствующем участке сети, защищаемом ОПН.

3. Информация, записанная регистратором, может помочь диагностировать причины возникновения перенапряжений, в том числе критических, приводящих к выходу защитного аппарата из строя. Анализируя данные регистратора можно восстановить процесс развития аварии в защитном аппарате.

4. Данные регистратора позволяют выявить защитные аппараты, подверженные частым или интенсивным импульсным воздействиям, и вовремя принять решение о выводе такого ОПН из эксплуатации. Аналогично, для ОПН, не подверженных интенсивному воздействию импульсных токов, может быть принято решение о продлении его эксплуатации, что в целом позволит обеспечить увеличение надежности работы оборудования подстанции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, IEEE Std C62.22-2009 (Revision of IEEE Std C62.22-1997), pp. 1–142, 3 July 2009.

[2] IEC Std 60099-5, Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations, edition 1.1, 2000.

[3] **Heinrich C., Hinrichsen V.** “Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks—comparison of existing and newly developed procedures,” in IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 16, no. 1, pp. 138–143, Jan. 2001.

[4] **Bokoro P.** “A review of leakage current-based condition monitoring techniques of Metal Oxide Surge Arresters,” in Proc. Int. Conf. on Power and Energy Systems (IASTED/AfricaPES), Gaborone, Botswana, Sept. 2016, pp. 388–393.

[5] **Barannik M., Kolobov V.** “System for Monitoring the Condition of Metal-Oxide Surge Arresters in Service,” 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEast-Con), 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271582

[6] **Баранник М.Б., Колобов В.В., Прокопчук П.И.** Разработка устройства регистрации импульсных токов протекающих через ОПН под воздействием коммутационных и грозовых перенапряжений в процессе эксплуатации // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Выпуск 6. — Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2013. — 115 с. С. 86–96.

[7] Баранник М.Б., Барбарович В.Ю., Дмитриев В.Л., Колобов В.В. Опыт калибровки и практической эксплуатации прибора для диагностики состояния ОПН типа СКАТ-3 // Приборы. 2011. № 11 (137). С. 40–45.

[8] Колобов В.В., Селиванов В.Н., Баранник М.Б. Опыт эксплуатации устройства регистрации импульсных токов через ОПН // V Российская конференция по молниезащите. Санкт-Петербург, 17-19 мая 2016 года: сборник докладов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 140–149.

[9] Колобов В.В., Баранник М.Б. Опыт эксплуатации устройства регистрации импульсных токов, протекающих через ОПН под воздействием коммутационных и грозовых перенапряжений // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Выпуск 9. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2014. – С. 13–26.

[10] Баранник М.Б., Данилин А.Н., Катькалов Ю.В., Колобов В.В., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Система регистрации геоиндуктированных токов в нейтралях силовых автотрансформаторов // Приборы и техника эксперимента. 2012. №1. С. 118–123.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЛОБОВ Виталий Валентинович – ведущий научный сотрудник, Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук.
E-mail: 1_i@mail.ru

БАРАННИК Максим Борисович – научный сотрудник, Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, без степени.
E-mail: maxbarien@mail.ru

ИВОНИН Виктор Владимирович – научный сотрудник, Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, без степени.
E-mail: v.ivonin@ksc.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 18.08.2021

REFERENCES

[1] IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, IEEE Std C62.22-2009 (Revision of IEEE Std C62.22-1997), pp. 1–142, 3 July 2009.

[2] IEC Std 60099-5, Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations, edition 1.1, 2000.

[3] C. Heinrich, V. Hinrichsen, “Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks-comparison of existing and newly developed procedures,” in IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 16, no. 1, pp. 138–143, Jan. 2001.

[4] P. Bokoro, “A review of leakage current-based condition monitoring techniques of Metal Oxide Surge Arresters,” in Proc. Int. Conf. on Power and Energy Systems (IASTED/AfricaPES), Gaborone, Botswana, Sept. 2016, pp. 388–393.

[5] M. Barannik, V. Kolobov, “System for Monitoring the Condition of Metal-Oxide Surge Arresters in Service,” 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEast-Con), 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271582

[6] М.В. Баранник, В.В. Колобов, Р.И. Прокопчук, Разработка устройства регистрации импульсных токов протекающих через ОПН под воздействием коммутационных и грозовых перенапряжений в процессе эксплуатации // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Выпуск 6. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2013. – 115 с. С. 86–96.

[7] **M.B. Barannik, B.Yu. Barbarovich, B.L. Dmitriyev, B.B. Kolobov**, Опыт калибровки и практической эксплуатации прибора для диагностики состояния OPN типа SKAT-3 // Приборы. 2011. № 11 (137). С. 40–45.

[8] **V.V. Kolobov, V.N. Selivanov, M.B. Barannik**, Опыт эксплуатации устройства регистрации импульсных токов через OPN // V Rossiyskaya konferentsiya po molniyezashchite. Sankt-Peterburg, 17-19 maya 2016 goda: sbornik dokladov. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2016. – С. 140–149.

[9] **V.V. Kolobov, M.B. Barannik**, Опыт эксплуатации устройства регистрации импульсных токов, протекающих через OPN под воздействием коммутационных и грозовых перенапряжений // Trudy KNTs RAN. Energetika. Vypusk 9. – Apatity: Izd-vo Kolskogo nauchnogo tsentra RAN, 2014. – С. 13–26.

[10] **M.B. Barannik, A.N. Danilin, Yu.V. Katkalov, V.V. Kolobov, Ya.A. Sakharov, V.N. Selivanov**, Sistema registratsii geoinduktirovannykh tokov v neytralyakh silovykh avtotransformatorov // Приборы и техника эксперимента. 2012. №1. С. 118–123.

THE AUTHORS

KOLOBOV Vitaliy V. – *NERC KSC RAS.*

E-mail: 1_i@mail.ru

BARANNIK Maksim B. – *NERC KSC RAS.*

E-mail: maxbarien@mail.ru

IVONIN Viktor V. – *NERC KSC RAS.*

E-mail: v.ivonin@ksc.ru

Received: 18.08.2021

DOI: 10.18721/JEST.27305
УДК 621.314.212

С.П. Высогорец¹, С.М. Редькин², М.В. Житенев²

¹ ФГАОУ ДПО Петербургский энергетический институт повышения квалификации,
Санкт-Петербург, Россия;

² АО "НПО "Стример",
Санкт-Петербург, Россия

ПОИСК СОВРЕМЕННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В работе изложены проблемы эксплуатации изоляции трансформаторов. Проведена оценка влияния влаги на электрическую прочность и диэлектрические характеристики изоляции, скорость окислительных процессов в масле и температурного старения изоляции. Показано влияние увлажненности на срок эксплуатации и нагрузочную способность трансформаторов. Проведен сравнительный анализ традиционных способов осушки твердой изоляции и жидкого диэлектрика. Подтверждена необходимость разработки методов онлайн осушки изоляции работающих трансформаторов. Сформулированы основные требования для автоматических систем управления состоянием изоляции трансформаторного оборудования, на основании которых усовершенствована английская технологии «TRANSEC». Представлены результаты опытной установки усовершенствованной системы «TRANSEC» автоматического контроля и управления влажностью на нескольких действующих трансформаторах. Определена область применения автоматической системы управления состоянием изоляции трансформаторов, внедрение которых позволит повысить надежность и эффективность эксплуатации.

Ключевые слова: трансформатор, изоляция, влага, автоматизированная система, управление состоянием.

Ссылка при цитировании:

Высогорец С.П., Редькин С.М., Житенев М.В. Поиск современных инженерных решений автоматического управления техническим состоянием изоляции трансформаторов // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 3. С. 50–62. DOI: 10.18721/JEST.27305

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

V.S. Vysogorets¹, R.S. Redkin², Z.M. Zhitenev²

¹ Federal State educational establishment PEIPK,
St. Petersburg, Russia;

² Streamer Electric Inc,
St. Petersburg, Russia

SEARCH OF MODERN ENGINEERING SOLUTIONS FOR AUTOMATIC CONTROL OF TRANSFORMER INSULATION TECHNICAL STATE

The paper outlines the problems of transformer insulation operation as well as assesses the influence of moisture on dielectric characteristics of insulation, the rate of oxidation processes in oil and thermal aging of insulation. The influence of moisture content on the service life and load capacity

of transformers is shown. A comparative analysis of traditional methods of solid insulation and liquid dielectric drying is carried out. We confirmed the need to develop online methods for insulation drying of operating transformers and formulated basic requirements for automatically controlled moisture management systems of transformer equipment. The British technology “TRANSEC” was modified on the basis of these requirements. The paper presents results of trial installations of improved automatically controlled moisture monitoring and management system on several operating transformers. We determined the scope of application for moisture management system. Introduction of such systems will improve reliability and operation efficiency of power transformers.

Keywords: transformer, insulation, moisture, automated system, condition management.

Citation:

V.S. Vysogorets, R.S. Redkin, Z.M. Zhitenev, Search of modern engineering solutions for automatic control of transformer insulation technical state, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (03) (2021) 50–62, DOI: 10.18721/JEST.27305

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. В российской энергетике значительный парк силовых трансформаторов превышает нормативный срок эксплуатации. Анализ аварийности трансформаторов указывает на то, что большая доля отказов данного оборудования связана с износом, увлажнением и/или загрязнением изоляции [1–3].

Целлюлозная изоляция является важным ресурсопределяющим элементом трансформатора, срок эксплуатации которой зависит от ряда факторов: температуры, влагосодержания, качества трансформаторного масла и процессов, происходящих в нем. В ходе исследований [4] подтверждено, что с ростом температуры увеличивается скорость старения целлюлозной изоляции. Так, при 100 °С старение происходит за 20 лет, а при 110 °С – за 5 лет [4]. Соответственно, при нормальной работе замена силовых трансформаторов по истечении их назначенного срока эксплуатации (25 лет) не оправдана [2, 5]. Вместе с этим к 25–30 годам эксплуатации в изоляции трансформатора может накапливаться опасное количество влаги [6], которое будет влиять на надежность и дальнейшую долговечность трансформатора. Рабочая нагрузка трансформатора влияет на количество и скорость роста влажности твердой изоляции, что продемонстрировано на рис. 1 [6].

Для приведения влажности изоляции к установленной норме проводятся капитальные ремонты, в которых дорогостоящие технологические операции по ее осушке занимают значительную часть времени (от 25 % до 50 % общей длительности ремонта). Процесс осушки изоляции усложняется с ростом мощности трансформатора, что связано с увеличением сложности конструкции, объема и массы изоляции. При этом ряд применяемых в ходе ремонта методов по осушке изоляции оказывает на нее побочное негативное воздействие. Т. о. технико-экономически эффективнее поддерживать влажность изоляции в допустимых пределах, нежели проводить сложные работы по ее осушке за ограниченный в период ремонта интервал времени.

Соответственно, необходим поиск современных инженерных решений обработки изоляции щадящими методами, не требующими отключения трансформатора, что повысит его надежность, долговечность и сократит количество простоев.

Экспериментальная часть

Влияние влаги на изоляцию трансформаторов

Главным источником воды в трансформаторе является атмосферная влага, которая проникает вместе с воздухом через несовершенные системы защиты от увлажнения, а также через уплотнения (в случае их дефекта) под воздействием градиента давления [6–8]. Вторым источником появления воды в трансформаторе являются процессы старения твердой изоляции и масла, где влага

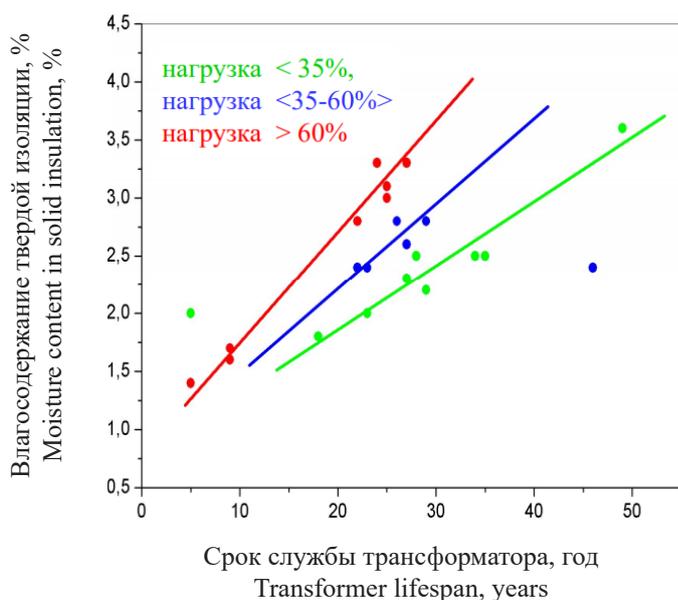


Рис. 1. Степень увлажнения изоляции трансформаторов в зависимости от нагрузки [6]

Fig. 1. Moisture saturation of transformer insulation depending on transformer load

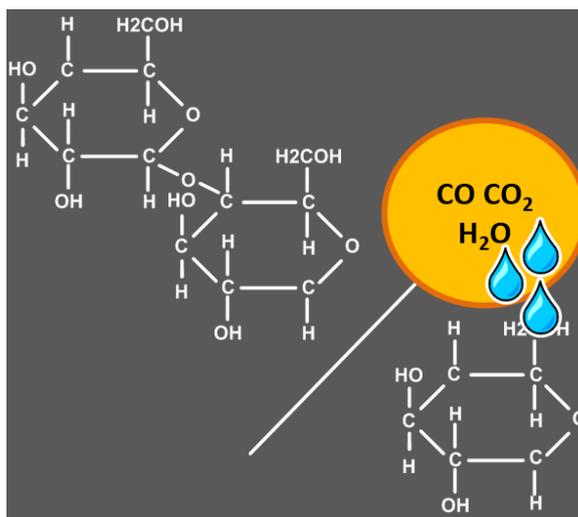


Рис. 2. Упрощенная схема разрушения молекул глюкозы

Fig. 2. Simplified diagram of cellulose degradation

является одним из продуктов старения [7, 8]. Целлюлоза – натуральный полимер, состоящий из остатков молекул глюкозы, которые образуют цепь примерно из 1200-1300 колец. При разложении молекула распадается на мелкие части, процесс сопровождается образованием в том числе и воды (рис. 2)

Если целлюлозная изоляция сильно состарилась (механическая прочность бумаги на разрыв уменьшилась более чем вдвое), выделение воды в результате воздействия температуры значительно увеличивается, что отражено на рис. 3 [7].

При этом вода растворяется в масле в очень небольших количествах, а ее растворимость зависит от температуры и химического состава масла [9]. Например, в масле марки ГК (ТУ 38101.1025-85) с содержанием ароматических углеводородов 1,6 % растворимость воды составляет при 20 °С

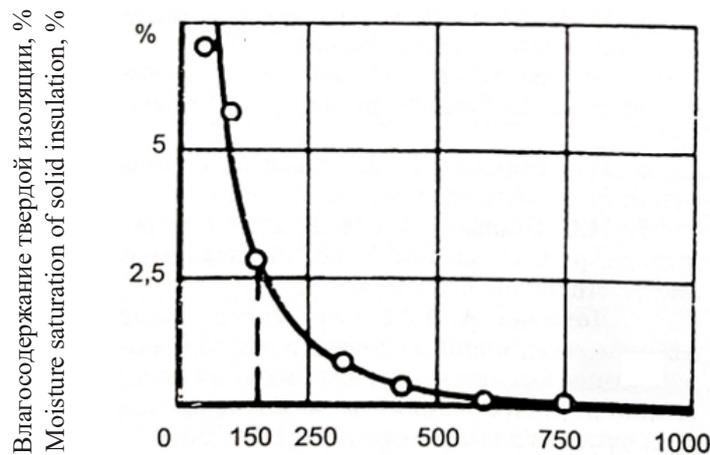


Рис. 3. Образование воды при термическом разложении бумаги [7]
 Fig. 3. Moisture formation during thermal decomposition of cellulose

– 37 г/т, при 40 °С – 85 г/т, при 70 °С – 270 г/т. Соответственно, при резких изменениях условий, например, при сбросе нагрузки с быстрым понижением температуры масло может оказаться перенасыщенным, и влага выделится в виде эмульсии - мелких капель, которые имеют тенденцию осажаться на твердых включениях, имеющихся в масле, и т. о. влиять на изоляционные характеристики [8].

В следствие изменения температуры при изменении нагрузки трансформатора и атмосферных условий в работающем оборудовании происходит постоянное перераспределение влагосодержания между твердой изоляцией и маслом. Соответственно, увлажнение твердой изоляции трансформаторов в эксплуатации происходит путем миграции влаги из масла. При этом насыщающее значение влагосодержания целлюлозной изоляции, в отличие от масла, практически не зависит от температуры и составляет около 17 % [8]. Распределение влаги в изоляции трансформатора следующее: 90-95% в целлюлозной изоляции и 5-10% в трансформаторном масле [8].

Влага в трансформаторе оказывает влияние на ухудшение электрической прочности и диэлектрических свойств изоляции. Растворенная влага (до точки насыщения) практически не влияет на электрическую прочность трансформаторного масла. Однако ее влияние существенно возрастает в присутствии механических примесей. При увлажненности твердой изоляции около 1% электрическая прочность изоляции практически не снижается, однако при этом значительно снижается напряжение начала образования ЧР [8], что отражено на рис. 4.

Ухудшение диэлектрических характеристик ведет к росту потерь с повышенным тепловыделением, соответственно к тепловому пробою и местному перегреву изоляции [10]. При этом в ходе эксплуатации влага может перемещаться и ее содержание может достигать критических значений в наиболее напряженных местах.

Влага влияет на ускорение окислительных процессов в трансформаторном масле, скорость температурного старения целлюлозы и ее гидролитическую деструкцию, что ведет к снижению механической стойкости бумажной изоляции. Рядом исследовательских работ [11] установлена зависимость расчетного срока эксплуатации трансформатора от увлажненности твердой изоляции и температуры его эксплуатации. Так, скорость разложения бумаги приблизительно пропорциональна количеству содержащейся в ней воды, что справедливо при содержании влаги в бумаге от 0,3 % до 7 % и при относительно небольшой степени разрушения бумаги [8]. При значительном износе бумажной изоляции влияние влаги становится более заметным [8]. Изменение скорости старения твердой изоляции с ростом ее влажности отражено на рис. 5 [12].

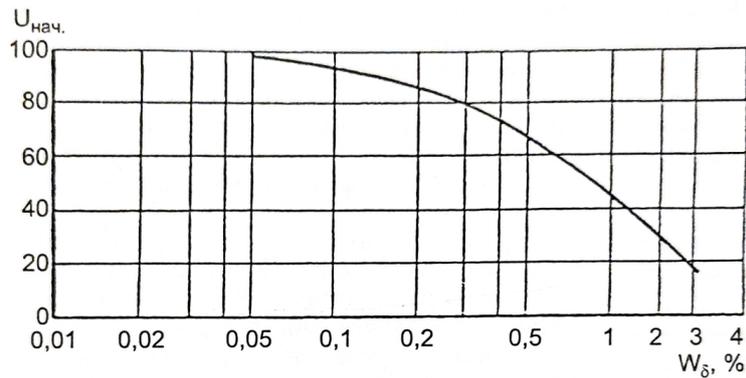


Рис. 4. Процент начального напряжения ЧР ($U_{нач}$), пропитанной маслом бумаги с радиальной толщиной 30 мм в зависимости от ее влагосодержания (W_δ) [8]

Fig. 4. Ratio of initial PD stress (U_{init}), oil-impregnated paper with a radial thickness of 30 mm, depending on its moisture content (W_δ) [8]

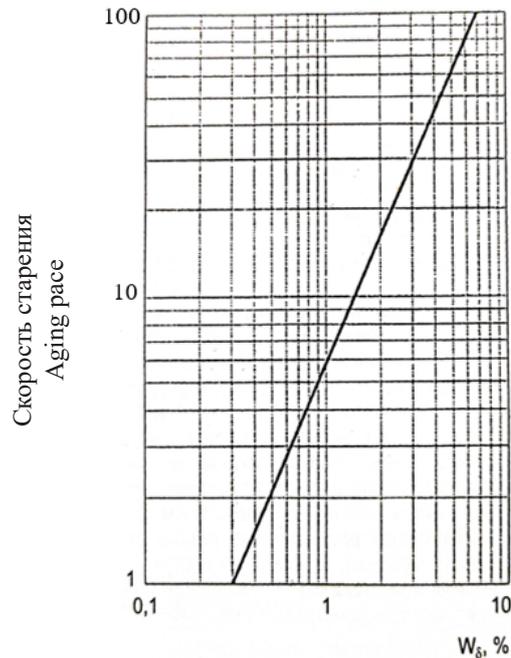


Рис. 5. Влияние влагосодержания бумаги (W_δ), на скорость теплового старения [12]

Fig. 5. Effect of paper moisture saturation (W_δ) on the rate of heat aging [12]

Количеством воды определяется способность трансформатора работать под высокой нагрузкой. Влагосодержание изоляции ограничивает предел нагрузки трансформатора, из-за снижения температуры образования пузырьков водяного пара [13]. Так под пузырьковым эффектом («bubble effect») понимают стремительное освобождение водяного пара из бумажной изоляции трансформатора, вызванного увеличением температуры обмоток свыше критической, что ведет к увеличению давления внутри бака трансформатора – аварии [6]. Соответственно, трансформатор, например, с влажностью изоляции 0,5 %, будет способен работать при почти вдвое более высокой температуре, чем трансформатор с влажностью изоляции 3 % [13].

Т. о. обеспечение оптимальной увлажненности изоляции трансформатора существенно влияет как на срок ее службы и безаварийность эксплуатации оборудования, так и на возможность создания необходимых сетевых режимов.

Сравнение различных способов осушки изоляции трансформатора

При сравнении различных способов осушки трансформаторного масла, позволяющих извлекать растворенную воду, в отношении вакуумных методов (дегазационных установок) обнаружены такие недостатки, как негативное воздействие высоких температур на жидкий диэлектрик (нагрев до 80 °С) и влияние дегазации на информативность диагностических показателей масла. Адсорбционные методы обработки масла лишены вышеуказанных недостатков. Обработка масла цеолитами марки NaA проводится в комфортных для жидкого диэлектрика условиях (при температуре от минус 5 до плюс 60 °С), позволяет проводить глубокую осушку без негативного влияния на информативность диагностических показателей масла. Однако, для исключения пересушки твердой изоляции трансформатора важно обеспечить непрерывный контроль степени осушенности трансформаторного масла. Поэтому маслоочистительные устройства (МОУ) рекомендуется оснащать датчиками измерения влажности изоляции, например, датчиками измерения относительного влагонасыщения масла.

При сравнении различных способов осушки твердой изоляции, используемых в период капитальных ремонтов (циркуляция горячего сухого масла; термовакуумная диффузия; разбрызгивание масла – циклическая сушка; сушка горячим воздухом; сушка индукционным методом) установлено, что на изоляцию трансформатора воздействуют высокие температуры (85 – 100 °С) и в ряде случаев вакуум. Это негативное воздействие может приводить к короблению, тепловому старению, термической деструкции и локальным перегревам изоляции. При этом ряд указанных выше методов (эффективных для осушки чрезмерно влажной изоляции) имеют конструктивные ограничения по применению. Продолжительность осушки твердой изоляции в период капитального ремонта составляет 5 – 14 дней и более (в зависимости от начальной степени ее увлажненности).

Принимая во внимание ограниченное время проведения капитального ремонта трансформатора (в среднем не более 14 дней), появление технологий осушки изоляции на работающем трансформаторе становится актуальной задачей. При этом требуется поиск/разработка онлайн технологий обработки твердой изоляции щадящими методами, т. к. осушка изоляции трансформатора наиболее востребована после завершения нормативного срока эксплуатации (т. е. когда изоляция может иметь некоторые признаки старения).

Таким способом онлайн осушки изоляции может являться метод циркуляции в баке трансформатора, осушаемого молекулярными ситами масла. Сушка твердой изоляции происходит за счет диффузии влаги из ее наружных слоев в осушаемое цеолитами масло. Этот способ позволяет обрабатывать изоляцию без травмирующего воздействия высоких температур и макромеханического воздействия вакуума. Такой процесс осушки изоляции сравнительно длительный по времени, поэтому его целесообразно проводить именно на работающем трансформаторе.

Разработка основных требований для устройств обработки изоляции трансформаторов под нагрузкой щадящими методами

Для обеспечения надежной работы устройств онлайн осушки изоляции на работающем трансформаторе, в т. ч. для исключения пересушки изоляции необходима система мониторинга, позволяющая обеспечить как контроль основных параметров процесса, а также степени увлажненности твердой изоляции и трансформаторного масла.

В ходе исследования определены следующие параметры, рекомендованные для систем мониторинга установок онлайн обработки изоляции работающих трансформаторов:

- температура масла на входе и на выходе установки (°С);
- относительное влагонасыщение на входе и на выходе установки (%);
- влагосодержание масла на входе и на выходе установки (ppm, г/т);

- суммарный объем перекачанного масла (л);
- скорость потока масла (л/ч);
- вес извлеченной воды с начала работы (кг);
- вес извлеченной воды с момента последней замены цеолита (кг);
- остаточная емкость цилиндров с цеолитом (%);
- влажность твердой изоляции (%);
- ориентировочная дата исчерпания ресурса цилиндров с цеолитом;
- температура внутри шкафа электроники (°С).

Соответственно, для обеспечения самодиагностики устройств онлайн обработки изоляции трансформаторов, что обеспечит возможность их эксплуатации без надзора оператора – в автоматическом режиме, необходимо отслеживание следующих событий с привязкой по времени и формированием управляющих команд:

- ошибка измерительных датчиков на входе и на выходе установки;
- перегрев шкафа с электроникой;
- низкий поток масла;
- протечки масла;
- превышение допустимой температуры масла;
- пересушка изоляции;
- сброс ошибок;
- превышение допустимого уровня относительного вьгонасыщения;
- превышение допустимого уровня влажности твердой изоляции;
- низкий остаточный ресурс цеолита;
- температура масла ниже 0 °С.

Диапазон температур при котором наиболее эффективно протекает процесс онлайн обработки изоляции трансформатора с помощью молекулярных сит составляет от плюс 10 °С до плюс 60 °С, что не противоречит исследованиям [14].

Для исключения негативного влияния процедур обработки масла на информативность диагностических параметров трансформатора рекомендуется осушку проводить синтетическим цеолитом марки NaA. Цеолит марки NaA имеет эффективный диаметр пор равный 4 Å [14]. Размер молекул воды равен 3-4 Å (близкий к размеру пор цеолита NaA), что обеспечивает глубокое избирательное удаление воды из трансформаторного масла даже при низком ее содержании, а полярность цеолитов обеспечивает высокую скорость осушки масла.

Цеолит имеет однородные поры, размер которых определяется строением элементарной ячейки кристалла, представленной на рис. 6. Все эти поры не способны адсорбировать молекулы, размер которых превышает диаметр входного окна в пору. Это свойство адсорбентов называют молекулярно-ситовым эффектом. Соответственно, особенностью данного синтетического цеолита NaA является малый размер входных окон, которые не адсорбируют углеводородные соединения, входящие в состав трансформаторного масла (в т. ч. антиокислительные присадки и фурановые производные), поскольку размеры их молекул значительно превышают размеры окон цеолитов.

Не менее важным элементом установок онлайн обработки изоляции молекулярными ситами на работающем трансформаторе является наличие в системе тонкой фильтрации. Задача тонкой фильтрации сводится к улавливанию мелких пылевидных гигроскопичных частиц цеолита, исключая их попадание в основной бак трансформатора. Появление значительного количества гигроскопичных механических примесей в трансформаторном масле даже с незначительным содержанием влаги приводит к ухудшению его электроизоляционных характеристик. При этом опасность мелких загрязнений размером 5 мкм заключается еще и в их высокой способности проникать внутрь твердой изоляции меняя ее электрофизические свойства [15].

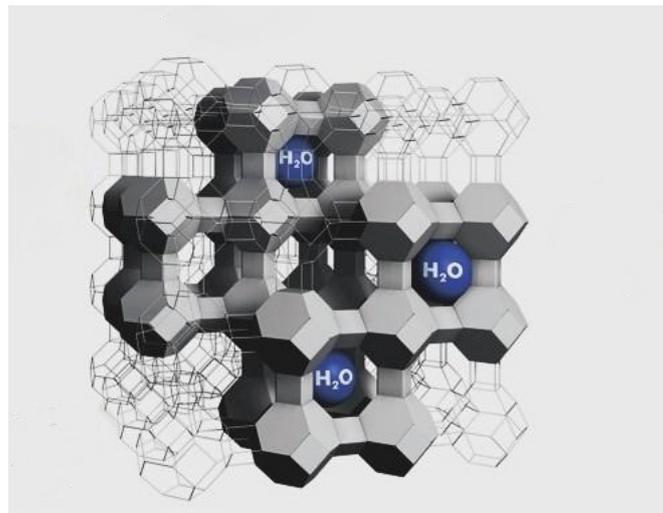


Рис. 6. Упрощенная цеолитовая структура
 Fig. 6. Simplified zeolite structure



Рис. 7. Устройство технологии АСУ СИТО «TRANSEC»
 Fig. 7. Automatic online drying system «Transec»

Оптимальная скорость пропускания трансформаторного масла через адсорбционные колонны с молекулярными ситами установлена на уровне 400–450 л/ч (0,0060–0,0068 м/с), что не противоречит рекомендациям [16], согласно которым осушка масел в динамических условиях синтетическими цеолитами осуществляется при скорости потока от 0,003 до 0,01 м/с и температуре 20–80 °С.

Описание усовершенствованной автоматической системы управления состоянием изоляции трансформаторного оборудования – АСУ СИТО «TRANSEC»

Для решения задач онлайн осушки изоляции трансформаторов под напряжением была использована английская технология «TRANSEC», технически усовершенствованная согласно вышеуказанным требованиям, в том числе была разработана эффективная система мониторинга.

Усовершенствованная модель АСУ СИТО «TRANSEC» представлена на рис. 7. Состав установки следующий (рис. 7): 1 – выпускной клапан, возврат масла в трансформатор; 2 – деаэратор; 3 – пробоотборный клапан на выходе; 4 – датчик влагосодержания и температуры масла на выходе; 5 – фильтр микрочастиц; 6 – промежуточный воздухоперепускной клапан; 7 – быстроразъемные муфты; 8 – цилиндры с молекулярным ситом (цеолит NaA); 9 – iкаф блока контроля и мониторинга (опция); 10 – стравливающий воздушный клапан; 11 – фильтр предочистки масла; 12 – датчик влагосодержания и температуры масла на входе; 13 – индикатор потока; 14 – насос; 15 – пробоотборный клапан на входе; 16 – впускной клапан, вход масла в модуль; 17 – рама.

«Сердцем» АСУ СИТО «TRANSEC» являются адсорберы, наполненные молекулярными ситами – цеолитом NaA. Масло из бака трансформатора забирается с нижней точки, проходит через фильтроэлементы, насосом прокачивается с установленной скоростью через адсорберы и поступает обратно в бак трансформатора через систему тонкой фильтрации. Т. о. в процессе циркуляции масла через модули АСУ СИТО «TRANSEC» происходит осушка изоляции трансформаторов. Усовершенствованная АСУ СИТО «TRANSEC» оснащена комплектом встроенных измерительных датчиков, которые обеспечивают мониторинг указанных выше параметров и обеспечивают надежную автоматическую работу установки на трансформаторе под нагрузкой.

Когда рекомендуется использовать автоматические системы осушки изоляции работающих трансформаторов (АСУ СИТО)

Технологии онлайн обработки изоляции востребованы при возникновении следующих ситуаций:

- трансформатор невозможно вывести в ремонт по режимам сети, В данном случае АСУ СИТО благодаря возможности монтироваться и работать на оборудовании под нагрузкой позволит решить возникшую проблему увлажнения изоляции;
- трансформатор имеет признаки увлажнения изоляции. В данном случае АСУ СИТО проведет неотложную обработку изоляции в онлайн режиме;
- трансформатор имеет признаки износа изоляции (значительное содержание продуктов старения в масле, наличие фурановых производных, ухудшенную степень полимеризации твердой изоляции). АСУ СИТО проведет обработку изоляции без негативного влияния высоких температур и вакуума. При этом в осушенном масле регенерация силикагелем будет протекать эффективнее.
- трансформатор имеет чрезмерно влажную изоляцию ($W_6 \geq 3,5\%$) и/или ограниченное время по продолжительности капитального ремонта. АСУ СИТО позволит провести предварительную подсушку изоляции до капитального ремонта (что позволит сэкономить как время на ремонт, так и выбрать более дешевую технологию обработки изоляции) или досушку изоляции после капитального ремонта на работающем трансформаторе. Это позволит увеличить межремонтный период работы трансформаторов, что существенно влияет на операционные расходы;
- трансформатор находится в центре питания наиболее ответственного участка и/или работает с высокими нагрузками и/или резко переменными нагрузками. АСУ СИТО в автоматическом режиме будет компенсировать (сдерживать) негативное влияние высоких и/или переменных нагрузок на ускоренное накапливание влаги в изоляции трансформатора. Вместе с этим АСУ СИТО может стать элементом повышения надежности оборудования со сверхнормативным сроком эксплуатации.

Опытная эксплуатация системы АСУ СИТО «TRANSEC»

Пилотные образцы усовершенствованной АСУ СИТО «TRANSEC» проходят опытную эксплуатацию на ряде действующих электроустановок. Результаты апробации технологии, представ-

ленные в табл. 1, указывают на эффективное излечение воды из изоляции работающих трансформаторов, что позволило улучшить их электроизоляционные характеристики в среднем в 2 и более раза.

Таблица 1

Информация об объектах опытной эксплуатации технологии АСУ СИТО «TRANSEC»
Table 1
Information about field trials of TRANSEC technology

№	Наименование организации Company name	Тип трансформатора (дисп. №) Transformer type	Количество удаленной воды из изоляции, кг Amount of water removed from insulation, kg
1.	ООО «Газпромэнерго» Саратовский филиал ПС-35 кВ «Латухино-2»	ТДНС-10000/35 (Т-2)	5,7 кг (за 10 месяцев)
2.	ООО «Газпромэнерго» Южно-Уральский филиал ПС-110/10/6 кВ, «Гелий-2»	ТРДЦН- 80000/110/-75У1 (3Т)	2,9 кг (за 9 месяцев)
3.	ПАО «Россети Московский регион» ПС «Чертаново»	ТРДЦН-63000/110 (Т-3)	4,7 кг (за 7 месяцев)
4.	Металлургический завод Петросталь, ПС «АКОС»	ЭТЦНВ-20000/10	1,8 кг (за 1 месяц)
5.	Металлургический завод Петросталь	УТМРУ-3500/10	4,2 кг (за 6 месяцев)
6.	Республика Казахстан ГРЭС Топар	ТДЦ-125000/110	22 кг (за 9 месяцев)

Выводы

Твердая изоляция силовых трансформаторов является важным ресурсопределяющим элементом. Обеспечение оптимальной увлажненности изоляционной системы трансформатора существенно влияет как на срок ее службы и безаварийность эксплуатации, так и на возможность создания необходимых сетевых режимов. Подтверждена необходимость разработки методов онлайн осушки изоляции трансформаторов под нагрузкой.

По результатам сравнительного анализ традиционных способов осушки твердой изоляции и жидкого диэлектрика обнаружено наличие негативных факторов, влияющих на изоляцию трансформаторов и информативность предиктивной диагностики. В ходе исследований разработаны основные требования для автоматических систем управления состоянием изоляции трансформаторного оборудования – АСУ СИТО, в соответствии которыми проведено усовершенствование английская технологии «TRANSEC». Определена область применения АСУ СИТО, внедрение которых позволит повысить надежность и эффективность эксплуатации трансформаторного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Соколов В.В. Вопросы оценки и обеспечения надежности силовых трансформаторов / В.В. Соколов, В.А. Лукашук // Соколов В.В. Избранные труды / Сост. А.Г. Овсянников, В.Н. Осотов, В.Н. Бережной. – Екатеринбург: Издательский дом «Автограф», 2010. С. 22–30.

[2] Ванин Б.В. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110-500 кВ в эксплуатации / Б.В. Ванин, Ю.Н. Львов, М.Ю. Львов, Б.Н. Неклепаев, К.Н. Антипов, А.С. Сурба, М.И. Чичинский // Электрические станции. – 2001. – № 9. С. 53–58.

- [3] Статистические данные о повреждении трансформаторов. Обзор 12-го комитета СИГРЭ. Ресурсы Интернета. <http://leg.co.ua/transformatory/praktika/pozharobezопасnost-silovyh-transformatory-ov-2.html>
- [4] **Stannett A.W.** Problems of water in power transformers, The New Zealand electrical Journal, 1966, 25 June, Pp. 163–166.
- [5] **Алексеев Б.А.** Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / Б.А. Алексеев – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.
- [6] **Ян Субоч.** Вода в изоляции обмоток силовых трансформаторов. Причины, последствия, методы исследования // Конференция ФГАОУ ДПО «ПЭИПК», 2020.
- [7] **Fabre J., Pichon A.** Deteriorating processes and products of paper in oil, Application to transformers, CIGR'E, 1960, 137.
- [8] Силовые трансформаторы: справочная книга / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
- [9] **Griffin P., Socolov V.** Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation. CIGRE WG 12.18, Site management of transformers.
- [10] **Кучинский Г.С.** Изоляция установок высокого напряжения / Г.С. Кучинский, В.Е. Кизиветтер, Ю.С. Пинталь. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
- [11] **Lars E.** Lundgaard, Walter Hansen, Dag Linhjell, Terence J. Painter, “Ageing of oil-impregnated paper in power transformers”, IEEE PWRD, 2003.
- [12] Background information on high temperature insulation for liquid-immersed power transformers. WG report. IEEE PES Transformers Committee. Insulation life Subcommittee. Working Group on high temperature insulator liquid-immersed power transformers. IEE Transaction on Power Delivery. Vol. 9, № 4, October 1994.
- [13] **Frimpong G.K., Perkins M., Fazlagic A., Gafvert U.** “Estimation of Moisture in Cellulose and Oil Quality of Transformer Insulation using Dielectric Response Measurements”, Doble Client Conference, Paper 8M, 2001.
- [14] **Тутубалина В.П., Гайнуллина Л.Р.** Осушка трансформаторного масла адсорбентами на электрических станциях: монография / В.П. Тутубалина, Л.Р. Гайнуллина. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – 114 с.
- [15] **Юсупов Д.Т. и др.** Влияние механических примесей на эксплуатационные характеристики трансформаторного масла / Д.Т. Юсупов, Ш.Б. Юсупов, Н.М. Маркаев. // Молодой ученый. — 2019. — № 22 (260). — С. 144–146. — URL: <https://moluch.ru/archive/260/59704/> (Дата обращения: 24.06.2021).
- [16] **Кельцев Н.В.** «Основы адсорбционной техники» // М., ХИМИЯ, 1984 г.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВЫСОГОРЕЦ Светлана Петровна — доцент кафедры диагностика электрооборудования, ФГАОУ ДПО Петербургский энергетический институт повышения квалификации, д-р техн. наук.

E-mail: s-151075@yandex.ru

РЕДЬКИН Сергей Михайлович — заместитель генерального директора по стратегическому развитию и инновациям, АО "НПО "Стример", без степени.

E-mail: sergey.redkin@streamer.ru

ЖИТЕНЕВ Михаил Владимирович — менеджер международного направления, АО "НПО "Стример", без степени.

E-mail: mikhail.zhitenev@streamer-electric.com

Дата поступления статьи в редакцию: 05.08.2021

REFERENCES

- [1] **V.V. Sokolov**, Issues of assessing and ensuring the reliability of power transformers / V.V. Sokolov, V.A. Lukashchuk // Sokolov V.V. Selected Works. / Comp. A.G. Ovsyannikov, V.N. Osotov, V.N. Berezchnoy – Yekaterinburg: Publishing House "Autograph", 2010. S. 22–30.
- [2] **B.V. Vanin**, On damage of 110-500 kV power transformers in operation / B.V. Vanin, Yu.N. Lvov, M.Yu. Lvov, B.N. Neklepaev, K.N. Antipov, A.S. Surba, M.I. Chichinsky // Electric stations. – 2001. – No. 9. S. 53–58.
- [3] Statistical data on the damage of transformers. Review of the 12th CIGRE Committee. Internet resources. <http://leg.co.ua/transformatory/praktika/pozharobezopasnost-silovyh-transformatorov-2.html>
- [4] **A.W. Stannett**, Problems of water in power transformers, The New Zealand electrical Journal, 1966, 25 June, Pp. 163–166.
- [5] **B.A. Alekseev**, Condition monitoring (diagnostics) of large power transformers / B.A. Alekseev – Moscow: NTs ENAS Publishing House, 2002. 216 p.
- [6] **Jan Suboch**. Water in insulation of power transformer windings. Causes, consequences, research methods // Conference of FGAOU DPO "PEIPK", 2020.
- [7] **J. Fabre, A. Pichon**, Deteriorating processes and products of paper in oil, Application to transformers, CIGR'E, 1960, 137.
- [8] Power transformers: reference book / Ed. S.D. Lizunova, A.K. Lokhanin. – M.: Energoizdat, 2004. 616 p.
- [9] **P. Griffin, V. Socolov**, Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation. CIGRE WG 12.18, Site management of transformers.
- [10] **G.S. Kuchinsky**, Insulation of high voltage installations. Kuchinsky, V.E. Kizivetter, Yu.S. Pintal. – M.: Energoatomizdat, 1987. 368 p.
- [11] **Lars E. Lundgaard, Walter Hansen, Dag Linhjell, Terence J. Painter**, "Ageing of oil-impregnated paper in power transformers", IEEE PWRD, 2003.
- [12] Background information on high temperature insulation for liquid-immersed power transformers. WG report. IEEE PES Transformers Committee. Insulation life Subcommittee. Working Group on high temperature insulator liquid-immersed power transformers. IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. 9, № 4, October 1994.
- [13] **G.K. Frimpong, M. Perkins, A. Fazlagic, U. Gafvert**, "Estimation of Moisture in Cellulose and Oil Quality of Transformer Insulation using Dielectric Response Measurements", Doble Client Conference, Paper 8M, 2001.
- [14] **V.P. Tutubalina, L.R. Gainullina**, Drying of transformer oil with adsorbents at power plants: monograph / V.P. Tutubalina, L.R. Gainullina. – Kazan: Kazan State Energy University, 2017. 114 p.
- [15] **G.S. Yusupov et al.**, Influence of mechanical impurities on the operational characteristics of transformer oil / DT Yusupov, Sh. B. Yusupov, NM Markaev. // Young scientist. – 2019. – No. 22 (260). – S. 144–146. – URL: <https://moluch.ru/archive/260/59704/> (date of access: June 24, 2021).
- [16] **N.V. Keltsev**, "Basics of adsorption technology" // M., CHEMISTRY, 1984.

THE AUTHORS

VYSOGORETS Svetlana P. – Federal State educational establishment PEIPK.
E-mail: s-151075@yandex.ru

REDKIN Sergey M. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: sergey.redkin@streamer.ru

ZHITENEV Mikhail V. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: mikhail.zhitenev@streamer-electric.com

Received: 05.08.2021

DOI: 10.18721/JEST.27306
УДК 621.317.33

В.С. Поляков

ФГАОУ ДПО Петербургский энергетический институт повышения квалификации,
Санкт-Петербург, Россия

ОНЛАЙН ДИАГНОСТИКА АКТИВНОЙ ЧАСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В работе описан способ получения характеристик активной части силовых трансформаторов онлайн на основе обработки цифровых осциллограмм тока и напряжения при включении трансформатора на холостой ход с не размагниченным магнитопроводом. Магнитопровод трансформатора, отключённого выключателем, остаётся намагниченным с остаточной индукцией близкой по значению к номинальной индукции $B_{ост} = 1,5$ Тл. При включении трансформатора под рабочее напряжение на остаточную индукцию накладывается переменная рабочая индукция $B_{ном} = 1,5$ Тл, и суммарная индукция в магнитопроводе может достигать значения $B_{\Sigma} = 3,0$ Тл, то есть значения индукции насыщения, и по обмотке трансформатора протекают токи размагничивания близкие по значению к токам короткого замыкания $I_{разм} = (5-6) \cdot I_{ном}$. Это позволяет по осциллограмме тока и напряжения построить кривую намагничивания – зависимость потока от тока $\Phi = \Psi(i)$, из которой получить все параметры активной части трансформатора, которые обычно измеряют на отключённом трансформаторе от постороннего источника напряжения.

Ключевые слова: силовой трансформатор, магнитопровод, осциллограмма, холостой ход, остаточная индукция, размагничивание, индукция насыщения, кривая намагничивания, параметры активной части.

Ссылка при цитировании:

Поляков В.С. Онлайн диагностика активной части силовых трансформаторов // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 63–76. DOI: 10.18721/JEST.27306

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

V.S. Poliakov

Federal State educational establishment PEIPK,
St. Petersburg, Russia

ONLINE DIAGNOSTICS OF THE ACTIVE PART OF POWER TRANSFORMERS

The paper describes a method for obtaining the characteristics of the active part of power transformers online. The method is based on the processing of digital current and voltage wave-forms obtained at turning on of unloaded transformer with premagnetized core. The core of transformer, switched off by a circuit breaker, has residual induction value closing to nominal $B_n = 1.5$. Switching on of the transformer leads to addition of working AC field to residual one. Therefore full magnetic field may achieves saturation induction $B = 3$ T. In this case winding current is close to shorting one $I_{разм} = (5-6)I_n$. It let's to build magnetization curve – dependence of the magnetic flux on winding current. This dependence let's to get all the parameters of the active part of the transformers, which are usually measured on a disconnected transformer using an external voltage source.

Keywords: Power transformer, magnet circuit, waveform, unloaded mode, demagnetization, saturation induction, magnetization curve, active part parameters.

Citation:

V.S. Poliakov, Online diagnostics of the active part of power transformers, Materials Science. Power Engineering, 27 (03) (2021) 63–76, DOI: 10.18721/JEST.27306

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. По эксплуатации высоковольтного электрооборудования выпущено много руководящих документов, называемых: техническая политика¹, концепция², стандарт³ и т.д. В них собрано многое из того, что написано и опубликовано в интернете без критического осмысления и отбора действительно эффективных технических решений.

Это связано с активным внедрением во все сферы современной жизни цифровизации, что привело к излишнему увлечению оперированием с избыточной информацией. В частности, по диагностическим параметрам силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов (в дальнейшем СТ). Причём, большинство предлагаемых для диагностики параметров, практически не влияют на надёжность работы СТ и не позволяют оценить его реальное состояние.

Так, в информационном письме РАО "ЕЭС России" № 04-05/6-107 от 27.10.1995 года «О комплексном обследовании СТ и их маслонаполненных высоковольтных **выводов**»¹, предложено выполнить измерения, анализы и обследования по 52 пунктам, половина из которых определяет характеристики трансформаторного масла из бака СТ и его вводов. Отметим, что в названии письма высоковольтные **вводы** названы **выводами**. Это говорит о квалификации «специалистов», которые составляли этот документ.

Наш опыт проведения комплексных обследований с 1976 года более ста СТ напряжением 110-1150 кВ мощностью от 40 МВА до 630 МВА со сроками эксплуатации от 8-12 лет до 40-50 лет позволяет сделать вывод о том, что установленная руководящими документами система эксплуатации трансформаторных масел СТ при её выполнении работает эффективно, и не приводит к изменениям характеристик масел, требующих их восстановления. Ни при одном обследовании перечисленных СТ никаких работ с трансформаторными маслами не потребовалось делать, и это при том, что в обследованиях принимали участие самые квалифицированные специалисты российской энергетики в области хроматографического анализа газов и трансформаторных масел: Калачёва Надежда Ивановна и Дарьян Леонид Альбертович.

В таком документе как: «Положение о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС»² в разделе 2.2.6 Диагностика и мониторинг электрооборудования предлагается:

П. 2.2.6.3 под рабочим напряжением преимущественно должен быть обеспечен непрерывный (автоматический) контроль состояния:

- силовых (авто) трансформаторов и шунтирующих реакторов;
- высоковольтных вводов 110 кВ и выше по изменению абсолютного значения угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ и емкости изоляции;
- трансформаторов тока 330 кВ и выше по изменению абсолютного значения угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ и емкости изоляции;
- ограничителей перенапряжений по току проводимости, количеству и величине токов срабатывания;
- выключателей и разъединителей по коммутационному ресурсу.

А п. 2.2.6.4 устанавливает такой же контроль для эксплуатируемых проходных вводов, вводов силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов 110 кВ и выше и трансформаторов тока

¹ О комплексном обследовании СТ и их маслонаполненных высоковольтных выводов // Инф.письмо РАО "ЕЭС России" № 04-05/6-107 от 27.10.1995 года.

² Положение о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС» // ОАО «ФСК ЕЭС». – М., 2011 г.

330 кВ и выше должны оборудоваться системами автоматического контроля под рабочим напряжением по изменению $\text{tg}\delta$ и емкости.

Онлайн непрерывный контроль необходим в тех случаях, когда происходят повреждения из-за быстрого, за 1-3-6 месяцев, развития опасного дефекта для выявления его появления на возможно более ранней стадии.

Экспериментальная часть

Исследовано, что с такой скоростью развиваются местные дефекты в ТТ напряжением 330 кВ и выше, после эксплуатационных воздействий приводящих к их появлению. Время от момента появления местного опасного дефекта зависит от температуры окружающей среды и других тепло-выделяющих факторов, и составляет как раз от 1 до 6 месяцев.

Эксплуатационным воздействием, приводящим к появлению дефекта в ТТ типа ТФУМ или аналогичных конструктивно типа ІМВ, является воздействие тока короткого замыкания. В местном дефекте увеличивается выделение тепла за счёт увеличения диэлектрических потерь, соответственно возрастает температура зоны охваченной местным дефектом, достигая значения деградации целлюлозы (270°C), и при дальнейшем увеличении температуры начинается обугливание, приводящее к пробое основной изоляции. Происходит классический тепловой пробой, частичные разряды при этом отсутствуют.

При развитии такого дефекта возрастает значение тока через изоляцию и изменяется его форма (рис. 3, 4), поэтому эффективная непрерывная диагностика ТТ с U-образной обмоткой может быть построена на регистрации ёмкостного тока обычным регистратором аварийных событий (РАС) отдельным типа «Парма», «Нева» и др., или встроенным в современные панели защит. Система периодической диагностики по току под рабочим напряжением ТТ-330 кВ типа ТФУМ-330 была внедрена в Колэнерго на ПС Мончегорская-330 в 1999 году.

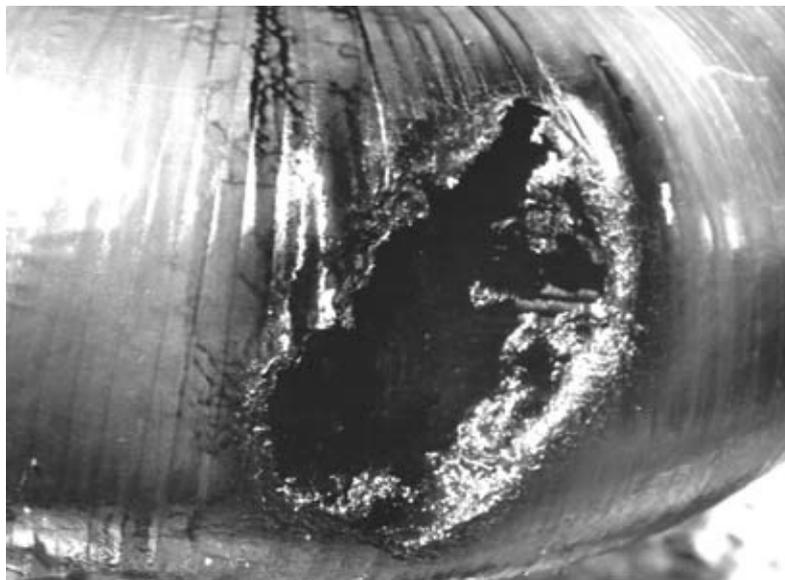


Рис. 1. Выгорание зоны местного дефекта ТТ типа ТФУМ-330.

Выгорела изоляция 4-х конденсаторных обкладок из 14-ти. Дефект развивался на стенде при одновременном действии всех тепловыделяющих факторов в течение двух недель непрерывно

Fig. 1. Thermal destruction of local defect of current transformer TFUM-330.

The insulation of 4 of 14 capacitor linings was destroyed. Defect propagated on setup under simultaneous actions all heating factors during two weeks continually



Рис. 2. Аналогичное повреждение ТТ типа IBM-500 [1]. Повреждения в эксплуатации происходят, если в течение 1-го месяца днём стоит жаркая погода с температурой в тени 25-30°C. Ночью температура снижалась.

Fig. 2. Similar damage of current transformer IBM-500 type [1]. Damages in exploitation occurs if day air temperature in the shadow during one month lies in interval 25-30°C and night temperature was decreasing

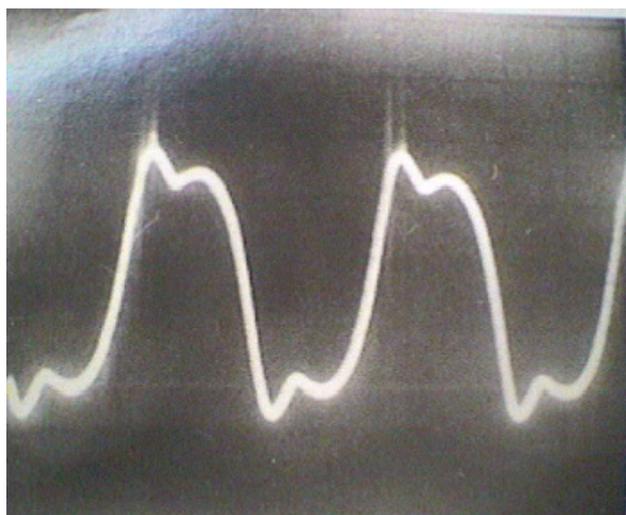


Рис. 3. Ёмкостной ток в начале развития дефекта в ТТ типа ТФУМ-330

Fig. 3. Capacitive current in initial stage of defect growth in current transformer TFUM-330 type

Поэтому можно согласиться с требованием п.п. 2.2.6.3 и 2.2.6.4 в отношении ТТ напряжением 330 кВ и выше, для которых такая система диагностики разработана [2], а также для вводов с RIP – изоляцией, но не в отношении вводов 110 кВ и выше с бумажно-масляной изоляцией, для которых необходимость непрерывного контроля вообще отсутствует.

Диалектика диагностики электрооборудования заключается в отрицании самой диагностики.

Это следует из того, что главная задача диагностики заключается в том, чтобы выявить опасный дефект на возможно более ранней стадии его развития. При этом опасным может считаться дефект, развитие которого приводит к повреждению в достаточно короткие сроки: 1-3-6 месяцев. Выявив причину появления опасного дефекта, устраняют её на том этапе жизни электрооборудования, на котором она появляется, и далее нет никакой необходимости в проведении периодической или непрерывной диагностики, то есть её отрицание. Следует оговориться,

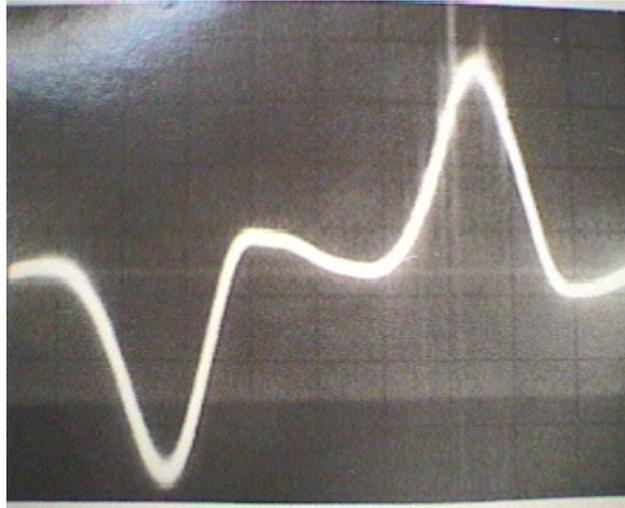


Рис. 4. Ёмкостной ток перед повреждением ТТ типа ТФУМ-330 (рис. 1)
 Fig. 4. Capacitive current before damage of current transformer TFUM-330 type

что это возможно только при строгом соблюдении уточнённой по результатам исследования причин повреждения технологии изготовления аппарата, что не гарантируют отечественные производители.

В том случае, когда приходится эксплуатировать э/о с не устранённой причиной появления опасного дефекта – необходимо разработать эффективную систему диагностики периодическую или непрерывную.

Рассмотрим это на примере вводов с RIP – изоляцией. В начальный период освоения выпуска вводов с RIP – изоляцией ООО «Масса» происходили, практически, массовые повреждения вводов напряжением 110-500 кВ.

В публикациях о причинах повреждений назывались разные причины, в частности, в [3]: «Причины повреждений вводов можно условно разделить на две большие группы. К первой относятся причины, заложенные во ввод на этапе его изготовления (конструкция, технология, несоответствующие материалы, скрытые дефекты и т.д.), ко второй группе относятся факторы, возникающие в процессе эксплуатации (неправильные монтаж и измерения, ненадёжное заземление измерительного вывода, измерение $\text{tg}\delta$, нерасчётные режимы и т.д.). И если мы, как производители вводов, можем устранить или свести к минимуму причины повреждений из первой группы, то исключить или как-то повлиять на причины из второй группы мы не в состоянии....Для повышения качества и надёжности выпускаемых вводов с 2011 годабыло принято решение о разработке модернизированной серии вводов более надёжной конструкции. Результат всех перечисленных работ – разработка модернизированной серии высоковольтных вводов, обладающих большей надёжностью, что подтверждено проведёнными испытаниями на заводе и двухлетним безаварийным периодом эксплуатации на объектах энергетики России. **(Внимание!)**. В новых конструкциях вводов были применены новые материалы для изготовления уравнивающих обкладок, увеличены диаметры изоляций вводов, применены новые сверхчистые материалы для изготовления компаунда, принципиально изменён метод фиксации соединительной втулки. Обкладки изготавливаются из алюминиевой фольги импортного производства со специально обработанной поверхностью и максимальной адгезией, исключающей расслоение между обкладкой и компаундом. Для последней измерительной обкладки используется специально обработанная медная фольга, что позволило обеспечить более надёжный контакт с измерительным выводом с помощью пайки» [3]. То есть, на основе изучения действительных причин повреждений вводов с RIP – изоляцией изготовитель внёс конструктивные и технологические изменения, и

вводы перестали повреждаться, не смотря на продолжающееся действие факторов второй группы, возникающих в эксплуатации.

Конечно, на тех объектах, где использовали методы диагностики под рабочим напряжением с первых дней эксплуатации, как на Сургутской ГРЭС-2, где дважды пришлось заменять вводы 500 кВ типа ГКТ III-60-500/2500 01 (2009 г. выпуска) на блочном трансформаторе 1Т типа ТНЦ-10000000/500. Или там, где использовали собственную разработку непрерывного контроля ёмкостного тока, как на Экибастузской ГРЭС-2 на блочных трансформаторах типа ТНЦ-630000/500. И там и там контролируемые параметры начали изменяться с первых дней включения вводов с RIP – изоляцией под напряжение, что позволило предотвратить повреждения вводов. И если на Сургутской ГРЭС-2 решение о замене вводов было принято на основании результатов измерений $\text{tg}\delta$ и ёмкости под рабочим напряжением, то на Экибастузской ГРЭС-2 блочный трансформатор 1Т был отключен дополнительной защитой по ёмкостному току через 10 дней после включения под напряжение. Ёмкостной ток ввода фазы «А» возрос на 25%. Измерения на испытательном напряжении 10 кВ подтвердили рост ёмкости на те же 25%.

Повреждения вводов с RIP – изоляцией и ТТ типа ТФУМ и ИМВ происходили из-за развития классического теплового пробоя, при этом ни на стенде НИИПТ'а, ни на ГРЭС не были зарегистрированы частичные разряды.

Вводы с RIP – изоляцией, изготовленные с 2011 года с приведенными выше изменениями, работают надёжно, и не требуют диагностики. То есть диагностика выполнила свою задачу: выявила причины появления опасных дефектов, позволила разработать эффективные меры по их устранению, тем самым, отпала необходимость в её использовании.

Изначально, одна из задач применения вводов с RIP – изоляцией и ставилась как отсутствие необходимости их диагностики в эксплуатации. В Ленэнерго, эксплуатировались вводы с твёрдой изоляцией 110 и 220 кВ на трансформаторах ПС №20 (ПС Чесменская) изготовленные разными фирмами Италии, Германии, Швеции, Бельгии и др. в 30-х годах прошлого столетия. Ни один ввод не был забракован, не было ни одного повреждения этих вводов, и они надёжно работали более 50-ти лет до реконструкции ПС №20 (ПС Чесменская). При этом никакой необходимости в их контроле не было.

Что можно порекомендовать потребителям: при получении вводов обратите внимание на результаты измерений их характеристик на заводе-изготовителе. Все вводы одной партии должны иметь абсолютно одинаковые характеристики по $\text{tg}\delta$ и ёмкости, и это необходимо подтвердить измерениями на объекте. Если характеристики абсолютно одинаковы, то это указывает на строгое соблюдение технологии их изготовления. Впервые я обратил внимание на этот факт на Верхнетагильской ГРЭС, где измерял вводы 220 кВ под рабочим напряжением. Вводы с RIP – изоляцией фирмы АВВ на масляном выключателе 220 кВ имели абсолютно одинаковые характеристики, как на заводе, так и на объекте.

Поэтому, если всё же применять непрерывную диагностику вводов с RIP – изоляцией 110 кВ и выше и ТТ 330 кВ и выше, то самым простым способом, контролем ёмкостного тока стандартными цифровыми устройствами РАС, которыми оснащён объект отдельными или установленными в современных панелях защит.

В отношении СТ РД [4] устанавливают объём мониторинга, в основном, по контролю параметров трансформаторного масла, содержанию газов, растворённых в масле характерных для развивающихся повреждений и другим параметрам не связанным с опасными быстро развивающимися дефектами.

В то же время, основной причиной повреждений СТ являются дефекты, связанные с нарушением динамической устойчивости обмоток СТ от воздействия токов короткого замыкания (КЗ). А в последнее время стали происходить повреждения и от воздействия токов при включении СТ на холостой ход (ХХ).



Рис. 5. Разрушение обмотки 500 кВ с внешней стороны тр-ра Тяньваньской АЭС
 Fig. 5. The outside destroy of 500 kV winding of power transformer TyanVan atom power plant



Рис. 6. Разрушение обмотки 500 кВ с внутренней стороны Тяньваньской АЭС
 Fig. 6. The inside destroy of 500 kV winding of power transformer TyanVan atom power plant

От таких токов повредился блочный трансформатор типа ОДЦ- 417000/500/24 Тяньваньской АЭС в КНР (рис. 5, 6), величина которых, по расчётам Г.А. Евдокунина и М.В. Дмитриева [5], может превышать $(5-6) \cdot I_{\text{НОМ}}$ (рис. 9),

Начало развития разрушения обмотки 500 кВ было зафиксировано на СТ 1Т типа ТНЦ-10000000/500 Сургутской ГРЭС-2 (рис. 7).

При отключении СТ выключателем, его магнитопровод остаётся намагниченным с остаточной индукцией B_r , так как намагничивание магнитопровода происходит по петле гистерезиса (рис. 8), и в момент обрыва тока остаточная индукция $B_r \approx B_\phi$ близка по значению к индукции при фазном напряжении (B_ϕ).

В пределе возможен вариант отключения, когда в магнитопроводе «сохраняется» остаточная индукция, величина которой максимальна, то есть достигает значения $B_{\text{макс. ном.}} = 1,5$ Тл. При включении трансформатора с такой остаточной индукцией в сеть индукция от приложенного на-



Рис. 7. Начало повреждения обмотки 500 кВ тр-ра 1Т 500 кВ, 1000 МВА Сургутской ГРЭС-2
 Fig. 7. Initial stage of 500 kV winding damage of power transformer 1Т 500 kV, 1000 MVA Surgut power plant GRES-2

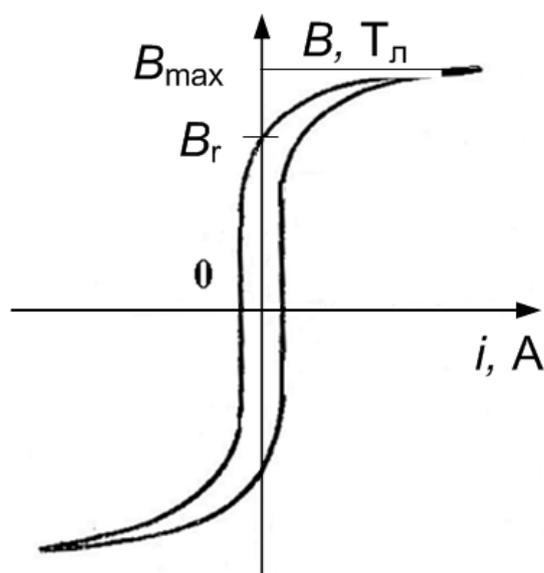


Рис. 8. Петля гистерезиса электротехнической стали
 Fig. 8. Hysteresis loop of electrotechnical steel

пряжения складывается с остаточной индукцией, и сумма может достигать $B \leq 3,0$ Тл, что значительно превышает индукцию начального насыщения $B_{нач. нас.} = 1,65$ Тл и приводит к насыщению магнитопровода, уменьшению величины индуктивности до минимального значения и, соответственно, к увеличению тока до значений близких к величине тока короткого замыкания $(5 \div 6) I_{ном}$. (рис. 9) [5].

Физически происходит процесс размагничивания магнитопровода, но так как величины индукции и тока соответствуют значениям при токах короткого замыкания, то насыщение сохраняется достаточно долго (несколько десятков периодов промышленной частоты).

Так как магнитопровод СТ намагничен несимметрично, то проявляется поток нулевой последовательности, который замыкается через бак, что вызывает выплеск расплавленного металла

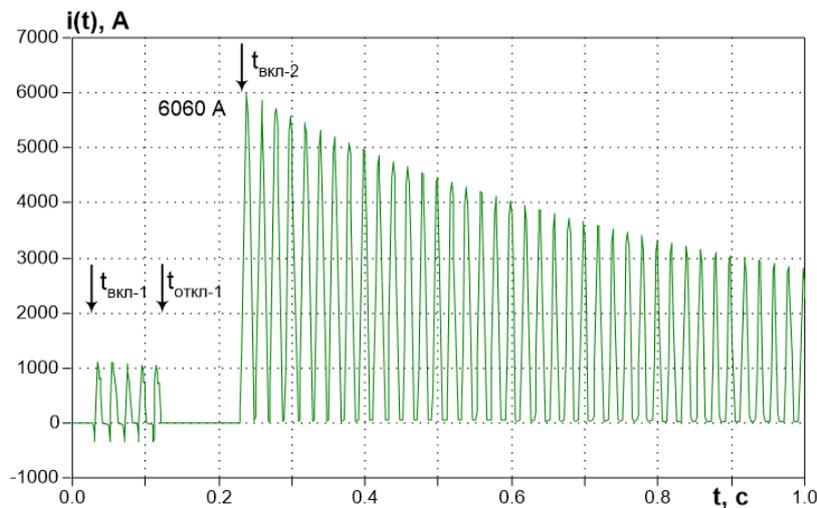


Рис. 9. Расчетная осциллограмма тока фазы С силового трансформатора ОДЦ-417000/500/24, двукратно коммутируемого на сеть 500 кВ через индуктивное сопротивление 45 Ом [7]

Fig. 9. Calculated oscillogramme of phase current of power transformer ODC-417000/500/24 under two-time commutation on 500 kV grid trough inductive resistnace 45 Ohm

из точек касания болтов, соединяющих разъём колокола и бака, что и происходит на многих СТ напряжением 110 кВ и выше.

Прохождение больших по значению токов КЗ или токов размагничивания при включении СТ на ХХ деформирует обмотки, что обычно приводит к пробоям внутренней изоляции СТ. Изменения геометрии обмоток относятся к разряду развивающихся дефектов, поэтому обнаружение изменений параметров активной части СТ и возникновения ЧР на ранней стадии позволяет своевременно принять меры по предотвращению повреждения СТ.

Однако, ни одна из систем мониторинга рекомендованная РД не предлагает онлайн диагностики параметров активной части СТ: тока ХХ, потерь ХХ, сопротивления КЗ, индуктивного сопротивления СТ.

Такая система была разработана НИЦ-ВВА и предлагалась всем энергосистемам и электростанциям письмом РАО «ЕЭС России» [6] в 1996 году. Устройство непрерывной автоматической диагностики механического состояния трёхфазного двухобмоточного трансформатора для своевременного выявления опасных деформаций обмоток силовых трансформаторов. Примеров использования этого устройства в энергетике не опубликовано.

Все эти параметры можно определить, сняв кривую намагничивания магнитопровода СТ. Для снятия кривой намагничивания измерительных ТН разработан резонансный способ (1983 год) [7].

Способ назван резонансным потому, что для получения данных, по которым строится зависимость потока от тока $f = \Psi(i)$, в реальном резонансном контуре возбуждается феррорезонанс (рис. 11), через 1-2 сек феррорезонанс подавляется. Весь процесс записывается на осциллографе. Затем по данным осциллограммы участка, когда происходит размагничивание магнитопровода ТН, и по первичной обмотке проходит максимальный однополупериодный ток (до 10-15 А), строится зависимость потока от тока $f = \Psi(i)$. Обычные способы позволяют получить эту зависимость только до 4-5А [7, 8].

Исследуя причины повреждений СТ от токов КЗ и от токов включения на ХХ, замечено, что при включении на ХХ по обмотке СТ протекают огромные токи (рис. 9, 10), при этом магнитопровод достигает почти полного насыщения. Поэтому было решено использовать осциллограмму включения СТ на ХХ для построения кривой намагничивания и получения из неё всех необходимых параметров активной части СТ онлайн.

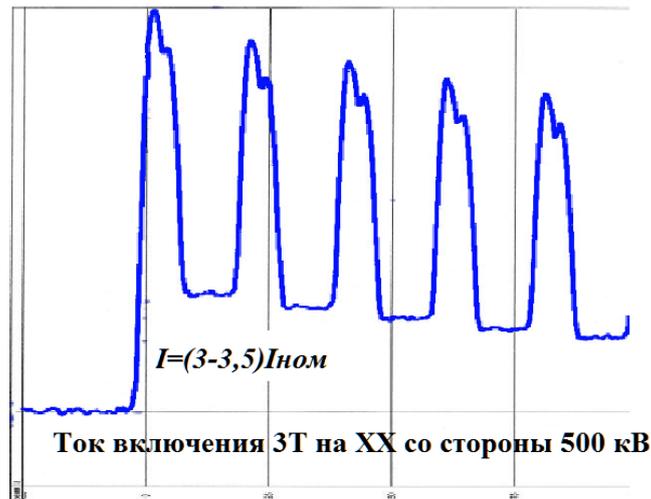


Рис. 10. Ток включения тр-ра 3Т 500 кВ, 1000 МВА Сургутской ГРЭС-2 на ХХ со стороны 500 кВ
 Fig. 10. The current under turn-on idling of power transformer 3Т 500 kV, 1000 MVA Surgut power plant GRES-2

Первое, что можно получить из осциллограммы включения без какой-либо обработки – это значение тока ХХ. Просто поставить маркер на участке осциллограммы с установившимся режимом и записать значения тока ХХ (рис. 12). Здесь же по программе обработки осциллограмм рассчитать потери ХХ.

Осциллограммы записывают в графическом и табличном виде. Далее, используя табличные данные в Excel³ находят производную потока от времени $\frac{d\psi}{dt}$, которая равна разности фазного напряжения $U_{\phi}(t)$ и падения напряжения на сопротивлении первичной обмотки $\Delta U(t)$:

$$\frac{d\psi}{dt} = U_{\phi}(t) - \Delta U(t) = U_{\phi}(t) - i_{\phi}(t) \cdot R. \quad (1)$$

Отсюда:

$$\psi(t) = \psi_{\text{ост}} + \int_0^t (U_{\phi}(t) - i_{\phi}(t) \cdot R) dt, \quad (2)$$

где $[i_{\phi}(t) \cdot R]$ – падение напряжения на сопротивлении первичной обмотки $\Delta U(t)$.

Используя зависимости $\Psi(t)$ и $i(t)$ строят зависимость $f = \Psi(i)$ (рис. 13).

На участке со стабильным значением тока ХХ можно получить его значение, что заменяет измерение тока ХХ с отключением трансформатора. Ток ХХ по осциллограмме равен: $I_A = 7,50$ А; $I_B = 7,80$ А; $I_C = 7,65$ А. Установившийся режим через 8 сек.

По полученной кривой намагничивания можно рассчитать:

- индуктивность холостого хода (L_{xx}),
- индуктивность насыщения (L_s) и сопротивление короткого замыкания (Z_k):

$$L_{xx} = \frac{\Psi_{xx}}{I_{xx}} = 109 \text{ Гн}, \quad (3)$$

³ В работе принимал участие студент гр. 90202 ин-та энергетика и транспортных систем СПбГТУ А.А.Егоров.

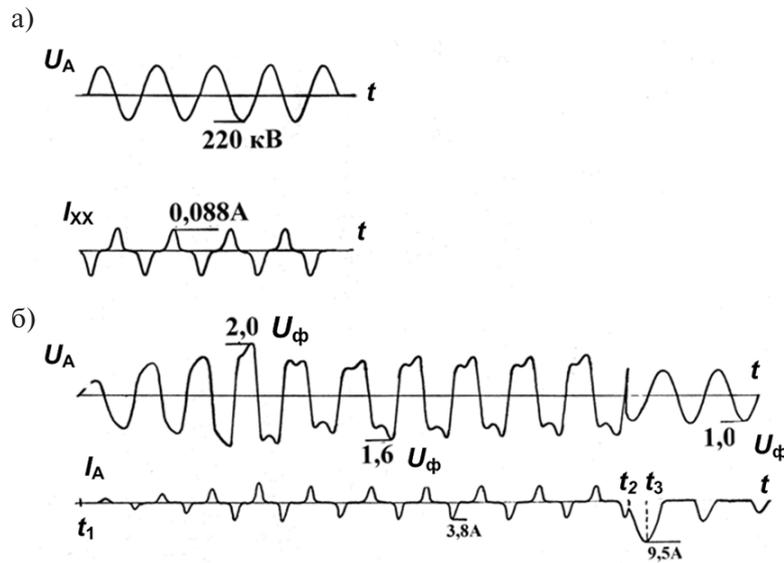


Рис. 11. Осциллограмма ФРП с ТН типа НКФ-220. а – напряжение и ток ХХ первичной обмотки, б – напряжение и ток первичной обмотки в процессе возбуждения, существования и подавления ФРП.

Fig. 11. The oscillogram of ferroresonance overvoltage in voltage transformer NKF-220 type. а – voltage and idling current of primare winding, б – voltage and current of primare winding during excitation, existence and suppres of ferroresonance overvoltage

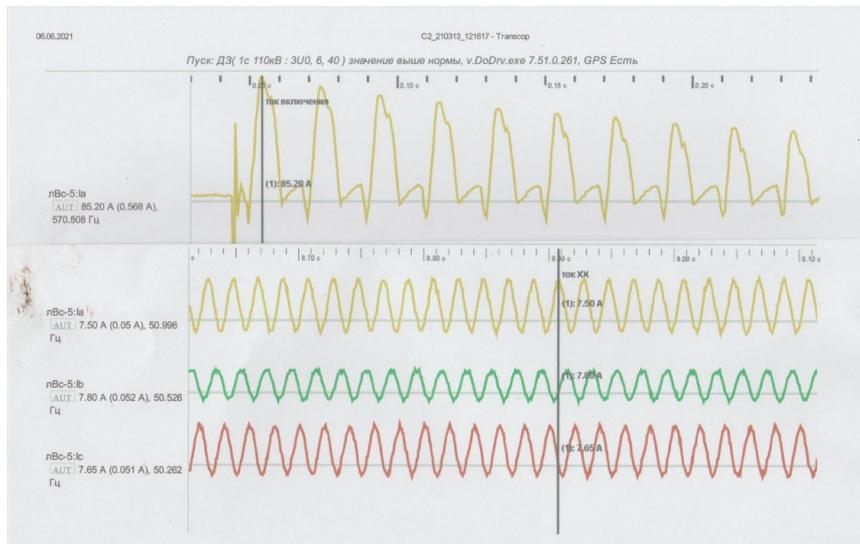


Рис. 12. Участки осциллограммы тока размагничивания фазы А

Fig. 12. Parts of oscillogram of demagnetizing current of phase A

значение I_{XX} берется из осциллограммы на момент окончания процесса размагничивания;

$$L_s = 0,46 \text{ Гн}, \quad (4)$$

L_s определяется как тангенс угла наклона кривой, соответствующей области насыщения к оси абсцисс;

$$Z_k = \sqrt{(\omega \cdot L_s)^2 + R^2} = 144,45 \text{ Ом}. \quad (5)$$

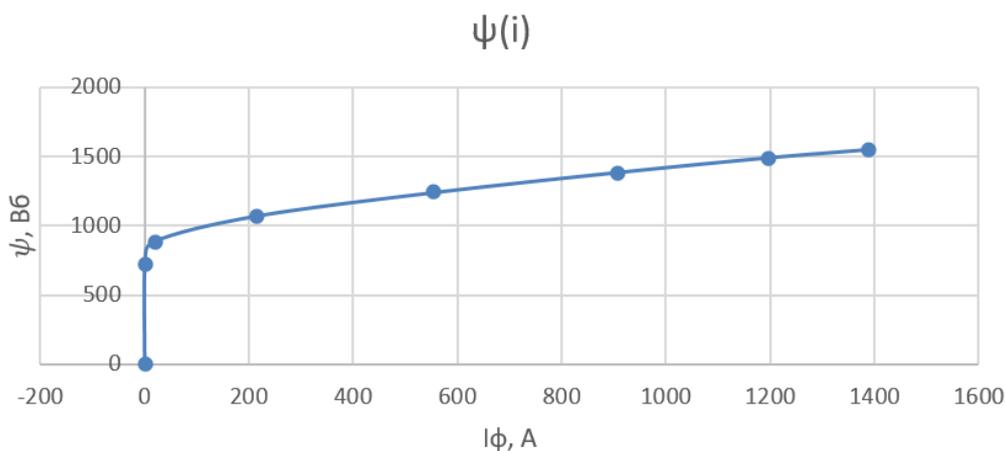


Рис. 13. Кривая намагничивания $f = \Psi(i)$

Fig. 13 Magnetization curve $f = \Psi(i)$

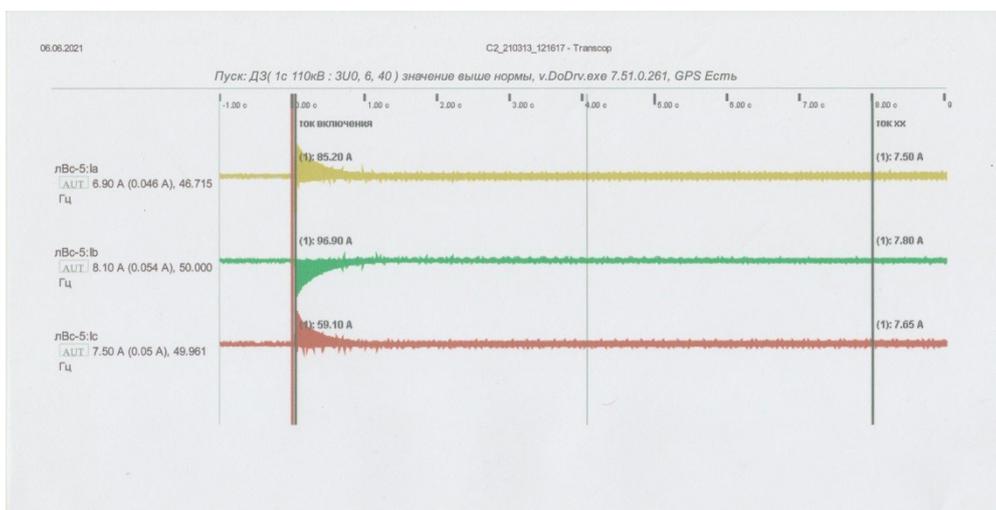


Рис. 14. Осциллограмма токов включения СТ на ХХ. Процесс размагничивания длится около 1 сек.

На участке осциллограммы с установившимся значением тока, определён ток ХХ: $I_A = 7,50$ А; $I_B = 7,80$ А; $I_C = 7,65$ А

Fig. 14. The oscillogram of currents under turn-on of idling power transformer.

The duration of demagnetization process is about 1 s.

The current of idling transformer $I_A = 7,50$ А; $I_B = 7,80$ А; $I_C = 7,65$ А determined by part of oscillogram

По данным расчетным параметрам (3, 4 и 5) можно судить о состоянии активной части силового трансформатора, сравнив их с паспортными данными трансформатора или с данными предыдущих измерений.

Выводы

1. Систему непрерывного контроля СТ необходимо дополнить устройствами для контроля тока вводов с RIP – изоляцией, аналогичных устройствам типа УДКТУ-03 для контроля ОПН с дистанционной передачей данных измерений.

2. Регистраторы (РАС) необходимо настроить на запись токов включения на ХХ и запрограммировать на обшёт осциллограммы включения для получения онлайн характеристик активной части СТ.

3. Опыт разработки эффективных методов онлайн и непрерывной диагностики указывает на то, что в энергетике не существует реальных механизмов для их внедрения не только в кратчайшие сроки, но даже в обозримом будущем. Это связано с тем, что, как и в советское время, в вопросах внедрения основная составляющая решений не техническая, а коррупционная. Необходимо возродить координационные советы по направлениям, составленные из действительно авторитетных высококвалифицированных специалистов, которые могли бы определить из множества предлагаемых технических решений наиболее перспективное. И мнение координационного совета было бы решающим при принятии решения о массовом использовании в энергетике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хренников А.Ю., Мажурин Р.В. Анализ аварийности и опыт эксплуатации высоковольтного электрооборудования электрических сетей с элегазовой изоляцией // Энергоэксперт, № 6, 2012 год.
- [2] Поляков В.С. О причинах повреждений измерительных трансформаторов тока напряжением 330-750 кВ и методах выявления опасных дефектов на ранних стадиях их развития // Энергоэксперт, № 3, 2017 год.
- [3] Славинский А.З., Сипилкин К.Г., Кассихин С.Д., Никитин Ю.В. Опыт производства и эксплуатации вводов с RIP – изоляцией // Энергоэксперт, № 2, 2013.
- [4] СТО 56947007-29.200.10.011-2008. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Системы мониторинга силовых трансформаторов и автотрансформаторов. Дата введения 2008-04-18 // ОАО «ФСК ЕЭС», 2008 год.
- [5] Евдокунин Г.А., Дмитриев М.В. Моделирование переходных процессов в электрической сети, содержащей трансформаторы при учете конфигурации их магнитной системы // «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования». Выпуск 31. Материалы семинара "Современные проблемы производства, эксплуатации и ремонта трансформаторного оборудования" 19–20 мая 2009 г. – Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2009 г. 211 с.
- [6] Евдокунин Г.А., Поляков В.С., Чертоусова В.М. Определение кривой намагничивания электромагнитных трансформаторов напряжения // В кн.: "Из опыта работы высоковольтных сетей Ленэнерго". – Л.: ЛО Энергоатомиздата. 1986. С. 76–87.
- [7] А.С. СССР №1056094. Способ измерения параметров намагничивания крупногабаритных высоковольтных трансформаторов. Евдокунин Г.А., Поляков В.С., Чертоусова В.М. Оpubл. в БИ № 13, 1983 год.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ПОЛЯКОВ Валерий Сергеевич – профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Петербургский энергетический институт повышения квалификации», канд. техн. наук.
E-mail: vspoliakov@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 27.08.2021

REFERENCES

- [1] A.Yu. Khrennikov, R.V. Mazhurin, Analiz avariynosti i opyt ekspluatatsii vysokovoltного elektrooborudovaniya elektricheskikh setey s elegazovoy izolyatsiyey // Energoekspert, № 6, 2012 god.

[2] **V.S. Polyakov**, O prichinakh povrezhdeniy izmeritelnykh transformatorov toka napryazheniyem 330-750 kV i metodakh vyyavleniya opasnykh defektov na rannikh stadiyakh ikh razvitiya // *Energoekspert*, № 3, 2017 god.

[3] **A.Z. Slavinskiy, K.G. Sipilkin, S.D. Kassikhin, Yu.V. Nikitin**, Opyt proizvodstva i ekspluatatsii vvodov s RIP – izolyatsiyey // *Energoekspert*, № 2, 2013.

4. STO 56947007-29.200.10.011-2008. Standart organizatsii OAO «FSK YeES». Sistemy monitoringa silovykh transformatorov i avtotransformatorov. Data vvedeniya 2008-04-18 // OAO «FSK YeES», 2008 god.

[5] **G.A. Yevdokunin, M.V. Dmitriyev**, Modelirovaniye perekhodnykh protsessov v elektricheskoy seti, sodержashchey transformatory pri uchete kon-figuratsii ikh magnitnoy sistemy // «Metody i sredstva otsenki sostoya-niya energeticheskogo oborudovaniya». Vypusk 31. Materialy seminaru "Sovremennyye problemy proizvodstva, ekspluatatsii i remonta transformator-nogo oborudovaniya" 19–20 maya 2009 goda. – Sankt-Peterburg: PEIPK, 2009 g. 211 s.

[6] **G.A. Yevdokunin, V.S. Polyakov, V.M. Chertousova**, Opredeleniye krivoy namagnichivaniya elektromagnitnykh transformatorov napryazheniya // V kn.: "Iz opyta raboty vysokovoltnykh setey Lenenergo". – L.: LO Energoatomizdata. 1986. S. 76–87.

[7] A.S. SSSR №1056094. Sposob izmereniya parametrov namagnichivaniya krupnogabaritnykh vysokovoltnykh transformatorov. Yevdokunin G.A., Polyakov V.S., Chertousova V.M. Opubl. v BI № 13, 1983 god.

THE AUTHOR

POLIAKOV Valeriy S. – *Federal State educational establishment PEIPK.*
E-mail: vspoliakov@yandex.ru

Received: 27.08.2021

DOI: 10.18721/JEST.27307

УДК 620.178.53:621.313

*А.И. Таджикибаев¹, Х. Драганчев², В.С. Яровой³,
Л. Гаюров⁴, Л.М. Коркин⁴*

¹ ФГАОУ ДПО Петербургский энергетический институт повышения квалификации,
Санкт-Петербург, Россия;

² Технический университет г. Варна,
г. Варна, Болгария;

³ Акционерное общество «Теккноу»,
Санкт-Петербург, Россия;

⁴ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВИБРАЦИОННОГО АНАЛИЗА

В работе дано описание результатов исследований в рамках создания системы управления производственными активами на примере определения ресурсных показателей подшипников качения электродвигателей. При исследовании разработаны математические модели для прогнозирования технического состояния подшипников. В моделях учтены факторы вторичного воздействия на примере дефектов сопряжения муфт, провоцирующих наибольшее число отказов подшипниковых узлов. Решена задача выбора периодичности контроля заключающаяся в соблюдении требования, чтобы подшипник не достиг предельного технического состояния к моменту очередного контроля. Рассмотрено два метода назначения периодичности по скорости развития повреждения. Обоснованы уравнения, учитывающие этапы приработки, нормальную эксплуатацию и повышенный износ при предельных сроках эксплуатации. Разработанная методика прогнозирования технического состояния позволяет организовать эксплуатацию на базе систем управления техническим состоянием. Внедрение систем обеспечивает минимизацию аварийности подшипниковых узлов и повышение надежности электродвигателей.

Ключевые слова: подшипники качения, электродвигатель, периодичность контроля, износ, прогнозирование технического состояния.

Ссылка при цитировании:

Таджибаев А.И., Драганчев Х., Яровой В.С., Гаюров Л., Коркин Л.М. Прогнозирование технического состояния подшипников качения на основе вибрационного анализа // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 77–85. DOI: 10.18721/JEST.27307

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*A.I. Tadzhibaev¹, H. Draganchev², V.S. Yarovoy³,
L. Gayurov⁴, L.M. Korkin⁴*

¹ Federal State educational establishment PEIPK,
St. Petersburg, Russia;

² Technical University of Varna,
Varna, Bulgaria;

³ Tek-know, St. Petersburg, Russia;

⁴ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

FORECASTING OF THE TECHNICAL CONDITION OF ROLLING BEARINGS BASED ON VIBRATION ANALYSIS

The paper describes the results of research in the framework of creating a production asset management system by the example of determining the resource indicators of rolling bearings of electric motors. Mathematical models to predict the technical condition of rolling bearings in the frame of the research have been developed. The possibilities to take into account the factors of secondary impact on the bearing assembly showed on the example of coupling defects. The problem of choosing the frequency of control is solved, which consists in meeting the requirement that the bearing does not reach the maximum technical condition by the time of the next control. Two methods of assigning periodicity according to the rate of damage development are considered. The equations that take into account the stages of running-in, normal operation and increased wear at the maximum operating time are justified. The developed method of forecasting the technical condition allows to organize operation on the basis of technical condition management systems. The implementation of such systems ensures the minimization of the accident rate of bearing units and the increase of the reliability of electric motors.

Keywords: rolling bearings, electric motor, frequency of monitoring, wear and tear, forecasting of the technical condition.

Citation:

A.I. Tadzhibaev, H. Draganchev, V.S. Yarovoy, L. Gayurov, L.M. Korin, Forecasting of the technical condition of rolling bearings based on vibration analysis, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (03) (2021) 77–85, DOI: 10.18721/JEST.27307

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. *Постановка задачи.* Техническое состояние подшипников во многом определяют надёжность, безопасность и эффективность эксплуатации электродвигателей. Исследования показывают, что в ряде случаев отказы из-за их неисправности достигает (20-25) % от общего числа отказов электродвигателей [1, 2], что подчёркивает актуальность задач оценки технического состояния подшипниковых узлов. Дефекты конструктивных элементов ПК выявляются на следующих частотах [2–4]:

$$f_{\text{нар}} = k \frac{z}{2} n \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right),$$

$$f_{\text{вн}} = k \frac{z}{2} n \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right),$$

$$f_{\text{тк}} = k \frac{d}{2D} n \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos^2 \beta \right),$$

$$f_c = k \frac{n}{2} \left[1 - (d \cos \beta) / D \right],$$

$$f_{\text{п}} = kn,$$

где: $f_{\text{нар}}$, $f_{\text{вн}}$, $f_{\text{тк}}$, f_c , $f_{\text{п}}$ – частоты, возникающие в подшипнике в повреждениях соответственно в наружном кольце, внутреннем кольце, в теле качения, сепараторе, при перекосе подшипника; $k = 1, 2, 3$, соответственно при перекосе подшипника, при износе наружного кольца, при трещинах

и раковинах на наружном кольце; n – частота вращения; D – диаметр окружности проходящей через центр тел качения; z – число тел качения; d – диаметр тел качения; β – угол контакта; при перекосе подшипника $k = 0,5$; 2. При всей очевидности подходов к идентификации дефектов есть ряд задач, решение которых требуют дополнительных исследований и анализа: приведение в соответствие описания технических состояний подшипников и их идентификацию в соответствии с современными нормативными документами с целью обоснования методик оценки ресурсных свойств, разработка методик прогнозирования технического состояния с целью обоснования интервалов между диагностическими обследованиями.

Введённые новые нормативные документы требуют соответствующей корректировки в понимании физики процессов разрушения и их увязки с категориями технического состояния. По динамике изменения технического состояния целесообразно выделение двух характерных процессов. Проведение работ со строгим исполнением требований нормативной и технологической документации на всех этапах цикла жизни ПК меняет техническое состояние на этапе эксплуатации с прогнозируемым износом и сроком службы. Однако в большинстве процесс изменения технического состояния при ошибочных действиях персонала, при воздействии сверхнормативных эксплуатационных факторов приводит к преждевременному отказу, что требует дополнительных исследований процессов разрушения. Например, часто возникающей причиной преждевременного разрушения ПК является образование задиров на телах и дорожках качения. Проведение исследований в том числе экспериментальных показали, что причинами этого являются смещение и излом осей сопрягаемых валов, ухудшение качества смазки, возникновение между рабочими поверхностями качения абразивных частичек в результате увеличения нагрузки сверх расчётного значения. Знание причин позволяет обосновать техническое воздействие: устранить смещение и излом валов, допущенных при монтаже и наладке или возникших в процессе эксплуатации; изменить состав и систему смазки; пересмотреть проект в части приведения в соответствие типа подшипника и нагрузки, заменить подшипник в установке. По существу приведённые данные демонстрируют увязку между собой вида технического воздействия на ПК с физическими процессами изменения и уровнем технического состояния.

В зависимости от величины индекса технического состояния в соответствии с методикой, утверждённой Приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 26.07.2017 №6765¹ и опираясь на измеренный уровень среднего квадратического значения (СКЗ) (фон вибрации) и усреднённую амплитуду ударных импульсов (УИ) выделить следующие категории технического состояния.

Первая категория при индексе от 85 до 100 (вид технического состояния «Очень хорошее») характеризуется незначительным превышением УИ над СКЗ и имеют уровень значительно ниже нормируемых значений аварийного предела (начальная стадия зарождения дефектов в ПК). Состояние не требует экстренного технического воздействия и может ограничиться диагностированием в плановом порядке.

Вторая категория при индексе от 70 до 85 (вид технического состояния «Хорошее»), когда увеличивается амплитуда ударных импульсов, развивая уже зародившиеся дефекты, уровень фона в силу локальности развития дефекта увеличивается незначительно, ещё нет условий для расширения зон разрушения. Предусматривается техническое воздействие, обоснованное плановым диагностированием, например, измерение параметров смазки при очередном обслуживании.

При индексе, находящемся в диапазоне от 50 до 70 (вид технического состояния «Удовлетворительное»), *третья категория* характеризуется энергией импульсов и фона достаточных для более ускоренного развития уже зародившихся дефектов и расширением зон разрушения. При таком техническом состоянии требуется усиление контроля, например, более частое измерение

¹ Приказ Минэнерго № 676 от 26.07.2017 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».

диагностических параметров, проведение дополнительных работ, например, балансировка в собственных осях.

Диапазон индекса технического состояния от 25 до 50, определённого в результате измерения параметров вибраций, является *четвёртой категорией* (вид технического состояния «Неудовлетворительное»). Состояние характеризуется стремительным расширением геометрических границ разрушения и ростом температуры за счёт преобразования механической энергии вращения во внутреннюю энергию конструктивных элементов подшипника. В этих условиях требуется усиленный даже по сравнению с третьей категорией технического состояния контроль, дополнительное техническое обслуживание и проведение ремонтных работ.

Пятая категория технического состояния с индексом меньше 25 (вид технического состояния «Критическое») характеризуется тем, что по существу сравнялись между собой измеренные уровни фона и пиков. Подшипник не способен исполнять свои функции и его разрушение может привести к разрушению установки в целом. Вид технического воздействия: вывод из эксплуатации, замена подшипника или подшипникового узла, проведение работ по реконструкции подшипникового узла.

Приведённое описание категорий технического состояния по существу является основой интерпретации результатов измерения диагностических параметров технического состояния ПК. Однако кроме текущего отнесения к одному из видов технического состояния есть не менее важная задача определения интервалов времени между измерениями. Выбор периодичности измерений при диагностических обследованиях производится, исходя из имеющейся информации о скоростях развития дефектов. Накопленный опыт диагностики показывает, что большинство дефектов ПК развивается достаточно медленно (интервалы между их обнаружением на первоначальном этапе развития и отказом могут составлять до 20-30% от ресурса) [2–4]. Но часть дефектов могут развиваться очень быстро и скачкообразно, причем интервалы между подобными событиями поддаются количественной оценке с высокой степенью неопределённости. В этих условиях задачу диагностики сводят не только к обнаружению имеющихся и установившихся по величине дефектов, но и к оценке прогноза изменения диагностического параметра, что в комплексе является важнейшим элементом создания системы управления техническим состоянием.

Выделяют следующие виды разрушения ПК: отрыв частичек металла с рабочих поверхностей, возникновение пластических деформаций тел качения и колец, абразивное изнашивание при возникновении между рабочими поверхностями частиц высокой твёрдости, разрушение в результате чрезмерных ударных нагрузок, разрушение из-за ухудшения условий смазки. Несмотря на достаточную изученность приведённых физических процессов их динамика зависит от большого числа факторов, возникающих на каждом этапе цикла жизни ПК. При разработке важно задание в конструктиве таких радиальных и осевых нагрузок, которые бы обеспечили базовую долговечность []. В зависимости от величины осевой составляющей она либо суммируется с внешней осевой силой, либо вычитается, создавая дополнительные усилия ускоряя или замедляя процессы разрушения. Усталостные дефекты подшипников формируются в местах касательного давления тел качения на места соприкосновения с внутренними и наружными кольцами и определяется максимальным касательным напряжением сдвига

$$\tau_{\max} = k_{\tau} \sigma_{\max} / 2,$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение в плоскости контактной площадки; k_{τ} – коэффициент геометрического соотношения размеров контактной площадки.

Важными составляющими, влияющими на динамику изменения технического состояния при проведении монтажных работ являются следующие факторы: наличие шероховатостей на посадочных поверхностях, градиент температур между подшипником и валом при тепловой сборке,

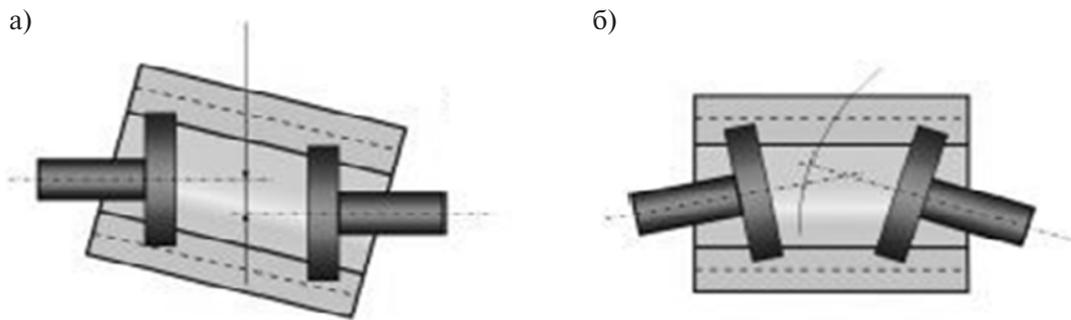


Рис. 1. Дефекты сопряжения муфт: а) смещение осей; б) излом оси
 Fig. 1. Coupling defects a) offset of the axes; b) axis break

смещение и излом осей муфт. Нарушение соосности соединяемых опор (рис. 1) приводит к противофазной вибрации подшипников. Следствием, как правило, является повышение вибрации двойной частоты, если подшипники установлены в одном корпусе. Повышение вибрации в подвижных муфтах вызывается следующими дефектами: несоосность шеек роторов и венцов полу-муфт; отсутствие контактов по пружинам и кулачкам; износ рабочих поверхностей; ухудшение смазки. В этих условиях прогнозирование технического состояния ПК усложняется элементами неопределенности анализа параметров муфт. Особое место в проявлении нестационарности сигнала занимает наличие зазоров в подшипнике и неплотная посадка, приводящие к смещению колец друг относительно друга. Временные сигналы и спектры таких дефектов имеют нестабильную фазу колебаний с вариациями в широких пределах от одного измерения к другому. Таким образом техническое состояние ПК определяется не только условиями эксплуатации, но и всеми этапами предшествующими вводу в эксплуатацию. Обеспечение надёжности, безопасности и эффективности на основе прогнозирования требует анализа предыстории с моделированием статистики и динамики технического состояния.

Прогнозирование по предыстории осуществляется на основе использования функций, максимально близко описывающих динамику развития дефекта. Краткосрочный прогноз может моделироваться линейными функциями вида

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 \tau$$

с адаптацией наклона подбором коэффициентов α_0 и α_1 в зависимости от характера изменения дефекта. Длительный прогноз реализуется моделированием ломаной прямой, либо показательной, экспоненциальной или комбинированной функциями.

Для более длительного прогноза для аппроксимации применяются показательные и экспоненциальные функции вида:

$$y = \tau^{\alpha_2} \quad \text{и} \quad y = e^{\alpha_3 \tau}.$$

Более универсальной для процесса износа является функция вида:

$$y = a_0 \tau^{\alpha_4} e^{\alpha_5 \tau}.$$

Уравнение охватывает все три процесса износа приработку, износ с постоянной скоростью (нормальную эксплуатацию) и повышенный износ, соответствующий развитию неисправности.

Для области нормального износа, аппроксимация параметров может быть осуществлена по линейной зависимости. Уровень вибрации возрастает незначительно.

Для оценки параметра α_i приближенной зависимостью, аппроксимирующей статистические данные, наиболее универсальным способом является метод наименьших квадратов. По методу наименьших квадратов α_i выбирают таким образом, чтобы квадратичная погрешность имела минимальное значение. Так для аппроксимации $y = \alpha_1 \tau$, $y = \tau^{\alpha_2}$ и $y = e^{\alpha_3 \tau}$, коэффициент « α » определяют соответственно по формуле:

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \tau y}{\sum_{i=1}^n \tau^2}; \quad \alpha_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \lg \tau \lg y}{\sum_{i=1}^n (\lg \tau)^2}; \quad \alpha_3 = \frac{\sum_{i=1}^n \tau \lg y}{\lg e \sum_{i=1}^n \tau^2},$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ – номер измерения; τ – время прогнозирования; $\alpha_i = y_{\text{пред}} / y_{0-i}$; y_0 – начальное значение измеряемого параметра.

При прогнозировании по известной скорости развития, характеризуемой скоростью изменения величины диагностического параметра, прогноз осуществляется по формуле:

$$\delta_{\text{пр}} = S_b \tau,$$

где $\delta_{\text{пр}}$ – прогнозируемое значение диагностического параметра; S_b – скорость изменения диагностического параметра; τ – время прогноза.

Метод используют для прогноза по единичному первоначальному замеру, когда имеется достаточная статистика по скорости изменения диагностического параметра. При прогнозировании необходимо учитывать будут ли на прогнозируемый период соблюдаться условия эксплуатации, какие имели место в предыстории. Если условия будут отличаться, то в прогноз необходимо внести поправки на влияние изменившихся условий.

Выбор периодичности контроля заключается в соблюдении требования, чтобы объект контроля не достиг предельного значения технического состояния за время между процедурами контроля.

Если выбирается постоянная скорость развития неисправности, то скорость принимается максимально возможной.

Период контроля определяется по формуле:

$$\tau_{\text{к}} = \frac{\delta_{\text{пр.в}} - \delta_{\text{зам}}}{S_{\text{макс}}},$$

где $\delta_{\text{пр.в}}$ – предельно возможный диагностический параметр; $\delta_{\text{зам}}$ – измеряемое значение диагностического параметра; $S_{\text{макс}}$ – максимально возможная скорость изменения диагностического параметра.

При переменном периоде контроля последующий период контроля выбирается проводя линию S (максимальной возможной скорости развития неисправности) до пересечения с линией, соответствующей значению предельно возможного контролируемого диагностического параметра. Точка пересечения определяет момент следующего контроля K_2 , и т. д. В этом случае переменный период контроля, исходя из максимально возможной скорости развития повреждения, уменьшается с наработкой:

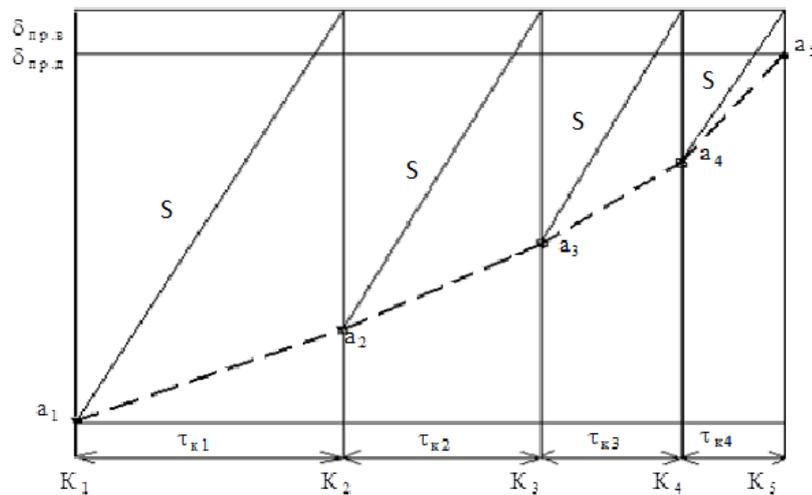


Рис. 2. К выбору периодов контроля:

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – значения фактических диагностических параметров в момент измерения

Fig. 2. To the choice of control periods:

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – the values of the actual diagnostic parameters at the time of measurement

$$\tau_{к1} > \tau_{к2} > \tau_{к3} > \tau_{к4}.$$

Однако нестационарность измеряемых сигналов. Особое место в проявлении нестационарности сигнала занимает наличие зазоров в подшипнике и неплотная посадка, приводящие к смещению колец друг относительно друга. Временные сигналы и спектры таких дефектов имеют нестабильную фазу колебаний с вариациями в широких пределах от одного измерения к другому. Таким образом техническое состояние ПК определяется не только условиями эксплуатации, но и всеми этапами предшествующими вводу в эксплуатацию.

Выводы

Таким образом, опираясь на актуальный нормативный документ², анализ физических процессов зарождения и развития дефектов обосновано описание категорий технического состояния ПК и технических воздействий. Проведенный анализ зависимости параметров ПК от эксплуатационных факторов в том числе вторичных (дефекты муфт) позволил обосновать методику прогнозирования технического состояния с целью определения интервалов периодического контроля и организации системы управления техническим состоянием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987.

[2] Вибрационный анализ / Е.С. Голуб и др. – СПб.: ПЭИПК, 2009. – 85 с. [Библиотека специалиста по ТДНК объектов энергетики, Серия 1. «Методические основы ТДНК», Выпуск 1.3 (4)].

[3] Влияние изменения скорости вращения вала роторного оборудования на обработку в частотной области. Ю.П. Асламов, А.П. Асламов, И.Г. Давыдов, А.В. Цурко. Доклады БГУИР, №3 (113), 2018.

² Приказ Минэнерго № 676 от 26.07.2017 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».

- [4] Харкевич А.А. Спектры и анализ – М. : URSS, 2018.
- [5] Algorithms for refinement of the shaft rotational speed for solving the problems of vibration diagnostics of rotary equipment / Y. Aslamov [et al.] // WCCM. 2017. P. 15
- [6] Науменко А.П. Вероятностно-статистические методы принятия решений: теория, примеры, задачи / А.П. Науменко, И.С. Кудрявцева, А.И. Одинец; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: ОмГТУ, 2018.
- [7] Зацепин А.Ф. Акустический контроль / А.Ф. Зацепин; под ред. В.Е.Щербина. – Екатеринбург: Изд-во урал. ун-та, 2016. – 211 с.
- [8] Зорин В.А. Надежность механических систем: учебник / В.А. Зорин. – М.: ИНФРА-М, 2017.
- [9] Викторов В.С. Модели и методы расчёта надёжности технических систем. Изд. 2-е, испр. – М.: ЛЕНАНД, 2016.
- [10] Савостин А.А. Интеллектуальная диагностика нефтегазового оборудования методами теории идентификационных измерений / А.А. Савостин, К.Т. Кошекков, Ю.Н. Кликушин. – М.: КноРус, 2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТАДЖИБАЕВ Алексей Ибрагимович – профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Петербургский энергетический институт повышения квалификации», без степени.
E-mail: a_tadzhibaev@inbox.ru

ДРАГАНЧЕВ Христо – профессор, Технический университет г. Варна, без степени.
E-mail: hristo.draganchev@gmail.com

ЯРОВОЙ Виктор Сергеевич – инженер, Акционерное общество «Теккноу», без степени.
E-mail: yarovoi@tek-know.ru

ГАЮРОВ Лутфулло – бакалавр, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: gayurov.l@edu.spbstu.ru

КОРКИН Леонид Михайлович – бакалавр, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: leonid_korkin@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 10.09.2021

REFERENCES

- [1] M.D. Genkin, A.G. Sokolova, Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mekhanizmov. – М.: Mashinostroyeniye, 1987.
- [2] Vibratsionnyy analiz / Ye.S. Golub i dr. – SPb.: PEIPK, 2009. – 85 s. [Biblioteka spetsialista po TDNK obyektov energetiki, Seriya 1. «Metodicheskiye osnovy TDNK», Vypusk 1.3 (4)].
- [3] Vliyaniye izmeneniya skorosti vrashcheniya vala rotornogo oborudovaniya na obrabotku v chastotnoy oblasti. Yu.P. Aslamov, A.P. Aslamov, I.G. Davydov, A.V. Tsurko. Doklady BGUIR, №3 (113), 2018.
- [4] A.A. Kharkevich, Spektry i analiz – М.: URSS, 2018.
- [5] Algorithms for refinement of the shaft rotational speed for solving the problems of vibration diagnostics of rotary equipment / Y. Aslamov [et al.] // WCCM. 2017. P. 15.
- [6] A.P. Naumenko, Veroyatnostno-statisticheskiye metody prinyatiya resheniy: teoriya, primery, zadachi / A.P. Naumenko, I.S. Kudryavtseva, A.I. Odinets; Minobrnauki Rossii, OmGTU. – Омск: OmGTU, 2018.

- [7] **A.F. Zatsepin**, Akusticheskiy kontrol / A.F. Zatsepin; pod red. V.Ye. Shcherbina. – Yekaterinburg: Izd-vo ural. un-ta, 2016. – 211 s.
- [8] **V.A. Zorin**, Nadezhnost mekhanicheskikh sistem: uchebnik / V.A. Zorin. – M.: INFRA-M, 2017.
- [9] **V.S. Viktorov**, Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem. Izd. 2-ye, ispr. – M.: LENAND, 2016.
- [10] **A.A. Savostin**, Intellektualnaya diagnostika neftegazovogo oborudovaniya metodami teorii identifikatsionnykh izmereniy / A.A. Savostin, K.T. Koshekov, Yu.N. Klikushin. – M.: KnoRus, 2018.

THE AUTHORS

TADZHIBAEV Aleksey I. – *Federal State educational establishment PEIPK.*
E-mail: a_tadzhibaev@inbox.ru

DRAGANCHEV Hristo – *Technical University of Varna.*
E-mail: hristo.draganchev@gmail.com

YAROVOY Viktor S. – *Tek-know.*
E-mail: yarovoi@tek-know.ru

GAYUROV Lutfullo – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: gayurov.l@edu.spbstu.ru

KORKIN Leonid M. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: leonid_korkin@mail.ru

Received: 10.09.2021

DOI: 10.18721/JEST.27308
УДК 620.179.14

*А.М. Поволоцкая, С.М. Задворкин,
Е.А. Путилова, А.Н. Мушников*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПРИ УПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПОСЛЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Приведены результаты изучения влияния циклического нагружения по схеме отнулевого растяжения с амплитудой, примерно соответствующей условному пределу текучести, и последующего статического упругого растяжения вдоль того же направления на поведение магнитных характеристик низколегированной конструкционной стали 08Г2Б. Измерения магнитных характеристик образцов проводили как в условиях замкнутой магнитной цепи, так и с применением накладных преобразователей вдоль и поперек направления приложения нагрузки. Показано, что предыстория в виде циклического нагружения сказывается на закономерностях изменения магнитных параметров материала при последующем упругом деформировании вследствие остаточных сжимающих напряжений, формируемых предварительным циклическим нагружением вдоль оси нагружения. Установлен диапазон приложенных растягивающих напряжений, в котором магнитные характеристики, измеренные на образцах, подвергнутых предварительному циклическому растяжению на различное количество циклов, изменяются однозначно, что дает принципиальную возможность использования данных параметров для разработки методов оценки напряжений в изделиях из стали 08Г2Б с учетом их предыстории.

Ключевые слова: циклическое нагружение, упругое растяжение, магнитострикция, коэрцитивная сила, приставной датчик.

Ссылка при цитировании:

Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А., Мушников А.Н. Особенности поведения магнитных характеристик образцов из низколегированной конструкционной стали при упругом деформировании после предварительного циклического нагружения // *Материаловедение. Энергетика.* 2021. Т. 27, № 3. С. 86–96. DOI: 10.18721/JEST.27308

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*A.M. Povolotskaya, S.M. Zadvorkin,
E.A. Putilova, A.N. Mushnikov*

Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia

PECULIARITIES OF MAGNETIC BEHAVIOR OF LOW-ALLOY STRUCTURAL STEEL SPECIMENS UNDER ELASTIC DEFORMATION AFTER PRELIMINARY CYCLIC LOADING

The paper shows results of studying the effect of zero-to-tension cyclic loading with an amplitude approximately corresponding to the conventional yield strength, and subsequent static elastic tension along the same direction on the magnetic behavior of low-alloy structural 08G2B steel. Magnetic characteristics were measured both in a closed magnetic circuit and with the use of attached transducers along and across the direction of the applied loading. The cyclic prehistory affects the magnetic behavior of the material during its subsequent elastic deformation since preliminary cyclic loading induces various compressive residual stresses along the direction of the loading. The study reveals the range of applied tensile stresses in which the magnetic characteristics measured on the specimens cyclically pretensioned with different numbers of cycles vary unambiguously. Thus, these parameters have potential application in the development of methods for evaluating stresses in 08G2B steel products in view of their history.

Keywords: Cyclic loading, elastic tension, magnetostriction, coercive force, attached transducer.

Citation:

A.M. Povolotskaya, S.M. Zadvorkin, E.A. Putilova, A.N. Mushnikov, Peculiarities of magnetic behavior of low-alloy structural steel specimens under elastic deformation after preliminary cyclic loading, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (03) (2021) 86–96, DOI: 10.18721/JEST.27308

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Разработка методов контроля упругих деформаций, возникающих в процессе эксплуатации изделий из ферромагнитных конструкционных материалов, является актуальной задачей. В большинстве работ, посвященных решению данной задачи, не принимается во внимание предыстория материала, в то время как текущее состояние металлоконструкций, как правило, существенно отличается от заложенного в проектной документации и при выпуске с завода-производителя. В работах [1, 2] показано, что предварительная пластическая деформация статическим растяжением образцов из конструкционной стали значительно влияет на поведение их магнитных характеристик при последующем упругом деформировании. С учетом того, что в течение своего жизненного цикла изделия подвергаются чаще всего циклическим нагрузкам [3, 4], представляет интерес исследование, аналогичное проведенным в [1, 2], но в котором предварительное деформирование осуществляется циклическим нагружением.

В настоящей работе изучено влияние предварительного отнулевого циклического растяжения на различное количество циклов конструкционной стали 08Г2Б на поведение ряда ее магнитных характеристик в условиях последующего статического упругого одноосного растяжения.

Материалы и методики исследований

Для исследований из низколегированной конструкционной стали 08Г2Б были вырезаны плоские образцы с головками вдоль направления прокатки. Рабочая часть образцов сечением $6 \times 34,6$ мм имела длину 100 мм. После изготовления образцы отжигали в вакууме при температуре 700 °С в течение 3 часов для минимизации внутренних напряжений, наведенных при вырезке образцов.

Предварительные механические испытания, проведенные на универсальной испытательной машине Tinius Olsen Super L60 в соответствии с ГОСТ 1497-84, показали, что для исследуемого материала условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 280$ МПа, временное сопротивление разрыву $\sigma_B = 535$ МПа, относительное остаточное удлинение после разрыва $\delta = 30\%$.

Циклические испытания образцов проводили на сервогидравлической установке Instron 8801 по схеме отнулевого растяжения с амплитудой 300 МПа, что немного выше значения $\sigma_{0,2}$, с частотой 3 Гц. В результате были получены образцы после 0, 30000, 50000, 100000 и 300000 циклов нагружения.

Затем предварительно циклически деформированные образцы подвергали упругому растяжению с одновременным измерением их магнитных характеристик как в замкнутой магнитной цепи, так и с использованием приставного магнитного устройства (ПМУ).

Измерения магнитных характеристик в замкнутой магнитной цепи осуществляли вдоль оси нагружения образцов с помощью гистерезисграфа Remagraph C-500. Напряженность внутреннего магнитного поля H , измеряемая с помощью С-образного магнитного потенциалметра, достигала 500 А/см. Из петель магнитного гистерезиса определяли коэрцитивную силу H_c и остаточную магнитную индукцию B_r . По основной кривой намагничивания определяли максимальную магнитную проницаемость $\mu_{\text{макс}}$.

При измерениях коэрцитивной силы вдоль и поперек оси нагружения H_{c3}^{\parallel} и H_{c3}^{\perp} в качестве ПМУ использовали П-образный приставной электромагнит с сечением полюсов 18×9 мм и расстоянием между полюсами 16 мм.

Используя цифровой анализатор шумов Баркгаузена Rollscan 300, измеряли среднеквадратичные значения напряжения магнитных шумов Баркгаузена за 10 циклов перемагничивания. Сечение полюсов ПМУ анализатора Rollscan 300 составляло 3,5×8,0 мм, расстояние между полюсами – 3 мм. Частота тока перемагничивания составляла 95 Гц. Измерение среднеквадратичных значений напряжения магнитных шумов Баркгаузена осуществляли, размещая ПМУ в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль и поперек направления приложенной нагрузки.

Измерение линейной магнитострикции λ образцов осуществляли с помощью разработанной в ИМАШ УрО РАН многоканальной прецизионной системы сбора данных (ССД) [5], реализующей аналого-цифровое преобразование интегрирующего типа с нелинейной шкалой и позволяющей измерять малые электрические величины с малыми погрешностями. Для преобразования магнитострикции в электрические сигналы применена стандартная мостовая схема Уинстона, выполненная на тензорезисторах типа КФ5П1-10-400-А-12. Измерительные тензорезисторы были наклеены посередине рабочей части образца, а термокомпенсационные – на медную пластину, которую располагали вблизи исследуемого образца. Питание моста осуществляли постоянным стабилизированным током. Электрическая величина в виде разности потенциалов с дифференциального выхода моста поступала в один из каналов ССД, имеющей недифференциальный вход, через согласующий усилитель. Все эти решения позволили получить разрешающую способность измерительной системы порядка десятых долей миллиОма. Для регистрации полевых зависимостей магнитострикции перемагничивание и измерение внутреннего поля осуществляли посредством комплекса Remagraph C-500, описанного выше.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны зависимости полученных в условиях замкнутой магнитной цепи магнитных характеристик образцов от приложенных напряжений σ при упругом статическом растяжении после их предварительного циклического нагружения на различное количество циклов n . Можно отметить, что при растяжении с ростом n характер изменения магнитных характеристик для образцов с различным исходным напряженно-деформированным состоянием сохраняется: с увеличением σ коэрцитивная сила H_c , остаточная индукция B_r и максимальная магнитная проницаемость $\mu_{\text{макс}}$ изменяются с образованием экстремумов.

Как видно из рис. 1, с ростом количества циклов предварительного циклического нагружения образцов наблюдаемые экстремумы смещаются в область больших напряжений статического растяжения σ (это более заметно выражено на зависимостях $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\text{макс}}(\sigma)$), то есть расширяется диапазон σ , в котором магнитные характеристики образцов изменяются монотонно. Сдвиг экстремумов на зависимостях $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\text{макс}}(\sigma)$ в сторону больших значений σ свидетельствует об усилении остаточных напряжений сжатия с ростом количества циклов предварительного циклического нагружения.

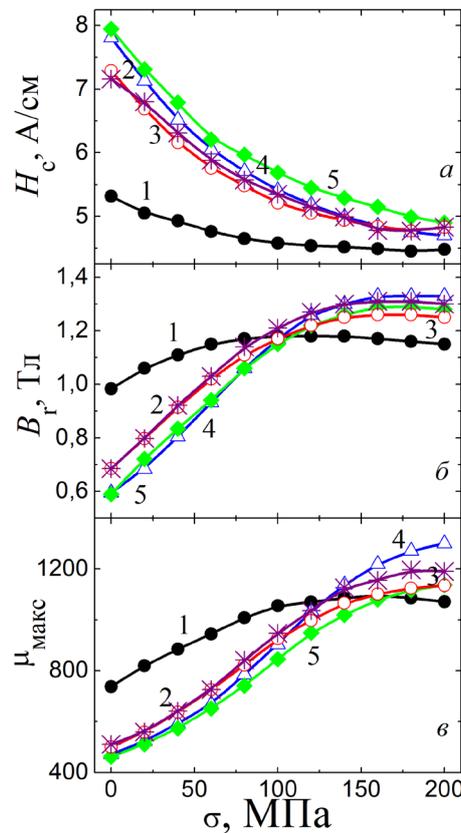


Рис. 1. Зависимости от приложенных растягивающих напряжений значений коэрцитивной силы (а), остаточной индукции (б) и максимальной магнитной проницаемости (в), измеренных в условиях замкнутой магнитной цепи на образцах, предварительно циклически деформированных на различное количество циклов: кривая 1 (•) – $n = 0$; 2 (*) – 30000; 3 (o) – 50000; 4 (Δ) – 100000; 5 (♦) – 300000 циклов

Fig. 1. Applied tensile stress dependences of coercive force (a), residual induction (b), and maximum magnetic permeability (c), all measured in a closed magnetic circuit on specimens cyclically pre-deformed with different numbers of cycles: curve 1 (•) – $n = 0$; 2 (*) – 30,000; 3 (o) – 50,000; 4 (Δ) – 100,000; 5 (♦) – 300,000 cycles

Сравнение приведенных на рис. 1 результатов с результатами работ [1, 2] показывает, что предыстория в виде предварительного циклического растяжения сказывается на закономерностях изменения магнитных параметров материала при его последующем упругом деформировании так же, как и предыстория в виде предварительной пластической деформации статическим растяжением. Это обусловлено остаточными напряжениями, вносимыми циклическим нагружением.

На рис. 2 (I, II) представлены зависимости от приложенных растягивающих напряжений значений коэрцитивной силы при квазистатическом намагничивании (H_{cs}^{\parallel} и H_{cs}^{\perp}) и среднеквадратичных значений напряжения магнитных шумов Баркгаузена (U^{\parallel} и U^{\perp}), измеренных в переменном магнитном поле частотой 95 Гц, при расположении накладных преобразователей на исследуемых образцах соответственно вдоль и поперек направления приложения нагрузки.

Из сравнения рис. 1 и 2 можно видеть качественное подобие зависимостей $H_c(\sigma)$ и $H_{cs}^{\parallel}(\sigma)$, измеренных на образцах в условиях замкнутой магнитной цепи и с помощью ПМУ в продольном направлении соответственно.

Характер зависимостей коэрцитивной силы H_{cs}^{\perp} , измеренной с помощью приставного датчика в поперечном направлении, от приложенных растягивающих напряжений изменяется с возрастанием количества циклов предварительного циклического нагружения: значения H_{cs}^{\perp} об-

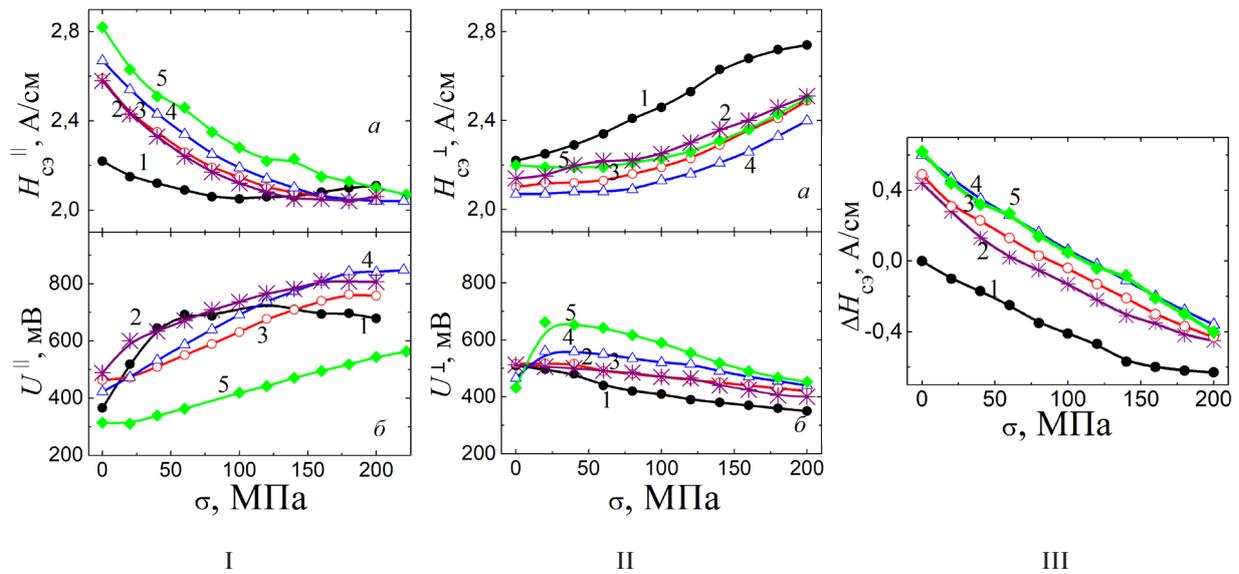


Рис. 2. Зависимости $H_{сз}^{\parallel}(\sigma)$ (Ia), $H_{сз}^{\perp}(\sigma)$ (IIa), $U^{\parallel}(\sigma)$ (Iб), $U^{\perp}(\sigma)$ (IIб) и $\Delta H_{сз}(\sigma)$ (III).

Измерения проведены с помощью ПМУ на образцах, предварительно циклически деформированных на различное количество циклов: кривая 1 (\bullet) – $n = 0$; 2 ($*$) – 30000; 3 (\circ) – 50000; 4 (Δ) – 100000; 5 (\blacklozenge) – 300000 циклов. (I) – расположение датчика вдоль оси нагружения; (II) – поперек оси нагружения

Fig. 2. The dependences $H_{сз}^{\parallel}(\sigma)$ (Ia), $H_{сз}^{\perp}(\sigma)$ (IIa), $U^{\parallel}(\sigma)$ (Ib), $U^{\perp}(\sigma)$ (IIb), and $\Delta H_{сз}(\sigma)$ (III). The measurements were made with the use of attached transducers on specimens cyclically pre-deformed with different numbers of cycles: curve 1 (\bullet) – $n = 0$; 2 ($*$) – 30,000; 3 (\circ) – 50,000; 4 (Δ) – 100,000; 5 (\blacklozenge) – 300,000 cycles

разцов в исходном состоянии ($n = 0$) и после 30000 и 50000 циклов монотонно увеличиваются с ростом σ (кривые 1, 2 и 3 на рис. 2 II, a), в то время как зависимости $H_{сз}^{\perp}(\sigma)$, соответствующие образцам, циклически нагруженным на 100000 и 300000 циклов (кривые 4 и 5 на рис. 2 II, a), неоднозначны, с минимумом. Такие особенности поведения зависимостей $H_{сз}^{\perp}(\sigma)$ обусловлены следующим. В результате проведенных нами усталостных испытаний в образцах в направлении растяжения формируются остаточные напряжения сжатия, а значит, в перпендикулярных направлениях – остаточные напряжения растяжения. При последующем растяжении такого образца в том направлении, в котором к образцу была приложена предварительная циклическая нагрузка, на него в поперечном направлении будут оказывать суммарное действие внешние сжимающие напряжения (в этом случае схема измерений соответствует измерениям магнитных характеристик в продольном направлении под действием сжимающей нагрузки) и остаточные растягивающие напряжения. Таким образом, на поведение магнитных характеристик будет оказывать действие суперпозиция приложенных и остаточных напряжений: в случае, когда уровень остаточных растягивающих напряжений относительно низкий, внешние сжимающие напряжения приводят к монотонному увеличению значений коэрцитивной силы, а в случае соизмеримости уровня остаточных напряжений с внешними приложенными – к образованию минимума, который формируется в момент компенсации внутренних напряжений внешними.

Среднеквадратичные значения напряжений шумов Баркгаузена имеют противоположный характер изменения с ростом растягивающих напряжений по сравнению с коэрцитивной силой.

Разность значений коэрцитивной силы, измеренных в продольном и поперечном направлениях, $\Delta H_{сз}(\sigma)$, где $\Delta H_{сз} = H_{сз}^{\parallel} - H_{сз}^{\perp}$, как видно из рис. 2 (III), с ростом растягивающих напряжений изменяется однозначно во всем интервале приложенных напряжений для всех образцов, циклически нагруженных на разное количество циклов. Вследствие отсутствия экстремумов на зависимостях $\Delta H_{сз}(\sigma)$ использование данного параметра в качестве информативного при разработке

методик оценки действующих напряжений может быть более предпочтительным по сравнению с другими ранее рассмотренными характеристиками.

На рис. 3а приведены полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ для образца, подвергнутого предварительно на отнулевое циклическое растяжение на 100000 циклов, при различных значениях приложенных растягивающих напряжений. Определение $\mu_{\text{диф}}$ проводили по данным измерений в замкнутой магнитной цепи. Для образца в недеформированном состоянии (до статического растяжения) на полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости наблюдаются два максимума. Первый пик наблюдается в отрицательных полях, второй – в положительных полях, то есть в области полей от насыщения до остаточной индукции. На рис. 3а показаны только те участки $\mu_{\text{диф}}(H)$, на которых формируются пики.

Формирование двух пиков на зависимостях $\mu_{\text{диф}}(H)$ у циклически деформированных образцов связано с особенностями перераспределения обратимых и необратимых процессов перемагничивания и разделением вкладов в процессы перемагничивания 90- и 180-градусных доменных границ. Аналогичное формирование двух максимумов на зависимостях дифференциальной магнитной проницаемости было отмечено в работах [6–9] для образцов, деформированных путем статического одноосного растяжения.

С увеличением статических растягивающих напряжений высота пика $\mu_{\text{диф макс}}$ в отрицательных полях на полевой зависимости для образца, предварительно циклически деформированного на 100000 циклов, увеличивается, а его расположение $H_{\mu_{\text{диф макс}}}$ смещается в сторону более слабых полей. В то же время, пик на кривых $\mu_{\text{диф}}(H)$, расположенный в положительных полях, с ростом приложенных напряжений становится менее выраженным, локализация его также смещается в сторону слабых полей и при значениях 80-100 МПа пик совсем пропадает.

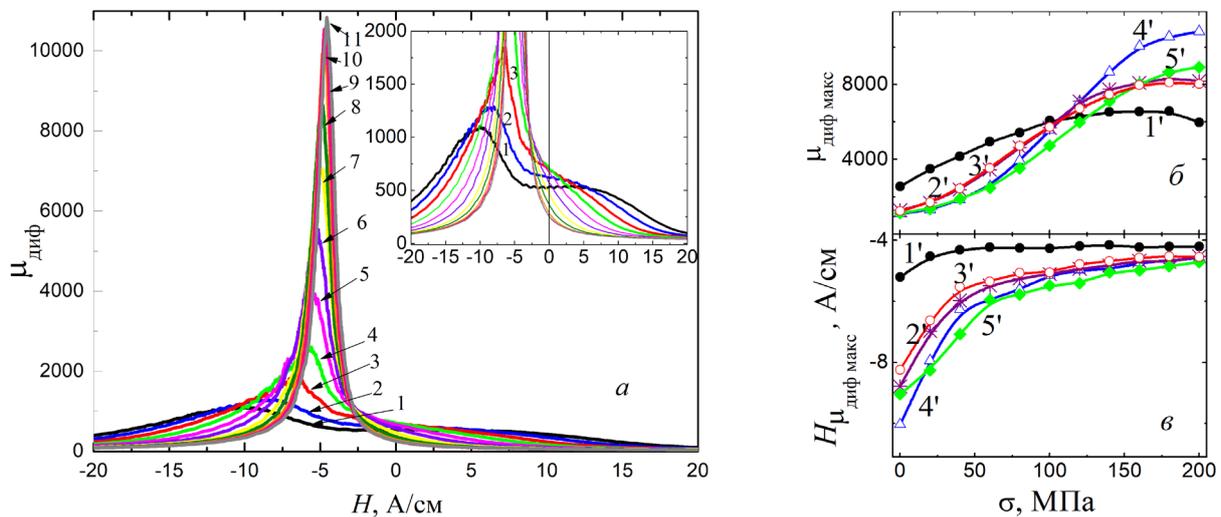


Рис. 3. (а) – зависимости $\mu_{\text{диф}}(H)$ для образца, предварительно циклически деформированного на 100000 циклов, при различных величинах растягивающих напряжений σ : кривая 1 – $\sigma = 0$; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100; 7 – 120; 8 – 140; 9 – 160; 10 – 180; 11 – 200 МПа; (б) – зависимости $\mu_{\text{диф макс}}(\sigma)$ для образцов, циклически деформированных на различное количество циклов; (в) – $H_{\mu_{\text{диф макс}}}(\sigma)$.
Кривая 1' (•) – $n = 0$; 2' (*) – 30000; 3' (o) – 50000; 4' (Δ) – 100000; 5' (\blacklozenge) – 300000 циклов

Fig. 3. (a) – the dependences $\mu_{\text{d}}(H)$ for a specimen cyclically pre-deformed with 100,000 cycles, at different values of applied tensile stresses σ : curve 1 – $\sigma = 0$, 2 – 20, 3 – 40, 4 – 60, 5 – 80, 6 – 100, 7 – 120, 8 – 140, 9 – 160, 10 – 180, and 11 – 200 MPa; (b) – the dependences $\mu_{\text{d max}}(\sigma)$ for specimens cyclically pre-deformed with different numbers of cycles; (c) – $H_{\mu_{\text{d max}}}(\sigma)$:
curve 1' (•) – $n = 0$; 2' (*) – 30,000; 3' (o) – 50,000; 4' (Δ) – 100,000; 5' (\blacklozenge) – 300,000 cycles

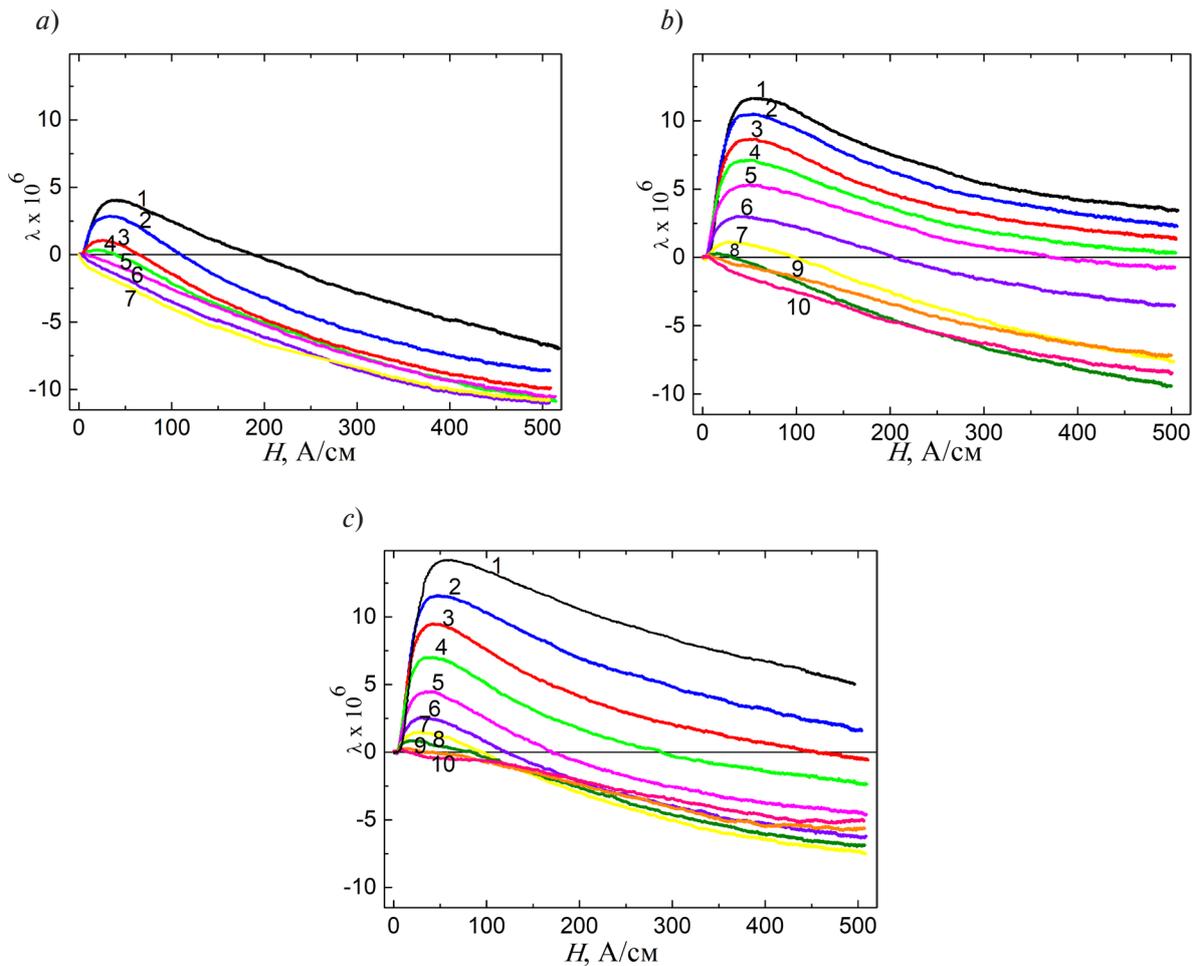


Рис. 4. Полевые зависимости продольной магнитострикции при различных значениях растягивающих напряжений для образцов, предварительно испытанных на отнулевое циклическое растяжение с различным количеством циклов. *a* – 0; *b* – 30000; *в* – 100000 циклов. Кривая 1 – $\sigma = 0$; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100; 7 – 120; 8 – 140; 9 – 160; 10 – 180 МПа

Fig. 4. The field dependences of longitudinal magnetostriction at different values of tensile stresses for the specimens preliminarily tested for zero-to-tension cyclic loading with different numbers of cycles: *a* – 0, *b* – 30,000, and *c* – 100,000 cycles; curve 1 – $\sigma = 0$; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100; 7 – 120; 8 – 140; 9 – 160; 10 – 180 MPa

На рис. 3 (*б*, *в*) представлены зависимости величины максимума дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф макс}}$ и поля максимума дифференциальной магнитной проницаемости $H_{\text{диф макс}}$ от приложенных напряжений для образцов, предварительно циклически нагруженных на различное количество циклов. Как видно из рисунка, в диапазоне растягивающих напряжений от 0 до 100 МПа для всех исследованных образцов значения $\mu_{\text{диф макс}}$ и $H_{\text{диф макс}}$ изменяются монотонно.

На рис. 4 (*а*, *б* и *в*) приведены полевые зависимости продольной магнитострикции λ при растягивающей нагрузке различной величины для образцов из стали 08Г2Б, испытанных на отнулевое циклическое растяжение с количеством циклов 0, 30000 и 100000 циклов, соответственно. Как было отмечено в [10–12], чем выше уровень приложенных сжимающих напряжений в стали (соответственно, деформация сжатия), тем больше площадь положительного участка полевой зависимости магнитострикции и величина ее максимума. Сравнивая кривые 1 на рис. 4 (*а*, *б* и *в*), соответствующие состоянию образцов до деформирования статическим растяжением, можно видеть увеличение положительного участка с ростом количества циклов предварительного циклическо-

го нагружения. Это подтверждает вывод о возрастании уровня остаточных напряжений сжатия, наведенных предварительным циклическим нагружением, с увеличением количества циклов.

Характер поведения полевых зависимостей магнитострикции меняется даже при незначительном увеличении приложенных растягивающих напряжений, что связано с перестройкой доменной структуры ферромагнетика вследствие магнитоупругого эффекта. Во-первых, уменьшается максимальная величина магнитострикции. Во-вторых, под действием напряжений происходит уменьшение значений магнитных полей, при которых магнитострикция меняет свой знак с положительного на отрицательный. В-третьих, при определенной величине напряжений положительный участок полевой зависимости магнитострикции совсем исчезает и магнитострикция, начиная с нулевого значения магнитного поля, принимает только отрицательные значения. Для образца, не подвергнутого циклическому нагружению, это происходит уже при нагрузке 100 МПа, для образца, предварительно циклически нагруженного на 30000 циклов – в диапазоне растягивающих напряжениях от 160 до 180 МПа, для 100000 циклов – выше 180 МПа.

Изменение характера полевой зависимости продольной магнитострикции под действием упругого одноосного нагружения определяет особенности поведения магнитных характеристик под действием тех же нагрузок [13–15]. В диапазоне напряжений, где произошли смена знака магнитострикции и, соответственно, изменение типа магнитной текстуры, на зависимостях магнитных параметров, измеренных вдоль направления нагружения, от растягивающих напряжений формируются экстремумы. Соответствие положений минимумов продольной коэрцитивной силы значениям напряжений, при которых продольная магнитострикция становилась отрицательной, было отмечено в работах [11, 13, 16].

Заключение

На примере стали 08Г2Б показано, что предыстория в виде предварительного циклического нагружения по схеме отнулевого растяжения с амплитудой, соответствующей условному пределу текучести, сказывается на последующих закономерностях изменения магнитных параметров материала при его упругом деформировании. Данное обстоятельство следует учитывать при разработке магнитных методик оценки параметров напряженно-деформированного состояния элементов стальных конструкций. Поведение всех исследованных магнитных характеристик, в том числе магнитострикции, при статическом растяжении свидетельствует об усилении напряжений сжатия, обусловленных предварительным циклическим нагружением, в направлении действия циклической нагрузки.

Исследования магнитострикции образцов из стали 08Г2Б, подвергнутых предварительному отнулевому циклическому растяжению, показали, что последующее деформирование статическим растяжением на определенном этапе приводит к исчезновению положительного участка на полевых зависимостях магнитострикции, при всех значениях магнитного поля магнитострикция принимает отрицательные значения. Диапазоны растягивающих напряжений, в которых происходит смена знака магнитострикции, а, значит, и типа магнитной текстуры, примерно соответствуют диапазонам напряжений, в которых формируются экстремумы на зависимостях от растягивающей нагрузки магнитных характеристик, измеренных в продольном направлении.

Установлено, что такие магнитные характеристики, как продольная коэрцитивная сила, максимальная магнитная проницаемость, остаточная индукция, а также величина максимума дифференциальной магнитной проницаемости образцов из стали 08Г2Б, подвергнутых циклическому нагружению на разное количество циклов, при последующем статическом растяжении изменяются однозначно в диапазоне напряжений от 0 МПа до 100 МПа, а поперечная коэрцитивная сила демонстрирует монотонное возрастание в диапазоне от 100 МПа до 200 МПа. При этом разность значений коэрцитивной силы, измеренных в продольном и поперечном направлениях, монотонно уменьшается во всем интервале приложенных напряжений 0...200 МПа. Полученные

зависимости магнитных характеристик исследованной стали от напряжений статического растяжения при различном количестве циклов предварительного циклического нагружения могут быть использованы при разработке методик оценки параметров напряженно-деформированного состояния изделий из стали 08Г2Б.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-48-660035_p_a. При выполнении работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Горкунов Э.С., Субачев Ю.В., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М. Влияние предварительной пластической деформации на поведение магнитных характеристик высокопрочной трубной стали контролируемой прокатки при упругом одноосном растяжении (сжатии) // Дефектоскопия. – 2015. – № 9. – С. 49–60.
- [2] Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А. Сравнительный анализ поведения магнитных характеристик пластически деформированного металла различных зон сварной трубы при упругой деформации // Дефектоскопия. – 2017. – № 9. – С. 26–34.
- [3] Suresh S. *Fatigue of Materials*, second ed., Cambridge University Press, New York, 2004.
- [4] Murakami Y., Miller K.J. What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process // *Int. J. Fatigue*. – 2005. – Vol. 27. – No. 8. – Pp. 991–1005.
- [5] Lukin N.A., Rubin L.S. Use of Nonlinear Functional Analog to Digital Conversion in Precision Measurements of Small Electrical Quantities // *Gyroscopy and Navigation*. – 2015. – Vol. 6. – No. 2. – P. 149–155.
- [6] Makar J.M., Tanner B.K. The effect of plastic deformation and residual stress on the permeability and magnetostriction of steels // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2000. – Vol. 222. – No. 3. – P. 291–304.
- [7] Pal'a J., Stupakov O., Bydzovsky J., Tomas I., Novak V. Magnetic behaviour of low-carbon steel in parallel and perpendicular directions to tensile deformation // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2007. – Vol. 310. – P. 57–62.
- [8] Кулеев В.Г., Царькова Т.П., Сажина Е.Ю., Дорошек А.С. О влиянии пластической деформации малоуглеродистых ферромагнитных сталей на изменение формы их петель гистерезиса и зависимостей дифференциальной проницаемости от поля // Дефектоскопия. – 2015. – № 12. – С. 32–45.
- [9] Огнева М.С., Ничипурук А.П., Сташков А.Н. Локальное определение поля наведенной магнитной анизотропии и уровня остаточных механических напряжений в деформированных растяжением объектах из малоуглеродистых сталей // Дефектоскопия. – 2016. – № 11. – С. 3–9.
- [10] Anderson P.I., Moses A.J., Stanbury H.J. Assessment of the stress sensitivity of magnetostriction in grain-oriented silicon steel // *IEEE Trans. Magn.* – 2007. – Vol. 43. – P. 3467–3476.
- [11] Горкунов Э.С., Субачев Ю.В., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М. Влияние упругой одноосной деформации среднеуглеродистой стали на ее магнитострикцию в продольном и поперечном направлениях // Дефектоскопия. – 2013. – № 10. – С. 40–52.
- [12] Wun-Fogle M., Restorff J.B., Cuseo J.M., Garshelis I.J., Bitar S. Magnetostriction and Magnetization of Common High Strength Steels // *IEEE Trans. Magn.* – 2009. – Vol. 45. – No. 10. – P. 4112–4115.
- [13] Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Соловьев К.Е., Задворкин С.М. Влияние магнитоупругого эффекта на гистерезисные свойства среднеуглеродистой стали при одноосном нагружении // Дефектоскопия. – 2010. – № 9. – С. 17–25.
- [14] Горкунов Э.С., Субачев Ю.В., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М. Влияние упругой деформации на гистерезисные свойства двуслойного ферромагнетика, составленного из компонентов, обладающих магнитострикцией разных знаков // Дефектоскопия. – 2014. – № 8. – С. 42–56.
- [15] Leuning N., Steentjes S., Schulte M., Bleck W., Hameyer K. Effect of elastic and plastic tensile mechanical loading on the magnetic properties of NGO electrical steel // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2016. – Vol. 417. – P. 42–48.

[16] Костин В.Н., Царькова Т.П., Ничипурук А.П., Лоскутов В.Е., Лопатин В.В., Костин К.В. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 54–67.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПОВОЛОЦКАЯ Анна Моисеевна – старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, канд. техн. наук.

E-mail: anna.povolotskaya.68@mail.ru

ЗАДВОРКИН Сергей Михайлович – ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, канд. физ.-мат. наук.

E-mail: zadvorkin@imach.uran.ru

ПУТИЛОВА Евгения Александровна – старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, канд. техн. наук.

E-mail: tuevaevgenya@mail.ru

МУШНИКОВ Александр Николаевич – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, без степени.

E-mail: mushnikov@imach.uran.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 05.08.2021

REFERENCES

[1] E.S. Gorkunov, Yu.V. Subachev, A.M. Povolotskaya, S.M. Zadvorkin, Vliyaniye predvaritelnoy plasticheskoy deformatsii na povedeniye magnitnykh kharakteristik vysokoprochnoy trubnoy stali kontroliruyemoy prokatki pri uprugom odnoosnom rastyazhenii (szhatii) // Defektoskopiya. – 2015. – № 9. – С. 49–60.

[2] E.S. Gorkunov, A.M. Povolotskaya, S.M. Zadvorkin, Ye.A. Putilova, Sravnitelnyy analiz povedeniya magnitnykh kharakteristik plasticheski deformirovannogo metalla razlichnykh zon svarnoy truby pri uprugoy deformatsii // Defektoskopiya. – 2017. – № 9. – С. 26–34.

[3] S. Suresh, Fatigue of Materials, second ed., Cambridge University Press, New York, 2004.

[4] Y. Murakami, K.J. Miller, What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process // Int. J. Fatigue. – 2005. – Vol. 27. – No. 8. – P. 991–1005.

[5] N.A. Lukin, L.S. Rubin, Use of Nonlinear Functional Analog to Digital Conversion in Precision Measurements of Small Electrical Quantities // Gyroscopy and Navigation. – 2015. – Vol. 6. – No. 2. – P. 149–155.

[6] J.M. Makar, B.K. Tanner, The effect of plastic deformation and residual stress on the permeability and magnetostriction of steels // J. Magn. Magn. Mater. – 2000. – Vol. 222. – No. 3. – P. 291–304.

[7] J. Pal'a, O. Stupakov, J. Bydzovsky, I. Tomas, V. Novak, Magnetic behaviour of low-carbon steel in parallel and perpendicular directions to tensile deformation // J. Magn. Magn. Mater. – 2007. – Vol. 310. – P. 57–62.

[8] V.G. Kuleyev, T.P. Tsarkova, Ye.Yu. Sazhina, A.S. Doroshek, O vliyaniy plasticheskoy deformatsii malouglerodistykh ferromagnitnykh staley na izmeneniye formy ikh petel gisterezisa i zavisimostey differentsialnoy pronitsayemosti ot polya // Defektoskopiya. – 2015. – № 12. – С. 32–45.

- [9] **M.S. Ogneva, A.P. Nichipuruk, A.N. Stashkov**, Lokalnoye opredeleniye polya navedennoy magnitnoy anizotropii i urovnya ostatochnykh mekhanicheskikh napryazheniy v deformirovannykh rastyazheniyem obyektakh iz malouglerodistykh staley // Defektoskopiya. – 2016. – № 11. – S. 3–9.
- [10] **P.I. Anderson, A.J. Moses, H.J. Stanbury**, Assessment of the stress sensitivity of magnetostriction in grain-oriented silicon steel // IEEE Trans. Magn. – 2007. – Vol. 43. – P. 3467–3476.
- [11] **E.S. Gorkunov, Yu.V. Subachev, A.M. Povolotskaya, S.M. Zadvorkin**, Vliyaniye uprugoy odnoosnoy deformatsii sredneuglerodistoy stali na yeye magnitostriksiyu v prodolnom i poperechnom napravleniyakh // Defektoskopiya. – 2013. – № 10. – S. 40–52.
- [12] **M. Wun-Fogle, J.B. Restorff, J.M. Cuseo, I.J. Garshelis, S. Bitar**, Magnetostriction and Magnetization of Common High Strength Steels // IEEE Trans. Magn. – 2009. – Vol. 45. – No. 10. – P. 4112–4115.
- [13] **E.S. Gorkunov, A.M. Povolotskaya, K.Ye. Solovyev, S.M. Zadvorkin**, Vliyaniye magnitouprugogo effekta na gisterezisnyye svoystva sredneuglerodistoy stali pri odnoosnom nagruzhenii // Defektoskopiya. – 2010. – № 9. – S. 17–25.
- [14] **E.S. Gorkunov, Yu.V. Subachev, A.M. Povolotskaya, S.M. Zadvorkin**, Vliyaniye uprugoy deformatsii na gisterezisnyye svoystva dvasloynogo ferromagnitika, sostavlennogo iz komponentov, obladayushchikh magnitostriksiyey raznykh znakov // Defektoskopiya. – 2014. – № 8. – S. 42–56.
- [15] **N. Leuning, S. Steentjes, M. Schulte, W. Bleck, K. Hameyer**, Effect of elastic and plastic tensile mechanical loading on the magnetic properties of NGO electrical steel // J. Magn. Magn. Mater. – 2016. – Vol. 417. – P. 42–48.
- [16] **V.N. Kostin, T.P. Tsarkova, A.P. Nichipuruk, V.Ye. Loskutov, V.V. Lopatin, K.V. Kostin**, Neobratimyye izmeneniya namagnichennosti kak indikatory napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ferromagnitnykh obyektov // Defektoskopiya. – 2009. – №11. – S. 54–67.

THE AUTHORS

POVOLOTSKAYA Anna M. – *Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.*

E-mail: anna.povolotskaya.68@mail.ru

ZADVORKIN Sergey M. – *Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.*

E-mail: zadvorkin@imach.uran.ru

PUTILOVA Evgeniya A. – *Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.*

E-mail: tuevaevgenya@mail.ru

MUSHNIKOV Aleksandr N. – *Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.*

E-mail: mushnikov@imach.uran.ru

Received: 05.08.2021

DOI: 10.18721/JEST.27309

УДК 621.314

*А.Е. Монастырский*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ МАСЛОПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Системы непрерывного мониторинга энергетического оборудования получают в последние годы все более широкое распространение, что обусловлено рядом причин. В первую очередь это определяется существенным постарением парка энергетического оборудования, приводящим к снижению его эксплуатационной надежности. Действительно, для поддержания требуемой надежности "старое" оборудование требует гораздо большее внимание и особенно значительное сокращение периода его контроля. Значительную роль в этом процессе играет цифровизация отрасли. Цифровизация невозможна без использования новейших технологий, к которым относится непрерывный контроль оборудования. Кроме того, цифровизация предполагает сокращение человеческого фактора в эксплуатации на базе более широкого использования компьютерных технологий. В наибольшей степени все это относится к трансформаторному оборудованию. Системы непрерывного мониторинга трансформаторного оборудования начали применяться в конце 80-х годов и к настоящему времени накоплен значительный опыт их разработки и эксплуатации. В работе проанализированы основные принципы построения систем непрерывного мониторинга силовых трансформаторов высших классов напряжения, показана необходимость использования их, особенно для трансформаторов с большим сроком службы, определены требования, предъявляемые к этим системам, приведены параметры, которые необходимо контролировать этими системами. В качестве примера системы непрерывного мониторинга описана система СКИТ, разработанная в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, которая внедрена и проходит промышленную эксплуатацию на ряде энергетических объектах.

Ключевые слова: непрерывный мониторинг, силовые трансформаторы, принципы построения, необходимые параметры, основные требования к системам.

Ссылка при цитировании:

Монастырский А.Е. Современные системы мониторинга технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов // *Материаловедение. Энергетика.* 2021. Т. 27, № 3. С. 97–108. DOI: 10.18721/JEST.27309

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*А.Е. Monastyrskiy*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

MODERN SYSTEMS FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF POWER OIL-FILLED TRANSFORMERS

Continuous monitoring systems for power equipment have become more and more widespread in recent years, due to a number of reasons. First of all, this is determined by a significant aging of the power equipment park, which leads to a decrease in its operational reliability. Indeed, to maintain

the required reliability, “old” equipment requires much more attention and especially a significant reduction in the period of its monitoring. The digitalization of the industry plays a significant role in this process. Digitalization is impossible without the use of the latest technologies, which include continuous monitoring of equipment. In addition, digitalization implies a reduction in the human factor in operation based on the wider use of computer technology. To the greatest extent, all this applies to transformer equipment. Systems for continuous monitoring of transformer equipment began to be used in the late 80s and by now, considerable experience has been accumulated in their development and operation. The paper analyses the basic principles of constructing systems for continuous monitoring of power transformers of higher voltage classes, shows the need to use them, especially for transformers with a long service life, defines the requirements for these systems, gives the parameters that need to be monitored by these systems. As an example of a continuous monitoring system, the authors describe SKIT system developed at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. SKIT has been introduced and is being commercialized at a number of energy facilities.

Keywords: continuous monitoring, power transformers, construction principles, required parameters, basic requirements for systems.

Citation:

A.E. Monastyrskiy, Modern systems for monitoring the technical condition of power oil-filled transformers, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (03) (2021) 97–108, DOI: 10.18721/JEST.27309

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Силовые трансформаторы высших классов напряжения являются одним из наиболее ответственных и дорогостоящих элементов в системах выработки, передачи и распределения электроэнергии. Контроль и оценка состояния этих аппаратов приобретают в последние годы особую актуальность. Связано это в первую очередь с постепенным старением парка этого оборудования. Действительно, к настоящему времени количество трансформаторов в генерирующих и сетевых предприятиях эксплуатирующихся с превышением нормативного ресурса превосходит в среднем 60%, а в некоторых достигает 96%, с постоянной тенденцией к увеличению этого значения. Эта тенденция обусловлена целым рядом причин. Мощное энергетическое строительство в период 1965–1990 гг. потребовало поставить в эксплуатацию огромное количество трансформаторов. Сейчас эти трансформаторы отработали нормативный ресурс, но заменить их на новые и невозможно, в силу экономических и производственных причин, и нецелесообразно, поскольку их физический ресурс остается еще весьма большим. Вместе с тем эксплуатация трансформаторов с большим сроком службы имеет существенные особенности. Целью настоящей работы является анализ опыта разработки и эксплуатации систем непрерывного мониторинга состояния силовых трансформаторов высших классов напряжения.

Основная часть

Анализ аварийности силовых трансформаторов показывает, что отказы, связанные с выработкой физического ресурса составляют (по разным источникам) только 7–20% [4]. Остальные отказы обусловлены появлением и развитием в трансформаторах различных видов дефектов, основная масса которых, при своевременном их выявлении, могла бы быть устранена. Поэтому основной задачей при эксплуатации трансформаторов является своевременное выявление появившихся дефектов, на ранних стадиях их развития, и устранение их. Для решения этой задачи в предыдущие годы была разработана система периодического контроля, нашедшая отражение в РД 34.45-51.300-97 “Объемы и нормы испытаний электрооборудования” [5]. В соответствии с ним минимальный период контроля силовых трансформаторов составляет 6 месяцев для нормально работающего трансформатора. Очевидно, что периодичность контроля должна определяться временем развития дефекта, т.е. должна быть существенно меньше этого времени. Действительно, наибольшее количество дефектов, развивающихся в трансформаторах с малым сроком экс-

плуатации (меньше нормативного ресурса — "молодые" трансформаторы), имеют большое время развития, измеряющееся годами — т.н. медленно развивающиеся дефекты. По оценкам их количество в "молодых" трансформаторах составляет порядка 75%, и именно для них разрабатывалась система периодического контроля. Однако кроме медленно развивающихся дефектов в трансформаторах существуют дефекты, которые развиваются в течение нескольких месяцев — быстро развивающиеся дефекты, а также дефекты, время развития которых измеряется сутками и даже часами, т.н. внезапные отказы. Система периодического контроля практически не в состоянии своевременно выявлять эти дефекты, но учитывая, что их количество для "молодых" трансформаторов не превышает 25%, с этим приходилось мириться.

По мере увеличения срока эксплуатации количество быстро развивающихся дефектов и внезапных отказов в трансформаторах увеличивается и для трансформаторов со сроком эксплуатации превышающем 30 лет ("старые" трансформаторы) количественное соотношение дефектов выглядит примерно следующим образом: 40% — медленно развивающиеся дефекты, 40% — быстро развивающиеся дефекты, 20% — внезапные отказы [1]. Очевидно, что для таких трансформаторов существующая система периодического контроля оказывается неудовлетворительной.

Ситуация с надежностью силовых трансформаторов усугубляется еще тем обстоятельством, что по мере развития отечественного трансформаторостроения основной параметр, определяющий физический ресурс трансформаторной изоляции — допустимая рабочая напряженность в середине первого масляного канала, постоянно увеличивалась. В сороковые годы прошлого века она была принята с "запасом" — 3,5 кВ/мм. В пятидесятые годы она была увеличена до 4 кВ/мм, в шестидесятые — до 4,5 кВ/мм и т.д. до восьмидесятых годов она достигла значения 5,5 кВ/мм. Длительные исследования ресурсных характеристик трансформаторной изоляции, проведенные в ведущих отечественных лабораториях ВИТ, ВЭИ, ЛПИ, показали, что это последнее значение соответствует физическому ресурсу 30-35 лет. А зависимость ресурса от допустимой напряженности подчиняется степенному уравнению с показателем степени ~40. Понятно, что даже небольшое снижение допустимой рабочей напряженности приводит к существенному увеличению физического ресурса. Чем раньше выпускался трансформатор, тем большие запасы по ресурсу он имел. К настоящему времени мы подходим к рубежу, когда трансформаторы, выпущенные в восьмидесятых годах, подходят к выработке физического ресурса. Трансформаторы выпущенные в семидесятых годах имели запасы, но и отработали на 10 лет дольше и приближаются к этому же рубежу, и т.д. Таким образом, если в ближайшие годы не будет решена задача своевременного (на ранних стадиях) выявления и устранения дефектов в трансформаторах, их аварийность будет лавинообразно нарастать. Единственным кардинальным решением этой проблемы является использование систем непрерывного контроля, которые позволяют выявлять даже внезапные отказы.

К основным требованиям, предъявляемые к таким системам относятся [2]:

1. Однозначное выявление любых видов дефектов, появляющихся в трансформаторах.
2. Простота и надежность работы.
3. Отсутствие факторов, ухудшающих работу самого трансформатора.
4. Минимальные эксплуатационные затраты и требования к квалификации обслуживающего персонала.
5. Минимальная стоимость аппаратуры.

Приведенные требования являются в определенной степени противоречивыми, поэтому для удовлетворения их системы должны оптимизироваться. Действительно, для удовлетворения первого требования количество параметров, контролируемых системой должно быть достаточно велико, что противоречит требованию минимальной стоимости. Требование простоты и надежности противоречит возможностям сложных измерений ключевых параметров. Поэтому наиболее трудной задачей при создании систем непрерывного контроля является выбор минимально необ-

ходимого набора параметров, обеспечивающих удовлетворение первого требования. Разработка таких систем началась в восьмидесятые годы прошлого века. Первые их реализации показали, что помимо основной задачи – выявления появившихся опасных дефектов – они способны решать и ряд дополнительных задач, связанных с повышением удобства эксплуатации, с возможностью снижения эксплуатационных затрат, с обеспечением возможности регулирования ресурса, а также с получением более детальной информации о процессах, происходящих в трансформаторе, которая может использоваться для совершенствования конструкции трансформаторов. Необходимо отметить, что реализация дополнительных функций влечет за собой значительное увеличение стоимости этих систем, которая в конечном счете ложится на плечи потребителя. Поскольку широкое внедрение таких систем является достаточно затратным, необходимо минимизировать затраты без снижения эффективности контроля. Это и является основой методики выбора оптимальных систем непрерывного контроля состояния силовых трансформаторов. Для решения этой задачи необходимо прежде всего выбрать минимально необходимый набор контрольных параметров силовых трансформаторов, позволяющий выявить любой вид дефектов, появляющихся в трансформаторе.

Для трансформаторов высших классов (110 кВ и выше) напряжения "катастрофические" отказы (под катастрофическими понимаются отказы, приводящие либо к утилизации, либо к дорогостоящему ремонту) связаны в основном с повреждением изоляции. Для надежного выявления дефектов в изоляции трансформаторов высших классов напряжения необходимо контролировать сравнительно небольшую группу параметров: электрическую прочность масла, газы, растворенные в масле, диэлектрические характеристики основной изоляции высоковольтных вводов и частичные разряды в основной изоляции и изоляции вводов. К сожалению, прямой контроль электрической прочности масла достаточно сложен, поэтому необходимо контролировать параметры, определяющие электрическую прочность масла: появление в масле эмульгированной влаги и механических примесей. Контроль механических примесей может проводиться фотометрическим методом, а появление эмульгированной влаги может выявляться либо определением точки росы – прямое измерение, либо косвенно путем измерения влажности твердой изоляции и температуры. Практически любые дефекты, появляющиеся в трансформаторе, сопровождаются выделением газов, растворяющихся в масле. На этом принципе основывается мощный диагностический инструмент – "Хроматографический анализ растворенных газов" (ХАРГ). Однако для некоторых видов дефектов, связанных с развитием на начальной стадии маломощных частичных разрядов, ХАРГ обладает существенным запаздыванием. Поэтому система должна позволять контролировать изменение характеристик частичных разрядов, свободных от этого недостатка. Стоимость наиболее простых систем, обеспечивающих контроль перечисленных параметров достигает всего 350...400 тыс.руб, что составляет менее 1% от стоимости трансформатора мощностью 40 тыс. кВА.

Системы для более мощных трансформаторов могут оснащаться измерителями дополнительных параметров, которые связаны с удобством эксплуатации и возможностью регулирования ресурса. К ним относятся контроль вибраций, параметра Z_k , контроль РПН, контроль и управление системой охлаждения трансформатора и др. Стоимость таких систем увеличивается по сравнению с простейшими на порядок и более, поэтому экономическая целесообразность их применения оправдывается для трансформаторов мощностью 400 тыс. кВА и более.

Особое место занимают системы, предназначенные для получения информации о процессах, развивающихся в трансформаторах в эксплуатации, с целью совершенствования конструкции и оптимизации режимов работы трансформаторов. Заинтересованными в таких системах являются в первую очередь производители трансформаторов. Эти системы оказываются наиболее дорогими и включают в себя помимо указанных контроль распределения температуры вдоль обмотки, контроль состояния магнитной системы, контроль изменения геометрии обмоток, более мощ-

ные измерители характеристик частичных разрядов и др. К сожалению, такие системы появляются пока только у зарубежных производителей. Эти системы решают не только задачи получения информации об аппарате, но и управляют режимами работы трансформатора, фиксируют историю работы, составляют аналитические прогнозы по остаточному ресурсу, выполняют различные вспомогательные функции. Разработка таких систем нацелена на перспективу создания "интеллектуальных" трансформаторов, не требующих участия человека в эксплуатации. Стоимость столь сложных систем весьма высока, однако она должна окупаться отсутствием эксплуатационных затрат, продлением ресурса трансформаторов, повышением надежности энергоснабжения. Такие подходы сейчас активно развиваются в мире в виде технологий "Smart Grid" – полностью автоматизированное энергоснабжение.

Следует отметить негативную тенденцию, наблюдаемую при внедрении систем непрерывного контроля силовых трансформаторов. Как было показано выше, наиболее необходимыми такие системы оказываются для "старых" трансформаторов. В то же время этими системами сейчас оборудуются в основном новые трансформаторы, для которых они станут необходимыми через 20 ... 30 лет. Связано это по-видимому с организационными причинами распределения средств по статьям: проще выделить средства при приобретении нового оборудования, чем для обеспечения эксплуатации старого. Тенденция эта порочна и ее надо преодолевать.

Исходя из изложенного следует принять, что основной задачей для обеспечения надежной работы парка силовых трансформаторов является широкое внедрение наиболее простых и дешевых систем непрерывного контроля на максимальном количестве "старых" трансформаторов. Одновременно с этим целесообразно для наиболее мощных и ответственных трансформаторов применение систем с дополнительными функциями. Что же касается применения наиболее сложных систем, то их реализацию должны взять на себя заводы-изготовители.

В Санкт-Петербургском Политехническом Университете Петра Великого разработана Система непрерывного Контроля состояния Изоляции силовых Трансформаторов высших классов напряжения СКИТ [3]. Комплекс СКИТ предназначен для измерения параметров, определяющих зарождение любого вида дефектов в изоляции трансформаторов, а также процессы старения и разрушения изоляции. Он позволяет производить измерения следующих параметров:

- концентрация растворенных в масле газов 50...1000 ppm;
- влажность твердой изоляции 0...10 %;
- концентрация механических примесей с размерами в диапазоне 5...500 мкм до 100 000 шт. в 100 см³
- tgδ высоковольтных вводов 0,1...10%
- емкость изоляции остова 100...3000 пФ
- частичные разряды в изоляции электрическим и акустическим методами с построением амплитудных спектров ч.р. и фазовых диаграмм по кажущемуся заряду в диапазоне 10^{-11} ... $3 \cdot 10^{-6}$ Кл и интенсивностью до 10^5 имп/с.

Помимо указанных характеристик дополнительно могут обеспечиваться измерения вспомогательных параметров, включающих уровень масла в расширительном баке, влажность трансформаторного масла, температуру масла (можно контролировать температуру верхних слоев масла, работу системы охлаждения – температура на входе и выходе охладителя), температуру воздуха, термограммы поверхности бака, давление масла во вводах и др.

Блок-схема комплекса диагностики представлена на рис. 1, а внешний вид одного из вариантов на рис. 2.

В состав комплекса входят:

- Блок встроенных датчиков (БВД), выполненный в виде герметичного блока, устанавливаемого на бак трансформатора или трубопроводы системы охлаждения, в состав которого входят:

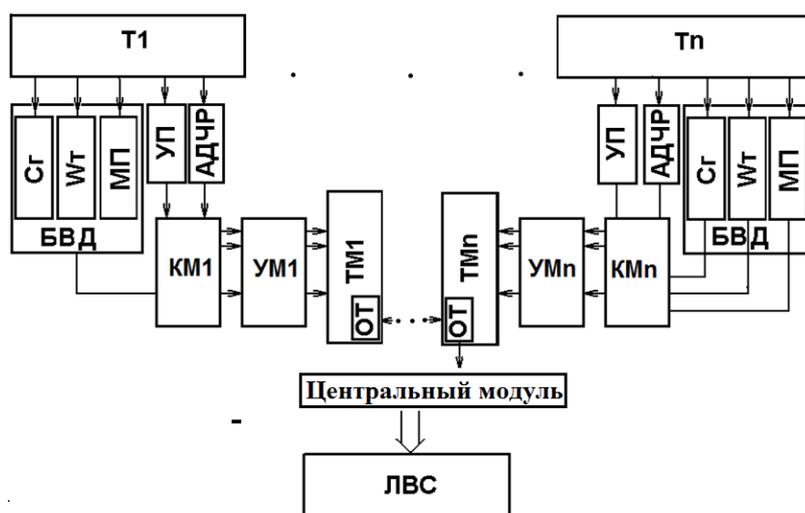


Рис. 1. Блок – схема диагностического комплекса "СКИТ"
 Fig. 1. Block diagram of the "SKIT" diagnostic complex

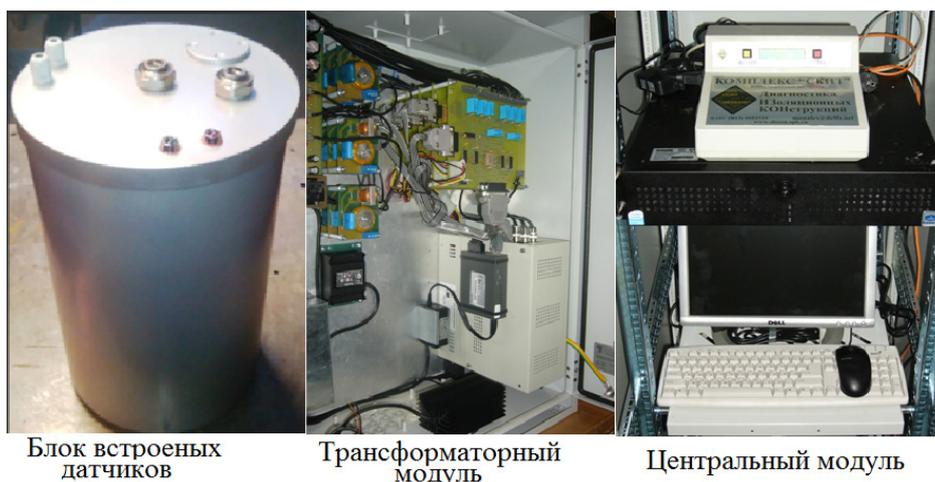


Рис. 2. Внешний вид варианта комплекса
 Fig. 2. Exterior of the complex variant

измерители концентрации растворенных в масле газов (условное обозначение Сг), влажности твердой изоляции (Wт) и концентрации механических примесей (Nмп).

- Комплект акустических датчиков со струбцинами крепления их на корпусе трансформатора.
- Трансформаторный модуль с размещенными в нем измерителями диэлектрических характеристик изоляции вводов (tgб), частичных разрядов (ИЧР) и контроллером, осуществляющим управление трансформаторным модулем и передачу информации в центральный модуль.
- Коммутационный модуль, переключающий измерительные каналы.
- Управляющий модуль коммутаций.
- Центральный модуль (ЦМ) на основе компьютера с платой сопряжения и соответствующим программным обеспечением.

В состав комплекса могут входить до 15 (по числу трансформаторов на объекте) трансформаторных модулей с первичными датчиками и измерителями, которые связаны оптоволоконными линиями с центральным модулем.

Блок встроенных датчиков представляет собой герметичную полость, устанавливаемую с помощью коаксиальных трубопроводов в дренажные отверстия коллекторов радиаторов или термосифонных фильтров. В масляной полости устанавливаются датчики концентрации газов, влажности твердой изоляции и концентрации механических примесей в масле. Электронные схемы измерителей устанавливаются в водонепроницаемой крышке блока. Измерение концентрации газов в масле основывается на принципе равновесного газосодержания в системе масло-газ, разделенной полупроницаемой маслостойкой мембраной. Датчик представляет собой газовую полость с установленным в ней полупроводниковыми чувствительными элементами, меняющим свое электрическое сопротивление в зависимости от концентрации газов окружающих его. Газовая полость представляет собой тонкостенный полимерный капилляр. Газы, проникая через стенку капилляра, создают внутри капилляра газовую смесь, равновесную с содержанием газа в масле. При измерении газ из капилляра продувается микрокомпрессором на полупроводниковые сенсоры.

Измерение влажности твердой изоляции основывается на принципе равенства относительной влажности компонентов системы. За счет миграции влаги при изменении температуры трансформатора из твердой изоляции в масло и обратно влажность целлюлозного материала, внесенного в трансформатор, уравнивается с влажностью основной изоляции. Влажность внесенного материала определяется по величине его диэлектрической проницаемости. Датчик влажности представляет собой конденсатор с картонной изоляцией, емкость которого зависит от влажности картона.

Измерение концентрации механических примесей производится световым методом. Прозрачная трубка, через которую при помощи плунжерного насоса с определенной скоростью прокачивается масло, освещается направленным источником света. Если примеси в масле отсутствуют, весь свет от источника попадает на фототранзистор, который обеспечивает протекание исходного тока. При попадании в поток частицы механической примеси часть света поглощается, а часть рассеивается. Световой поток на фототранзистор уменьшается, что приводит к снижению тока фототранзистора, причем величина снижения пропорциональна величине механической частицы. Измеряя количество и величину изменений тока при прокачке определенного объема масла, можно определить количество и величину механических частиц в этом объеме.

Акустические датчики состоят из пьезоэлектрического преобразователя и предварительного усилителя. Цилиндрический корпус датчика с помощью подпятника и струбцины устанавливается на стенке бака трансформатора, плотно прижимается к стенке бака и имеет с ней акустический контакт. Для обеспечения акустического контакта поверхность бака трансформатора в месте установки датчика зачищается от краски и шлифуется, а при установке датчика на его чувствительный элемент наносится несколько капель касторового масла. При частичных разрядах во внутренней изоляции трансформатора возникают акустические колебания, которые воздействуют на пьезоэлектрический преобразователь, преобразующий акустический сигнал в электрический. Электрический сигнал поступает на предварительный усилитель. Предварительное усиление позволяет соединить акустический датчик с измерителем ЧР кабелем длиной до 100 м без снижения чувствительности измерений. Питание акустического датчика осуществляется от стабилизированного источника +12В, расположенного в измерителе ЧР. Измерение характеристик ЧР может производиться в непрерывном режиме. Внешний вид датчика показан на рис. 3.

Трансформаторный модуль размещается во влагозащищенном термостабилизированном шкафу, состоит из промышленного компьютера, блока коммутации, а также блоков питания, сопряжения с центральным модулем и других вспомогательных элементов. В трансформаторный модуль по коаксиальным кабелям и витой паре поступают аналоговые сигналы от датчиков, которые преобразуются при помощи платы АЦП в цифровой вид и передаются по волоконно-оптической линии связи в центральный модуль.



Рис. 3. Внешний вид акустического датчика ЧР
 Fig. 3. Top view of the acoustic PD sensor

Центральный модуль предназначен для сбора, обработки, анализа и архивирования измерительной информации, передачи ее на сервер хранения, формирования и передачи аварийной информации оперативному персоналу. Основными элементами ЦМ является компьютер, который соединяется с трансформаторными модулями с помощью оптоволоконных кабелей. Компьютер оснащается устройством сопряжения и соответствующим программным обеспечением. Программное обеспечение обеспечивает автоматический сбор измерительной информации, предварительную обработку и архивирование ее, анализ получаемой информации и постановку диагноза состояния трансформаторов на основе измерительной информации комплекса. Одновременно измерительная информация может передаваться в сервер хранения по локальной вычислительной сети, а аварийная информация, сигнализирующая об аномальном состоянии трансформатора или сбоях в работе комплекса, передается оперативному персоналу по специальному каналу связи. Основной рабочей программой для пользователя является программа отчетов. Данная программа предназначена для просмотра результатов измерения комплекса и устанавливается как на основном компьютере комплекса, так и на любом компьютере в локальной сети, с которого требуется получить информацию о состоянии трансформаторов. Основное окно программы показано на рис. 4. Информация об измеряемых параметрах может представляться либо в виде таблиц с численными значениями параметров, либо в виде графиков изменения параметров во времени, либо в виде осциллограмм. Информация хранится в стандартной SQL базе и при помощи OPC сервера может быть передана в любую систему АСУ. Примеры представления информации показаны на рис. 5.

Графики и осциллограммы строятся на трехцветном зелено-желто-красном поле. Если измененные значения располагаются на зеленой части, считается, что дефекты отсутствуют. Выход значений в желтую зону означает появление аномалий, а переход в красную зону означает либо появление опасных аномалий, либо появление дефекта. При необходимости переход в желтую или красную зоны может сопровождаться выработкой аварийного сигнала, передаваемого по специальному каналу связи оперативному персоналу.

Целесообразность применения систем мониторинга должна определяться исходя из экономических показателей с учетом снижения затрат на эксплуатацию, ремонт, повышение надежности оборудования, продление его ресурса. К сожалению до настоящего времени экономистами не выработана корректная методика расчета экономической эффективности внедрения новой техники, а те методики, которые существуют, опираются на весьма приблизительные исходные

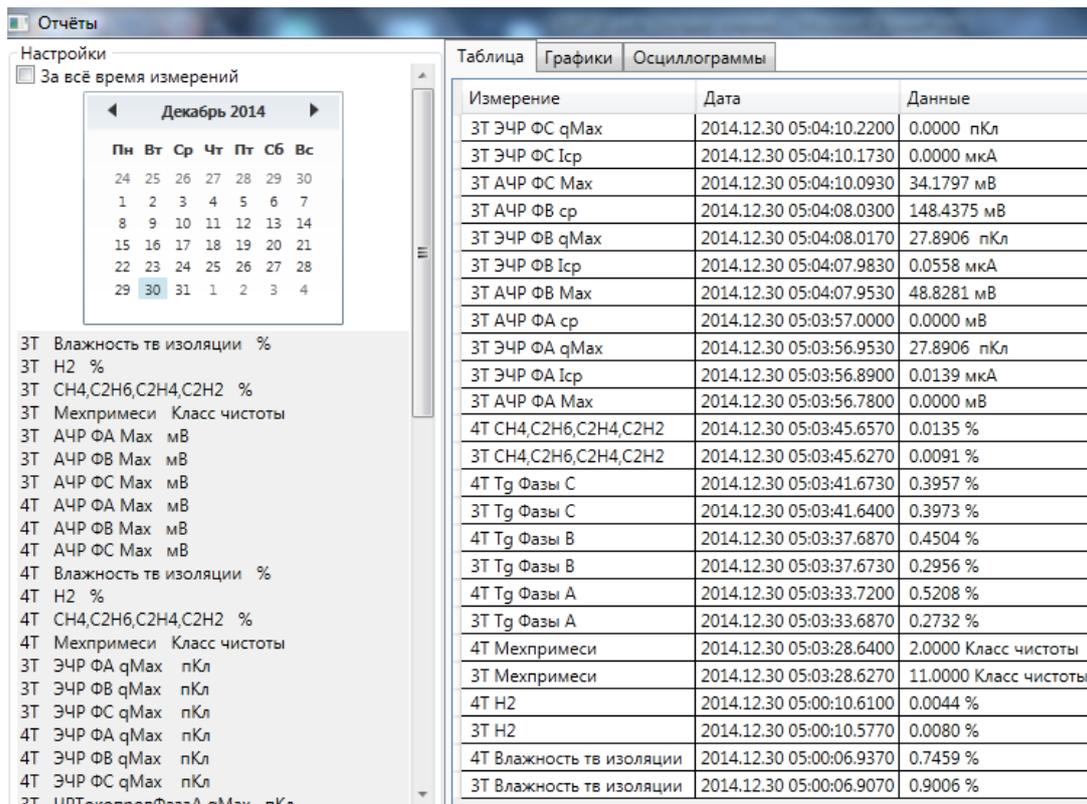


Рис. 4. Основное окно программы отчетов
 Fig. 4. The main window of the reports program

данные, что приводит к результату: "Что хочешь, то и получишь". Поэтому при определении экономической целесообразности приходится использовать принцип экспертных оценок.

Согласно этому принципу система оказывается экономически целесообразной, если ее стоимость, при безусловной надежности выявления дефекта, не превышает определенного процента от стоимости основного оборудования. Оценка величины этого процента определяется по опыту эксплуатации аналогичных систем для других видов оборудования. По данным японских экономистов эта величина составляет 15%, в США она принимается равной 9%. Исходя из сложностей внедрения мониторинговых систем в России, особенно на начальном этапе, нами была принята величина 2%. При таком подходе экономическая эффективность системы оказывается очевидной: если установить системы непрерывного контроля на 50-ти трансформаторах со значительным сроком службы, то по крайней мере один отказ будет предупрежден, т.е. система себя окупит. Исходя из такого подхода и понимая, что для трансформаторов 110 кВ малой мощности стоимость описанной системы велика, был предложен ряд упрощенных систем: СКИТ А1, СКИТ А2 и СКИТ С1.

Комплекс СКИТ А1 (автономный вариант с минимальной комплектацией) предназначен для трансформаторов, автотрансформаторов и реакторов мощностью до 40 МВт, напряжением до 110 кВ. Комплекс имеет датчик растворенных в масле газов (водорода, окиси углерода и суммы горючих газов), датчик влажности твердой изоляции, датчик температуры масла и представляет собой прибор, устанавливаемый на радиатор системы охлаждения или термосифонный фильтр. Данные, получаемые от датчиков, обрабатываются встроенным микроконтроллером и выводятся на внутренний дисплей. Также во встроенной памяти сохраняется краткая (1 мес.) предыстория с возможностью ее загрузки в память переносного компьютера, подключаемого через встроенный

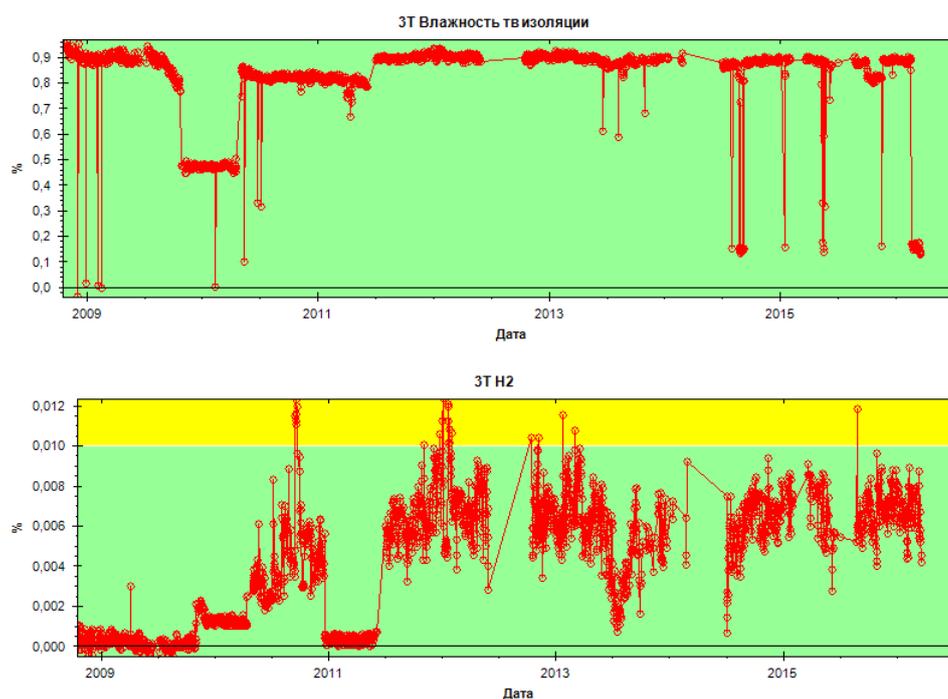


Рис. 5. Вид графиков

Fig. 5. View of graphs

USB-порт. Для удобства обслуживающего персонала, на переднюю панель устройства выводятся крупные светодиоды для сигнализации о текущем состоянии оборудования.

Комплекс СКИТ А2 (автономный вариант с максимальной комплектацией) предназначен для трансформаторов, автотрансформаторов и реакторов мощностью до 63 МВт, напряжением до 110 кВ. Комплекс имеет датчик растворенных в масле газов (водорода, окиси углерода и суммы горючих газов), датчик влажности твердой изоляции, датчик температуры масла, датчик tgδ изоляции вводов НК-методом и датчик механических примесей в масле. Остальные функции такие же как и в СКИТ А1.

Комплекс СКИТ С1 (сетевой вариант упрощенный без быстродействующего АЦП) предназначен для трансформаторов, автотрансформаторов и реакторов мощностью до 125 МВт, напряжением до 220 кВ. Комплекс имеет датчик растворенных в масле газов (водорода, окиси углерода и суммы горючих газов), датчик влажности твердой изоляции, датчик температуры масла, датчик tgδ изоляции вводов НК-методом, датчик механических примесей в масле, электрические датчики частичных разрядов (без снятия осциллограмм), акустические датчики частичных разрядов (без снятия осциллограмм). Комплекс представляет собой основной прибор, устанавливаемый на радиатор системы охлаждения или термосифонный фильтр, а также устройства присоединения к измерительным выводам высоковольтных вводов и акустические датчики частичных разрядов, устанавливаемые на бак трансформатора. Данные, получаемые от датчиков, обрабатываются встроенным микроконтроллером и выводятся на внутренний дисплей. Также во встроенной памяти сохраняется краткая (1 мес.) предыстория с возможностью ее загрузки в память переносного компьютера, подключаемого через встроенный USB-порт. Для удобства обслуживающего персонала, на переднюю панель устройства выводятся крупные светодиоды для сигнализации о текущем состоянии оборудования.

В этой версии СКИТ предусмотрена возможность подключения в локальную вычислительную сеть с помощью волоконно-оптической (или любой иной) линии связи для передачи отсня-



Рис. 6. Внешний вид комплекса упрощенных вариантов
Fig. 6. The appearance of a complex of simplified options

той с датчиков информации и аварийных сообщений на удаленный компьютер. Внешний вид упрощённых вариантов показан на рис. 6.

Выводы

Опыт эксплуатации комплексов СКИТ показал, что первичные датчики и преобразователи имеют достаточную надежность и проработали уже более 20 лет в условиях крайнего севера. Автоматизированные системы за последние 9 лет установлены на 40 объектах (92 трансформатора) и в настоящее время работают в полном объеме.

Опыт эксплуатации комплексов СКИТ выявил ряд недостатков в конструкции блока встроенных датчиков. Не надежной оказалась пленочная полимерная мембрана, которая была заменена на капиллярную. Фитинги медных трубопроводов с течением времени за счет разных температурных коэффициентов меди и латуни создают капельные течи масла. Этот недостаток был устранен отказом от медных трубопроводов и заменой подключения БВД к одному дренажному отверстию с коаксиальными трубопроводами и применением масляного насоса, прокачивающего масло через БВД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Monastyrskiy A.Ye.** Sistemy nepreryvnogo monitoringa izolyatsii silovykh transformatorov. V sb. Metody i sredstva otsenki sostoyaniya energeticheskogo oborudovaniya. Vyp. 27. Sovremennyye problemy proizvodstva, ekspluatatsii i remonta transformatornogo oborudovaniya. Izd. PEI PK, S.Peterburg, 2004.

[2] **Monastyrskiy A.Ye., Pulikov P.G., Rusov V.A., Tadzhibayev A.I.** Monitoring silovykh transformatorov. Izdatelstvo PEI PK, 2013 g.

[3] **Monastyrskiy A.Ye.** Sistema nepreryvnogo kontrolya sostoyaniya izolyatsii silovykh transformatorov vysshikh klassov napryazheniya "SKIT". V sb. Elektroenergetika 2008, SPb., PEIPK, 2008.

[4] **Vanin B.V., Lvov Yu.N., Lvov M.Yu., Neklepaev B.N., Antipov K.M., Surba A.S., Chichinsky M.I.** On damage to power transformers with a voltage of 110 – 500 kV in operation // Electric stations, 2001, No. 9. P. 53–58.

[5] RD 34.45-51.300-97 Scope and standards of electrical equipment testing. – 97 – 6th ed. M.: ENAS, 2001. 256 p.

[6] **Alekseev B.A.** Condition monitoring (diagnostics) of large power transformers. – M.: Publishing house NTs ENAS, 2002. 216 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МОНАСТЫРСКИЙ Александр Евгеньевич – *ведущий инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.*
E-mail: monalex2008@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 05.08.2021

REFERENCES

[1] **A.Ye. Monastyrskiy**, Sistemy nepreryvnogo monitoringa izolyatsii silovykh transformatorov. V sb. Metody i sredstva otsenki sostoyaniya energeticheskogo oborudovaniya. Vyp. 27. Sovremennyye problemy proizvodstva, ekspluatatsii i remonta transformatornogo oborudovaniya. Izd. PEI PK, S.Peterburg, 2004.

[2] **A.Ye. Monastyrskiy, P.G. Pulikov, V.A. Rusov, A.I. Tadzhibayev**, Monitoring silovykh transformatorov. Izdatelstvo PEI PK, 2013 g.

[3] **A.Ye. Monastyrskiy**, Sistema nepreryvnogo kontrolya sostoyaniya izolyatsii silovykh transformatorov vysshikh klassov napryazheniya "SKIT". V sb. Elektroenergetika 2008, SPb., PEIPK, 2008.

[4] **B.V. Vanin, Yu.N. Lvov, M.Yu. Lvov, B.N. Neklepaev, K.M. Antipov, A.S. Surba, M.I. Chichinsky**, On damage to power transformers with a voltage of 110 – 500 kV in operation // Electric stations, 2001, No. 9. P. 53–58.

[5] RD 34.45-51.300-97 Scope and standards of electrical equipment testing. – 97 – 6th ed. M.: ENAS, 2001. 256 p.

[6] **B.A. Alekseev**, Condition monitoring (diagnostics) of large power transformers. – M.: Publishing house NTs ENAS, 2002. 216 p.

THE AUTHOR

MONASTYRSKIY Aleksandr E. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: monalex2008@yandex.ru

Received: 05.08.2021

РАЗРАБОТКА СПОСОБА СИНТЕЗА ОДНОФАЗНЫХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ХИМИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ЭКВИАТОМНОГО ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО КАРБИДА (TiZrHfTaNb)C

В работе представлены результаты синтеза высокоэнтروпийных карбидов с использованием предварительно механически легированных порошков высокоэнтропийных сплавов (ВЭС). Применение ВЭС, в качестве исходного материала для синтеза высокоэнтропийных керамик, позволяет получать однофазные и однородные по химическому составу высокоэнтропийные карбиды, за счет предварительного перемешивания металлов на атомарном уровне, сопровождающегося образованием однофазного твердого раствора. Показано, что в процессе спекания механической смеси порошка ВЭС, предварительно полученного механическим легированием, с графитом, при температурах около 1600 °С образуется высокоэнтропийный карбид с химической формулой MeC и пространственной группой Fm-3m, однако согласно анализу фазового состава и микроструктуры, образуются включения в виде оксида циркония-гафния и переходного слоя между оксидными включениями и основной карбидной фазой. Увеличение температуры процесса до 2000 °С приводит к образованию однофазного и гомогенного по химическому составу высокоэнтропийного карбида (TiZrHfTaNb)C.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, керамика, карбиды, механическое легирование, искровое плазменное спекание.

Ссылка при цитировании:

Махмутов Т.Ю., Разумов Н.Г., Попович А.А. Разработка способа синтеза однофазных высокоэнтропийных керамических материалов с высокой степенью химической однородности на примере эквиатомного высокоэнтропийного карбида (TiZrHfTaNb)C // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 3. С. 109–119. DOI: 10.18721/JEST.27310

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

T.Y. Makhmutov, N.G. Razumov, A.A. Popovich

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

DEVELOPMENT OF SYNTHESIS METHOD FOR SINGLE-PHASE HIGH-ENTROPY CERAMIC MATERIALS WITH A HIGH DEGREE OF CHEMICAL HOMOGENEITY ON THE EXAMPLE OF EQUIATOMIC HIGH-ENTROPY CARBIDE (TiZrHfTaNb)C

The paper presents the synthesis results of high-entropy carbides using pre-mechanically alloyed powders of high-entropy alloys (HEA). The use of HEA as a starting material for synthesizing

high-entropy ceramics allows obtaining one-phase and chemically homogeneous high-entropy carbides due to preliminary mixing of metals at the atomic level, accompanied by the formation of a single-phase solid solution. We showed that in the process of sintering a mechanical mixture of pre-mechanically alloyed HEA powders with graphite at temperatures of about 1600°C, high-entropy carbide with the chemical formula MeC and space group Fm-3m is formed. However, according to the phase composition and microstructure analysis, inclusions are formed in the form of zirconium-hafnium oxide and a transition layer between oxide inclusions and the main carbide phase. Raising the temperature up to 2000°C produces a single-phase and chemically homogeneous high-entropy carbide (TiZrHfTaNb)C.

Keywords: high-entropy alloys, ceramics, carbides, mechanical alloying, spark plasma sintering.

Citation:

T.Y. Makhmutov, N.G. Razumov, A.A. Popovich, Development of synthesis method for single-phase high-entropy ceramic materials with a high degree of chemical homogeneity on the example of equiatomic high-entropy carbide (TiZrHfTaNb)C, Materials Science. Power Engineering, 27 (03) (2021) 109–119, DOI: 10.18721/JEST.27310

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Керамика на основе боридов и карбидов высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) – новейший класс материалов, представляющий интерес мирового научного сообщества. Многокомпонентная керамика, демонстрирует более высокую твердость, износостойкость и стойкость к окислению, чем карбиды и бориды чистых металлов [1, 2]. Развитие и широкий исследовательский интерес к высокоэнтропийной керамике среди ученых, первоначально пробудили «высокоэнтропийные сплавы», теория которых гласит, что энтропия смешения в многокомпонентных системах, стабилизирует твердые растворы, предотвращая образование интерметаллидных фаз [3]. Более поздние исследования ВЭС показали, что энтропия смешения не является единственным фактором, влияющим на образование твердого раствора. Были предложены методы оценки стабилизации твердых растворов, учитывающие влияние атомных радиусов [4], концентрации валентных электронов [5], общего влияния энтропии, энтальпии смешения и средней температуры плавления [6]. Однако, данные методы не могут быть применены для карбидов, нитридов и боридов ВЭС. Для описания искажения кристаллической структуры в высокоэнтропийных керамиках вместо атомных радиусов элементов предложено использовать значение параметра решетки соответствующих соединений, а энтальпию смешения определять с условием, что многокомпонентная система состоит из отдельных соединений [7–9].

Высокоэнтропийные карбиды в большинстве проведенных исследований, представлены металлами 4-й подгруппы (Ti, Zr, Hf) и 5-й подгруппы (V, Nb, Ta) периодической таблицы Менделеева, то есть металлами, образующими монокарбиды с кубической структурой типа NaCl, где металлы, скорее всего, имеют общую катионную подрешетку с гранецентрированной кубической (ГЦК), а углерод находится в анионной подрешетке [10].

На сегодняшний день синтезировано и исследовано большое количество систем карбидов на базе ВЭС. Синтез осуществляется, преимущественно, с использованием технологий порошковой металлургии. Существенное отличие наблюдается лишь в методах получения карбидов высокоэнтропийных сплавов и исходных материалов для синтеза. Подавляющее количество работ начинается с мокрого размола и перемешивания прекурсоров в мельницах.

При использовании в качестве исходного сырья оксидов металлов, проводится карботермическая реакция (в печи или выдержкой в процессе спекания) с последующим компактированием по технологии искрового плазменного спекания или горячего изостатического прессования при температурах 1600 – 2200 °С. С использованием данного способа получены карбиды: (Ti_{0.2}Zr_{0.2}Nb_{0.2}Ta_{0.2}W_{0.2})C [11] и (Ti_{0.2}Ta_{0.2}Nb_{0.2}Hf_{0.2}W_{0.2})C [12]. Фазовый состав порошков,

полученных таким образом, имеет примесь в виде оксидов, аморфного углерода и графита, что может свидетельствовать о незавершенности карботермического процесса, либо недостатке/избытке углерода.

Из карбидов металлов получены следующие материалы: $(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Nb}, \text{Hf}, \text{Ta})\text{C}$ [13], $(\text{HfTaZrNb})\text{C}$ [14], $(\text{Ta}_{0.25}\text{Zr}_{0.25}\text{Nb}_{0.25}\text{Ti}_{0.25})\text{C}$ [10], однако данные материалы характеризуются неоднородностью фазового и химического состава и имеют включения близкие по химическому составу к исходным карбидам.

Опубликованы работы, в которых в качестве исходных компонентов используются элементные порошки металлов и углерод, а способ получения аналогичен работам, указанным выше. Из элементных порошков металлов и углерода получены следующие материалы: $(\text{TiZrHfNbV})\text{C}_5$ [15], $\text{Hf}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ti}_{0.2}\text{C}$ и $\text{Hf}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Ti}_{0.2}\text{Mo}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{C}$ [16], TiVZrHfNbC_5 , TiVZrHfTaC_5 , TiZrNbHfTaC_5 , TiZrNbVTaC_5 , TiHfNbVTaC_5 , ZrHfNbVTaC_5 [17], $(\text{Ti}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{W}_{0.2})\text{C}$ [11], $(\text{VNbMoTaW})\text{C}$ [18]. Данный способ также имеет ряд недостатков, связанных со стадийностью образования карбидов разных металлов за счет чего образуются зоны с различным содержанием исходных элементов.

В нашей предыдущей работе оценивалось влияние поверхностного насыщения углеродом ВЭС CrNbMoWV на твердость, коррозионные и трибологические свойства. Было установлено, что в процессе спекания на поверхности образцов образуется однофазное покрытие толщиной около 100 мкм, которое положительно влияет на коррозионные свойства и износостойкость образцов, превосходя по данным свойствам классические материалы. Например, разница степени износа карбидного слоя высокоэнтропийного сплава (0.001 см^3) и WC-8Ni (0.003 см^3) составляет 300% [19].

Исходя из вышеизложенного, целью данной работы является разработка способа получения однофазных высокоэнтропийных керамических материалов с высокой степенью химической однородности с использованием предварительно механически легированных (МЛ) порошков ВЭС.

Материалы и методика исследований

В качестве исходных компонентов для синтеза ВЭС системы TiZrHfNbTa использовали элементные порошки металлов Ti , Nb , Hf , Zr и Ta (чистота 99.5 %), которые смешивали в эквивалентном соотношении. Для синтеза высокоэнтропийного карбида в качестве источника углерода использовали порошок графита марки МПГ-7. МЛ проводили в планетарной мельнице Fritsch Pulverisette 4 в атмосфере аргона; продолжительность МЛ 5 – 10 часов; скорость вращения планетарного диска/стаканов: 200/-400 об/мин; материал стаканов – высокопрочная углеродистая сталь; объем стаканов – 500 мл; материал размольных шаров – высокопрочная углеродистая сталь; диаметр шаров – 12 мм; масса навески – 50 грамм; соотношение массы загружаемого материала к массе шаров – 1:20.

Анализ гранулометрического состава порошков проводили на установке лазерной дифракции Fritsch Analysette 22 NanoTec plus. Для расчета распределения размеров частиц была использована модель Фраунгофера.

Спекание проводили на установке искрового-плазменного спекания HPD 25 FCT Systeme GmbH в графитовой пресс-форме $\text{Ø}20$ мм, при температурах 1600, 1800 и 2000 °С, давление 50 МПа, время выдержки при максимальной температуре – 5 мин.

Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре Bruker Advance D8 ($\text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$) в диапазоне углов от 30 до 95° с шагом 0.020 и выдержкой 2 с на каждом шаге. Параметры элементарных ячеек рассчитывались методом Ритвелда с использованием программного обеспечения TOPAS5. Морфологию частиц и микроструктуру полученных порошков исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа Mira 3 Tescan. Химический состав частиц порошка определяли на шлифах методом рентгеновского микроанализа с помощью приставки Oxford INCA Wave 500 к сканирующему электронному микроскопу.

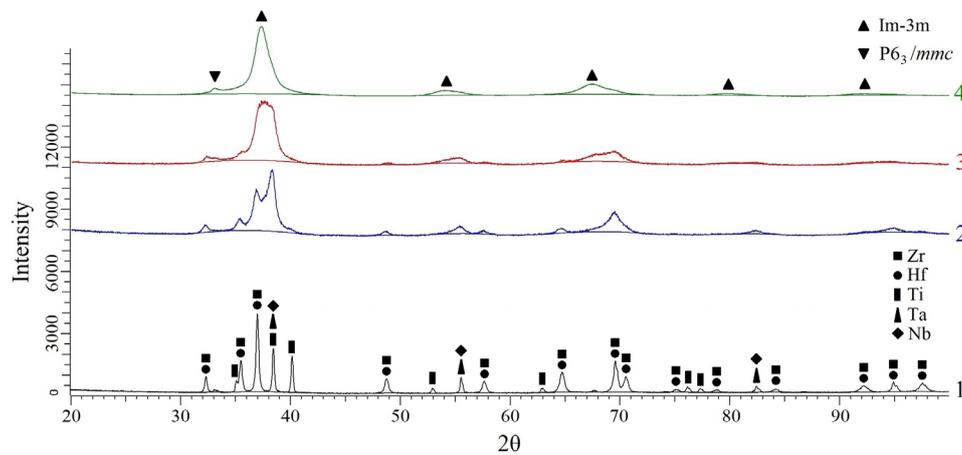


Рис. 2. Фазовый состав порошка ВЭС TiZrHfTaNb на разных стадиях механического легирования:
1 – 0 ч., 2 – 5 ч., 3 – 7.5 ч., 4 – 10 ч

Fig. 2. Phase composition of the TiZrHfTaNb HEA powder at different stages of mechanical alloying:
1 – 0 h, 2 – 5 h, 3 – 7.5 h, 4 – 10 h

элементов ($Ti = 1.45 \text{ \AA}$, $Nb = 1.43 \text{ \AA}$, $Ta = 1.43 \text{ \AA}$). После 10 часов механического легирования еще наблюдаются небольшие пики Zr и Hf, что вызвано их большим размером атомов. Массовая доля гексагональной фазы ($P6_3/mmc$) составила 17%, а параметр кристаллической решетки кубической структуры ($Im-3m$) равен 3.387 \AA . Отклонение от параметра решетки кубической структуры, рассчитанное по закону Вегарда ($a = 3,416 \text{ \AA}$) для эквиатомного ВЭС TiZrHfTaNb, связано с неполным растворением элементов Hf и Zr.

По результатам анализа микроструктуры, фазового состава, распределения элементов и гранулометрического состава образцов полученных МЛ в планетарной мельнице, для синтеза высокоэнтропийных карбидов был выбран режим МЛ 7.5 часов со скоростью вращения главного диска 200 об/мин и скоростью вращения стаканов –400 об/мин.

Синтез высокоэнтропийных карбидов производился с использованием предварительно механически легированных порошков на установке для искрового плазменного спекания FCT HPD 25. Во время спекания фиксировались следующие параметры процесса: время, температура, перемещение бойков, скорость усадки, ток, напряжение, мощность, усилие прессования. На основе полученных данных выявлены физико-химические особенности процесса синтеза каждого материала.

На рис. 3 представлены фотографии образцов $(TiZrHfTaNb)C$ диаметром 20 мм, спеченных при температуре $2000 \text{ }^\circ C$, после пескоструйной обработки и после шлифовки.

Экспериментальные данные, полученные при синтезе высокоэнтропийного карбида $(TiZrHfTaNb)C$ (рис. 4) свидетельствуют о протекании четырех основных стадий синтеза: 1 – стадия дегазации и вакуумирования, 2 – стадия предварительного нагрева, 3 – стадия химического взаимодействия металл – углерод и образования карбида, 4 – уплотнение под воздействием давления 50 МПа с гомогенизацией при выдержке 5 минут. Полученные данные согласуются с режимами (в части температур), используемыми при твердофазном синтезе карбидов металлов: TiC, ZrC, HfC, NbC, TaC [20], а также данными полученными при искровом плазменном спекании сплава $(TiZrNbTaW)C$ с использованием различных прекурсоров [11].

Микроструктура и фазовый состав образцов спеченных при температурах 1600 и 1800 °C характеризовались образованием высокоэнтропийного карбида с химической формулой MeC , где Me – ВЭС на основе Ti, Zr, Hf, Ta и Nb, с пространственной группой $Fm-3m$, а также образованием оксида циркония-гафния и переходной зоной от высокоэнтропийного карбида к оксидным

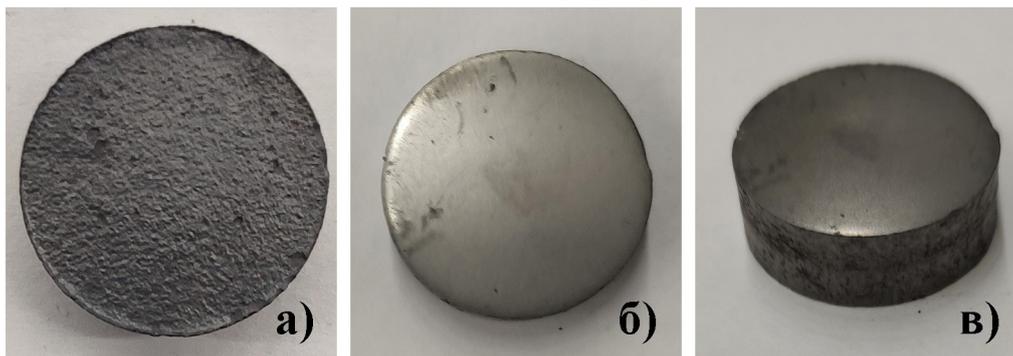


Рис. 3. Фотографии образцов $(\text{TiZrHfTaNb})\text{C}$ диаметром 20 мм, спеченных при температуре 2000 °С: а) после пескоструйной обработки, б–в) после шлифовки
 Fig. 3. Photos of $(\text{TiZrHfTaNb})\text{C}$ samples with a diameter of 20 mm, sintered at 2000 °C temperature: a) after sandblasting, б–с) after grinding

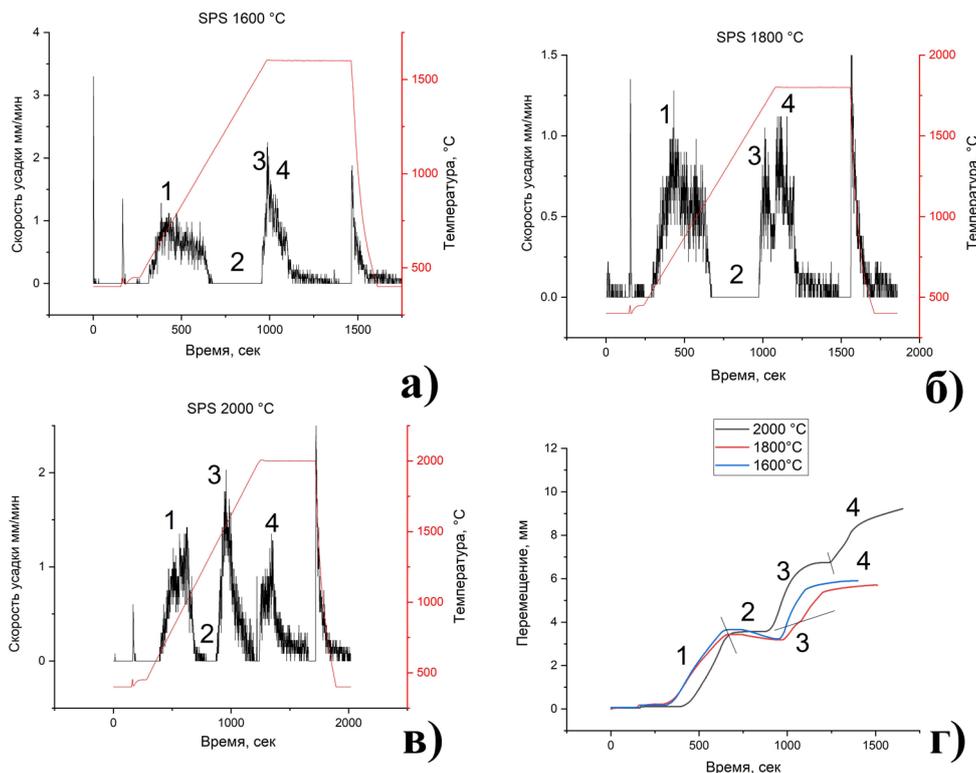


Рис. 4. Экспериментальные кривые, полученные при синтезе $(\text{TiZrHfTaNb})\text{C}$; скорость усадки и температура по времени: спекание при 1600 °С (а), при 1800 °С (б), при 2000 °С (в); перемещение по времени (г)
 Fig. 4. Experimental curves obtained during the $(\text{TiZrHfTaNb})\text{C}$ samples synthesis; shrinkage rate and temperature over time: sintering at 1600 °C (a), at 1800 °C (b), at 2000 °C (c); displacement (g)

включениям. Увеличение температуры спекания высокоэнтропийного карбида $(\text{TiZrHfTaNb})\text{C}$ до 2000 °С, привело к увеличению кристалличности синтезируемого материала (рис. 6). Микроструктура и распределение элементов образца спеченного при 2000 °С (рис. 5), свидетельствует об образовании однородного и однофазного высокоэнтропийного карбида. Оксид циркония-гафния и высокоэнтропийный карбид имеют четкую границу, без переходного участка, обедненного

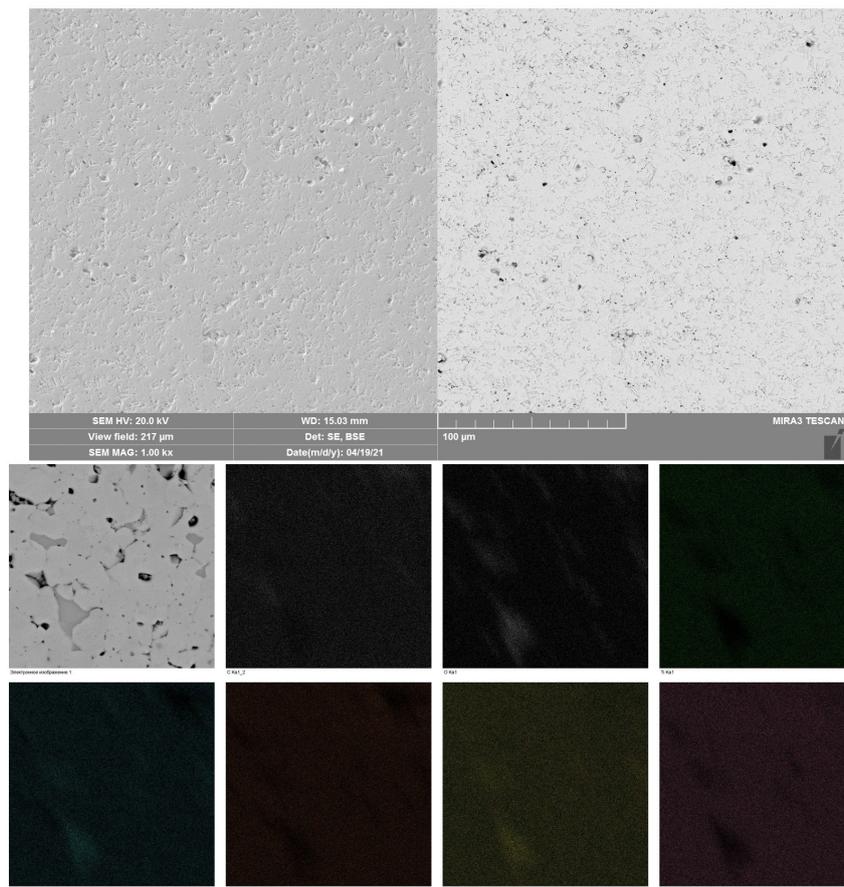


Рис. 5. Микроструктура и распределение элементов образца $(\text{TiZrHfTaNb})\text{C}$, спеченного при температуре $2000\text{ }^\circ\text{C}$
 Fig. 5. Microstructure and distribution of elements of the $(\text{TiZrHfTaNb})\text{C}$ sample, sintered at a temperature of $2000\text{ }^\circ\text{C}$

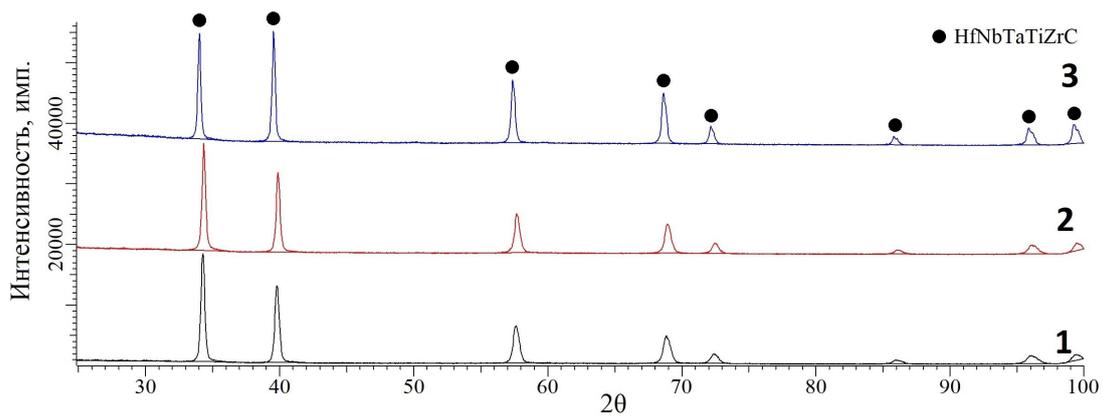


Рис. 6. Фазовые диаграммы высокоэнтропийных карбидов $(\text{TiZrHfTaNb})\text{C}$, спеченных при температурах: 1 – $1600\text{ }^\circ\text{C}$, 2 – $1800\text{ }^\circ\text{C}$, 3 – $2000\text{ }^\circ\text{C}$
 Fig. 6. Phase diagrams of $(\text{TiZrHfTaNb})\text{C}$ high-entropy carbides, sintered at temperatures: 1 – $1600\text{ }^\circ\text{C}$, 2 – $1800\text{ }^\circ\text{C}$, 3 – $2000\text{ }^\circ\text{C}$

цирконием и гафнием. Отсутствие переходной зоны и малое количество оксидных включений по сравнению с образцами, спеченными при более низких температурах, может свидетельствовать

о завершении окислительно-восстановительных реакций и процесса образования высокоэнтропийного карбида.

Сопоставление результатов анализа фазового состава, микроструктуры и химической однородности образцов с термомеханическими данными (рис. 4), полученными в процессе синтеза высокоэнтропийных карбидов, приводят к выводу, что стадия химического взаимодействия и окислительно-восстановительных реакций (рис. 4, стадия 3) завершается или близка к завершению при достижении температуры 2000 °С. На стадии 4 происходит уплотнение и гомогенизация материала по фазовому и химическому составу. Считается, что образование карбидов металлов протекает главным образом за счет диффузионных процессов в подрешетках металлов и углерода, при этом диффузия металлов и углерода происходит не независимо друг от друга [21, 22]. Скорость диффузии металлов на несколько порядков ниже, чем углерода [23], соответственно, диффузия металлов является значимым фактором влияющим на образование высокоэнтропийных карбидов и сдерживающим образование вторичных фаз. Сравнение результатов данной работы и результатов синтеза сплава (TiZrNbTaW)C с использованием смеси чистых компонентов и смеси чистых карбидов [11], подтвердило, что при использовании в качестве исходного материала ВЭС, кинетика образования высокоэнтропийного карбида имеет закономерный линейный характер, а продуктом синтеза является однофазный высокоэнтропийный карбид (TiZrHfTaNb)C с высокой степенью химической однородности.

Анализ фазового состава спеченных при различных температурах (рис. 6), показал, что высокоэнтропийный карбид образуется уже при 1600 °С, однако при большом увеличении дифрактограмм, присутствуют пики смешанного оксида циркония-гафния с формулой (ZrHf)O₂. С увеличением температуры, интенсивность оксидных пиков уменьшается, что согласуется с результатами исследования микроструктуры и распределения элементов.

Заключение

Разработан способ получения однофазных высокоэнтропийных керамических материалов с высокой степенью химической однородности на примере эквиатомного высокоэнтропийного карбида (TiZrHfTaNb)C. В работе впервые был проведен синтез высокоэнтропийных карбидов с использованием предварительно механически легированных порошков ВЭС.

Применение ВЭС в качестве исходного материала позволяет получать однофазные и однородные по химическому составу высокоэнтропийные карбиды, за счет предварительного перемешивания металлов на атомарном уровне, сопровождающегося образованием однофазного твердого раствора. Результаты исследований процесса механического легирования ВЭС TiZrHfTaNb показали, что однородный химический состав и микроструктура частиц с наименьшим содержанием железа (0.12 %) достигается при режимах механического легирования с вращением планетарного диска/стаканов 200/-400 об/мин и времени процесса 7.5 часов. В процессе спекания при температурах около 1600 °С образуется высокоэнтропийный карбид с химической формулой MeC и пространственной группой Fm-3m, однако согласно анализу фазового состава и микроструктуры, образуются включения в виде оксида циркония-гафния и переходного слоя между оксидными включениями и основной карбидной фазой. Увеличение температуры процесса до 2000 °С приводит к образованию однофазного и гомогенного по химическому составу высокоэнтропийного карбида (TiZrHfTaNb)C. Разработанный способ синтеза высокоэнтропийных керамик имеет ряд преимуществ перед существующими способами: позволяет получать однофазные и гомогенные по химическому составу материалы, минимальное содержание примесных фаз, контролируемый процесс синтеза, повторяемость результатов, возможность масштабирования.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований 0784-2020-0022

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Kan W.H. et al.** Precipitation of (Ti, Zr, Nb, Ta, Hf)C high entropy carbides in a steel matrix // *Materialia*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 9, № November 2019.
- [2] **Braic V. et al.** Nanostructured multi-element (TiZrNbHfTa)N and (TiZrNbHfTa)C hard coatings // *Surf. Coatings Technol.* Elsevier B.V., 2012. Vol. 211. P. 117–121.
- [3] **Murty B.S., Yeh J.W., S. Ranganathan P.P.B.** High-Entropy Alloys. Elsevier, 2019.
- [4] **Zhang Y. et al.** Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-component Alloys // *Adv. Eng. Mater.* 2008. Vol. 10, № 6. P. 534–538.
- [5] **Guo S. et al.** Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys // *J. Appl. Phys.* 2011. Vol. 109, № 10. P. 103505.
- [6] **Zhang Y., Yang X., Liaw P.K.** Alloy Design and Properties Optimization of High-Entropy Alloys // *JOM*. 2012. Vol. 64, № 7. P. 830–838.
- [7] **Wang K. et al.** Microstructure and mechanical properties of (TiZrNbTaMo)C high-entropy ceramic // *J. Mater. Sci. Technol.* The editorial office of Journal of Materials Science & Technology, 2020. Vol. 39. P. 99–105.
- [8] **Yang Y. et al.** Structural, mechanical and electronic properties of (TaNbHfTiZr)C high entropy carbide under pressure: Ab initio investigation // *Phys. B Condens. Matter.* Elsevier B.V., 2018. Vol. 550, № August. P. 163–170.
- [9] **Zhang H. et al.** A high-entropy B₄(HfMo₂TaTi)C and SiC ceramic composite // *Dalt. Trans.* 2019. Vol. 48, № 16. P. 5161–5167.
- [10] **Wang F. et al.** Irradiation damage in (Zr_{0.25}Ta_{0.25}Nb_{0.25}Ti_{0.25})C high-entropy carbide ceramics // *Acta Mater.* Elsevier Ltd, 2020. Vol. 195. P. 739–749.
- [11] **Wei X.F. et al.** High entropy carbide ceramics from different starting materials // *J. Eur. Ceram. Soc.* Elsevier, 2019. Vol. 39, № 10. P. 2989–2994.
- [12] **Wei X.F. et al.** Gradient microstructure development and grain growth inhibition in high-entropy carbide ceramics prepared by reactive spark plasma sintering // *J. Eur. Ceram. Soc.* Elsevier, 2020. Vol. 40, № 4. P. 935–941.
- [13] **Zhou J. et al.** High-entropy carbide: A novel class of multicomponent ceramics // *Ceram. Int.* Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 2018. Vol. 44, № 17. P. 22014–22018.
- [14] **Csanádi T. et al.** Small scale fracture and strength of high-entropy carbide grains during microcantilever bending experiments // *J. Eur. Ceram. Soc.* Elsevier, 2020. Vol. 40, № 14. P. 4774–4782.
- [15] **Chicardi E., García-Garrido C., Gotor F.J.** Low temperature synthesis of an equiatomic (TiZrHfVNb)C₅ high entropy carbide by a mechanically-induced carbon diffusion route // *Ceram. Int.* Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 2019. Vol. 45, № 17. P. 21858–21863.
- [16] **Moskovskikh D.O. et al.** High-entropy (HfTaTiNbZr)C and (HfTaTiNbMo)C carbides fabricated through reactive high-energy ball milling and spark plasma sintering // *Ceram. Int.* Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 2020. Vol. 46, № 11. P. 19008–19014.
- [17] **Chicardi E. et al.** Synthesis of all equiatomic five-transition metals High Entropy Carbides of the IVB (Ti, Zr, Hf) and VB (V, Nb, Ta) groups by a low temperature route // *Ceram. Int.* Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 2020. Vol. 46, № 13. P. 21421–21430.
- [18] **Liu D. et al.** Phase evolution and properties of (VNbTaMoW)C high entropy carbide prepared by reaction synthesis // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2020. Vol. 40, № 8. P. 2746–2751.
- [19] **Razumov N. et al.** Refractory crmonbvw high-entropy alloy manufactured by mechanical alloying and spark plasma sintering: Evolution of microstructure and properties // *Materials (Basel)*. 2021. Vol. 14, № 3. P. 1–14.
- [20] **Ремпель А.А., Гусев А.И.** Получение и оценка гомогенности сильно нестехиометрических неупорядоченных и упорядоченных карбидов. 2000. P. 1243–1249.
- [21] **Yut B.B.** Nb G. of 14C in Single Crystals. 1979. Vol. 40. P. 997–1006.

[22] **Zhang H., Akhtar F.** Processing and characterization of refractory quaternary and quinary high-entropy carbide composite // Entropy. 2019. Vol. 21, № 5.

[23] **Demaske B.J., Chernatynskiy A., Phillpot S.R.** First-principles investigation of intrinsic defects and self-diffusion in ordered phases of V₂C // J. Phys. Condens. Matter. IOP Publishing, 2017. Vol. 29, № 24.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАХМУТОВ Тагир Юлаевич – научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: mahmutovtagir@mail.ru

РАЗУМОВ Николай Геннадьевич – доцент, НОЦ КиФМ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: n.razumov@onti.spbstu.ru

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – директор ИММТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: director@immet.spbstu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 29.08.2021

REFERENCES

[1] **W.H. Kan, et al.**, Precipitation of (Ti, Zr, Nb, Ta, Hf)C high entropy carbides in a steel matrix // Materialia. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 9, № November 2019.

[2] **V. Braic, et al.**, Nanostructured multi-element (TiZrNbHfTa)N and (TiZrNbHfTa)C hard coatings // Surf. Coatings Technol. Elsevier B.V., 2012. Vol. 211. P. 117–121.

[3] **B.S. Murty, J.W. Yeh, S. Ranganathan P.P.B.**, High-Entropy Alloys. Elsevier, 2019.

[4] **Y. Zhang, et al.**, Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-component Alloys // Adv. Eng. Mater. 2008. Vol. 10, № 6. P. 534–538.

[5] **S. Guo, et al.**, Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 109, № 10. P. 103505.

[6] **Y. Zhang, X. Yang, P.K. Liaw**, Alloy Design and Properties Optimization of High-Entropy Alloys // JOM. 2012. Vol. 64, № 7. P. 830–838.

[7] **K. Wang, et al.**, Microstructure and mechanical properties of (TiZrNbTaMo)C high-entropy ceramic // J. Mater. Sci. Technol. The editorial office of Journal of Materials Science & Technology, 2020. Vol. 39. P. 99–105.

[8] **Y. Yang, et al.**, Structural, mechanical and electronic properties of (TaNbHfTiZr)C high entropy carbide under pressure: Ab initio investigation // Phys. B Condens. Matter. Elsevier B.V., 2018. Vol. 550, № August. P. 163–170.

[9] **H. Zhang, et al.**, A high-entropy B₄(HfMo₂TaTi)C and SiC ceramic composite // Dalt. Trans. 2019. Vol. 48, № 16. P. 5161–5167.

[10] **F. Wang, et al.**, Irradiation damage in (Zr_{0.25}Ta_{0.25}Nb_{0.25}Ti_{0.25})C high-entropy carbide ceramics // Acta Mater. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 195. P. 739–749.

[11] **X.F. Wei, et al.**, High entropy carbide ceramics from different starting materials // J. Eur. Ceram. Soc. Elsevier, 2019. Vol. 39, № 10. P. 2989–2994.

- [12] X.F. Wei, et al., Gradient microstructure development and grain growth inhibition in high-entropy carbide ceramics prepared by reactive spark plasma sintering // J. Eur. Ceram. Soc. Elsevier, 2020. Vol. 40, № 4. P. 935–941.
- [13] J. Zhou, et al., High-entropy carbide: A novel class of multicomponent ceramics // Ceram. Int. Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 2018. Vol. 44, № 17. P. 22014–22018.
- [14] T. Csanádi, et al., Small scale fracture and strength of high-entropy carbide grains during microcantilever bending experiments // J. Eur. Ceram. Soc. Elsevier, 2020. Vol. 40, № 14. P. 4774–4782.
- [15] E. Chicardi, C. García-Garrido, F.J. Gotor, Low temperature synthesis of an equiatomic (TiZrHfVNb)₅ high entropy carbide by a mechanically-induced carbon diffusion route // Ceram. Int. Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 2019. Vol. 45, № 17. P. 21858–21863.
- [16] D.O. Moskovskikh, et al., High-entropy (HfTaTiNbZr)C and (HfTaTiNbMo)C carbides fabricated through reactive high-energy ball milling and spark plasma sintering // Ceram. Int. Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 2020. Vol. 46, № 11. P. 19008–19014.
- [17] E. Chicardi, et al., Synthesis of all equiatomic five-transition metals High Entropy Carbides of the IVB (Ti, Zr, Hf) and VB (V, Nb, Ta) groups by a low temperature route // Ceram. Int. Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 2020. Vol. 46, № 13. P. 21421–21430.
- [18] D. Liu, et al., Phase evolution and properties of (VNbTaMoW)C high entropy carbide prepared by reaction synthesis // J. Eur. Ceram. Soc. 2020. Vol. 40, № 8. P. 2746–2751.
- [19] N. Razumov, et al., Refractory crmonbvw high-entropy alloy manufactured by mechanical alloying and spark plasma sintering: Evolution of microstructure and properties // Materials (Basel). 2021. Vol. 14, № 3. P. 1–14.
- [20] A.A. Rempel, A.I. Gusev, Polucheniye i otsenka gomogennosti silno nestekhiometriceskikh neuporyadochennykh i uporyadochennykh karbidov. 2000. P. 1243–1249.
- [21] B.B. Yut, Nb G. of 14C in Single Crystals. 1979. Vol. 40. P. 997–1006.
- [22] H. Zhang, F. Akhtar, Processing and characterization of refractory quaternary and quinary high-entropy carbide composite // Entropy. 2019. Vol. 21, № 5.
- [23] B.J. Demaske, A. Chernatynskiy, S.R. Phillpot, First-principles investigation of intrinsic defects and self-diffusion in ordered phases of V₂C // J. Phys. Condens. Matter. IOP Publishing, 2017. Vol. 29, № 24.

THE AUTHORS

MAKHMUTOV Tagir Y. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: mahmutovtagir@mail.ru

RAZUMOV Nikolay G. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: n.razumov@onti.spbstu.ru

POPOVICH Anatoliy A. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: director@immet.spbstu.ru

Received: 29.08.2021

DOI: 10.18721/JEST.27311
УДК 551.583

*В.В. Рогожкин², В.И. Горынин¹, С.Ю. Кондратьев³,
Е.Б. Мишин⁴, Е.В. Коленов⁵, А.В. Шеволдин⁶*

¹ Центральный научно-исследовательский институт
конструкционных материалов «Прометей», Санкт-Петербург, Россия;

² АО "Атомпроект", Санкт-Петербург, Россия;

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

⁴ Московский проектный институт АО «Атомэнергопроект», Москва, Россия;

⁵ ПАО «Силовые машины», Москва, Россия;

⁶ Санкт-Петербургский филиал Московского проектного института
АО «Атомэнергопроект», Санкт-Петербург, Россия

КУЛЕР ПРОТИВ ПЕРЕГРЕВА ЕВРОПЫ

Предложены принцип и аэротермическая система «Land Coolers» (кулер) для коррекции аномального потепления (климата) регионов Европы путем организации над проблемными территориями высотной техногенной облачности, используя для этого атмосферную влагу акватории ближних морей, избыточный тепловой энергосброс тепловых и атомных электростанций и господствующий поток высотно-тропосферных ветров. Зонтичная облачность перистого типа, генерируемая аэротермическим кулером в тропосферу, ослабит солнечную нагрузку и перегрев проблемных территорий Европы. Для формирования высотной облачности свыше 6 км используется вертикальная паровоздушная струя от модифицированного инжектором прибрежного объекта энергетики, образующего оптически плотную облачность верхнего и среднего яруса тропосферы площадью до 100 тыс. кв. км, защищающая приземный воздух от перегрева и обеспечивающая доступность территорий Европы атлантическим дождям.

Ключевые слова: аэротермическая система «Land Coolers» (кулер); региональная коррекция аномального потепления (климата); высотная техногенная облачность перистого типа; тропосфера; тепловой энергосброс; теплосбрасывающие электростанции; атмосферная влага акватории морей.

Ссылка при цитировании:

В.В. Рогожкин, Горынин В.И., С.Ю. Кондратьев, Е.Б. Мишин, Е.В. Коленов, А.В. Шеволдин, Кулер против перегрева Европы // *Материаловедение. Энергетика.* 2021. Т. 27, № 3. С. 120–133. DOI: 10.18721/JEST.27311

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*V.V. Rogozhkin², V.I. Gorynin¹, S.Yu. Kondratyev³,
E.B. Mishin⁴, E.V. Kolenov⁵, A.V. Shevoldin⁶*

¹ Central Research Institute of Structural Materials "Prometey",
St. Petersburg, Russia;

² JSC "Atomproekt", St. Petersburg, Russia;

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia;

⁴ JSC "Atomenergoproekt", Moscow, Russia;

⁵ PJSC "Power machines", Moscow, Russia;

⁶ JSC "Atomenergoproekt", St. Petersburg, Russia

COOLER AGAINST OVERHEATING OF EUROPE

The paper proposes a principle and presents a Land Coolers aerothermal system (cooler) for the correction of abnormal warming (of the climate) of the European regions. The cooler generates high-altitude technogenic clouds over problem areas using atmospheric moisture in the waters of the near seas, excessive thermal energy consumption of thermal and nuclear power plants, and the prevailing flow of high-altitude tropospheric winds. The cirrus-type umbrella cloud generated by the aerothermal cooler into the troposphere weakens the solar load and overheating of the problem areas of Europe. For high-altitude clouds over 6 km, the system employs a vertical steam-air jet from a coastal energy facility modified by an injector. It forms optically dense clouds of the upper and middle tier of the troposphere with an area of up to 100 thousand square kilometers, protecting the surface air from overheating and ensuring the territories of Europe are covered by Atlantic rains.

Keywords: Land Coolers aerothermal system (cooler); regional correction of abnormal warming (climate); high-altitude technogenic cloud cover of the cirrus type; troposphere; thermal energy saving; heat-saving power plants; atmospheric moisture of the sea area.

Citation:

V.V. Rogozhkin, V.I. Gorynin, S.Yu. Kondatyev, E.B. Mishin, E.V. Kolenov, A.V. Shevoldin, Cooler against overheating of Europe, Materials Science. Power Engineering, 27 (03) (2021) 120–133, DOI: 10.18721/JEST.27311

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Средняя глобальная температура атмосферы Земли за 100 лет к 2008 году повысилась на $\sim 0,8$ °C [1]. Несмотря на малую величину ее прироста, негативные последствия могут быть значительными и предполагаются склонными к росту в дальнейшем. В частности, это ведет к разбросу температур, когда зимой будет холоднее, а летом аномально жарко. В последнее время рост жары летом, засухи, зон пустынь, числа более интенсивных, обширных и загрязняющих воздух лесных пожаров, наводнений и т.д. стали реальной проблемой для населения Европы.

В качестве средств противодействия этим природным негативным явлениям целесообразно использование сопутствующих возможностей эксплуатируемых теплосбрасывающих электростанций (ТЭС). Например, избыточный тепловой (паровой, водяной, воздушный) энерги-



Рис. 1. Формирование в атмосфере (тропосфере) высотной светонепроницаемой облачности при генерации теплой воздушной струи из градирен атомной электрической станции (АЭС) при отсутствии приземного ветра

Fig. 1. Formation of high-altitude light-tight clouds in the atmosphere (troposphere) when generating a warm air jet from the cooling towers of a nuclear power plant (NPP) in the absence of surface wind



Рис. 2. Вертикальная теплая воздушная струя из градирни АЭС, действующая по схеме аэротермического кулера при отсутствии приземного ветра
 Fig. 2. A vertical warm air jet from a nuclear power plant cooling tower, operating according to the scheme of an aerothermal cooler in the absence of surface wind

ческий сброс мощностью более 1000 МВт при наличии высотной башенной градирни позволяет производить высотную светонепроницаемую облачность – визуальное однородное средство покрытия атмосферы для региональной коррекции аномального перегрева Европы [2] (рис. 1–2).

Общеизвестно, что мощность бесполезного для человечества теплового энергосброса топливной энергетики типа ТЭС в окружающую природную среду в 2-3 раза превышает вырабатываемую полезную электрическую мощность. Применение теплового энергосброса объектов энергетики для производства техногенной высотной оптически плотной облачности и коррекции перегрева сделает его полезным. А традиционная топливная энергетика станет более зеленой с пересмотром радикальных требований отказа от нее.

Принцип региональной коррекции климата для Европы

Территория Европы (10 млн. км²) окружена 10 морями с трех сторон, в том числе с запада. При среднегодовой влажности воздуха Земли ~11 г/м³ влажность морского воздуха в жаркое время года достигает $\eta_w \sim 25$ г/м³. Природный процесс, определяющий температуру воздушной среды тропосферы, очевидно, зависит от уровня солнечной радиации, достигающей поверхности земли. Облака, включая верхний ярус тропосферы, могут являться эффективным регулятором прямой и рассеянной суммарной солнечной радиации. Часть суммарной радиации поглощается земной поверхностью, ее тепло передается приземному воздуху. Другая часть суммарной радиации отражается от поверхности Земли. Управление температурой воздуха при аномальном потеплении актуально для Европы именно в летнее время (с мая по сентябрь).

Принцип региональной коррекции климата «COOLER» (далее С-коррекция) заключается в управлении температурой земной подстилающей поверхности и приземного воздуха путем генерации высотной техногенной («зонтичной») облачности, используя для этого атмосферную влагу акватории морей и тепловой сброс ТЭС. Прообразом высотной техногенной облачности (ВТО) являются перистые облака верхнего и среднего яруса, доминирующие на высоте свыше 6 км, и их варианты: перистые плотные (*Cirrus spissatus*, Ci sp), перисто-слоистые (*Cirrostratus*, Cs), и перисто-кучевые (*Cirrocumulus*) (рис. 3) [3].

Водность (вода в твердой фазе) перистого облака $\eta_{ci} \sim 0,01$ г/м³ $\sim (1/2500) \cdot \eta_w$. Это обстоятельство является принципиально важным для предлагаемой аэротермической технологии, т.к. позволяет обеспечивать зонтичной ВТО значительные территории путем применения предлага-

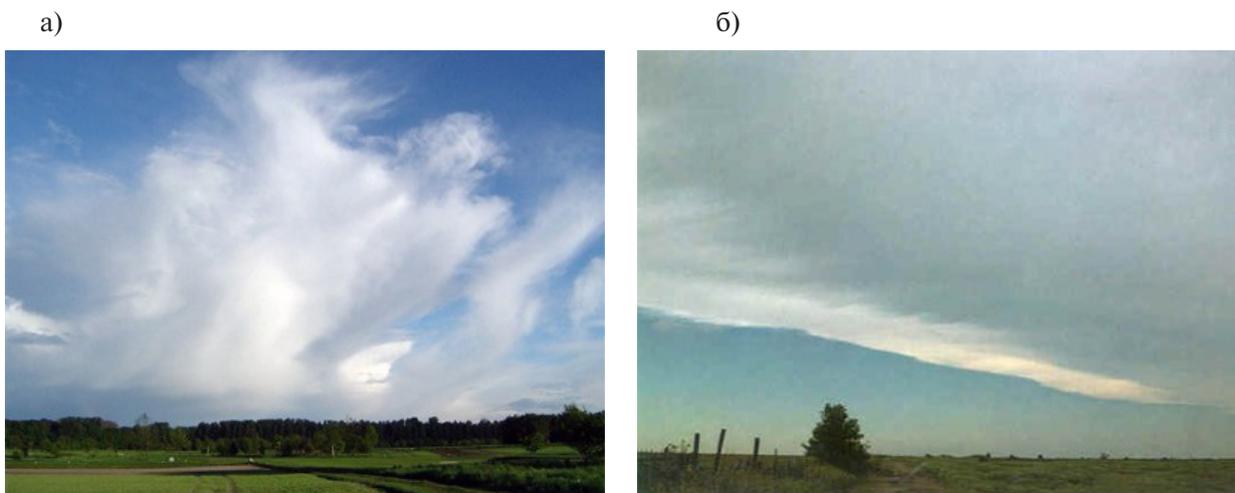


Рис. 3. Различные виды облаков: а – перистые плотные (Cisp), б – перистые слоистые (Cs)
 Fig. 3. Various types of clouds: a – cirrus dense (Cisp), b – cirrus layered (Cs)

емых инноваций, способствующих устойчивому развитию. Прозрачность перистой облачности зависит от ее толщины и водности. Показатель ослабления солнечной радиации может достигать 40% и более [4]. Время долговечности высотной облачности варьируется от нескольких часов до более суток.

Европа характеризуется преимущественно внешним влагооборотом, когда выпадение осадков происходит за счет переноса влаги и воздушных масс в соответствии с Розой ветров. Это адвективные осадки, доля которых для Европы, как и для Африки, составляет 70%, для Азии и Северной Америки они составляют 55 и 59% соответственно. ВТО может быть эффективным средством ослабления солнечной радиации проблемных территорий Европы в широких пределах, в плавном и обратимом режиме регулирования. Основным источником воды (влаги) для ВТО служит атмосферная влага акватории европейских морей, переносимая техногенными динамическими струями воздуха на высоту более 6 км.

Условия регионального охлаждения Европы. Охлаждение регионов Европы может быть осуществлено при выполнении трех условий:

- 1 – наличие природных условий для существования ВТО в Европе;
- 2 – наличие природного средства для переноса ВТО в заданном направлении;
- 3 – наличие технических средств обеспечения генерации ВТО.

Рассмотрим эти условия более подробно:

1. Визуальным доказательством наличия условий для существования в Европе зонтичной ВТО от ТЭС является рис. 1 [2] с изображением типичных тропосферных струй теплого воздуха двух башенных градирен АЭС «Gundremmingen» (Германия) с тепловой мощностью более 2000 МВт каждая. На фотографиях детально видны природная маловысотная и техногенная высотная облачность, плотная тень от образованной зонтичной ВТО, источники и направление переноса ВТО. Форма ВТО, зависящая от высотного ветра, близка к сектору с острым углом. Относительно высокая температура и начальная скорость теплой струи воздуха градирен ТЭС в атмосфере могут обеспечить ей достижение высоты более 6 км. Важным фактором для генерации зонтичной ВТО является также минимизация рассеивания факела струи теплого воздуха приземным ветром.

2. Средство направленного переноса зонтичной ВТО – природный высотный (геострофический, «самолетный») ветер верхней тропосферы. В северном полушарии Земли он имеет преимущественно западное направление и скорость от нескольких единиц до 30-40 м/сек. Температура

воздуха на высоте от 6 до 15 км составляет минус от 10 °С до минус 60 °С. Территория экранирования Европы будет определяться местом размещения технических средств генерации ВТО в акватории европейских морей, Розой приземных ветров и направлением высотного ветра.

3. Техническое средство для генерации ВТО заданного масштаба назовем «LAND-COOLER» («охладитель земель») или аэротермический кулер [5–6].

Аэротермический кулер [6] должен удовлетворять следующим требованиям:

- а) поставлять на высоту 2 км и выше экологически чистый влагосодержащий продукт природного взаимодействия моря и солнца;
- б) работать длительное время (до 6 месяцев в году) без выхода из строя;
- в) иметь преимущественно морское/островное или полуостровное прибрежное базирование;
- г) не зависеть от приземных ветров различного направления;
- д) обладать устойчивостью к цунами и другим водным стрессам;
- е) вырабатывать, при необходимости, также пресноводный конденсат из морской атмосферной влаги;
- ж) быть подконтрольным международному сообществу, например, ООН (UN-Water) и др.

Конструкция аэротермического кулера

Основой кулера [6] являются инжекторы – полые железобетонные сооружения цилиндрической формы типа башенных градирен, высотой 150 м и более, с диаметром сопла 40-100 м. На рис. 4 представлены эскизы основных конструкций инжекторов кулера.

Внутри инжектора устанавливаются дополнительные трубные конструкции и электровентилляторные установки для подготовки, контроля и заброса увлажненного воздуха на расчетную высоту 2 км и выше. Высота инжектора кулера и скорость вывода влажного воздуха должны обеспечивать независимость работы комплекса от направления и силы приземных ветров.

На рис. 5 показаны варианты кулера с 6 и 3 инжекторами соответственно.

Мощность аэротермического кулера

Исходя из диаметра выходного сопла инжектора $D_0 = 40$ м и заданной производительности инжектора (по воздуху) $Q_A = 50000$ м³/сек, оценим величину мощности (N_{50}), затрачиваемой электровентилляторами для достижения воздушной струи высот 2 км и более [Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир., 1982. – 519 с.]. Для обеспечения значения Q_A начальная воздушная скорость струи должна быть $V_{i0} = Q_A / (\pi * D_0^2 / 4) = 40$ м/сек = 144 км/ч. Такую скорость воздуха используют в дозвуковой аэродинамической трубе.

Оценим мощность инжектора N_{50} , необходимую для обеспечения производительности (по воздуху) $Q_A = 50000$ м³/с из соотношения:

$$N_{50} = (\pi/8) * \rho * D_0^2 * V_{i0}^3 = \text{МВт}, \quad (1)$$

где $\rho = 1,2$ кг/м³ – плотность воздуха.

Вертикальные струи воздуха именно таких выходных параметров, согласно оценке Пристли [7], могут достигать в условиях неустойчивой стратификации атмосферы высот 2 км и более, имея на этой высоте максимальную скорость $V_{i2} = 4,5$ м/с (рис. 6).

Параметры ВТО. Оценим стабильные видимые размеры ВТО (в форме сектора) [8], приняв:

- 1) условное время оптического существования «вещества» зонтика ВТО $\tau_1 = 24$ ч,
- 2) изменение водосодержания морского воздуха ($\eta_w \sim 25$ г/м³) при образовании ледяного перистого облака ($\eta_{ci} \sim 0,01$ г/м³ = $\eta_w/2500$) обусловлено рассредоточением 1:2500 воздушной массы ВТО на высоте свыше 6 км.

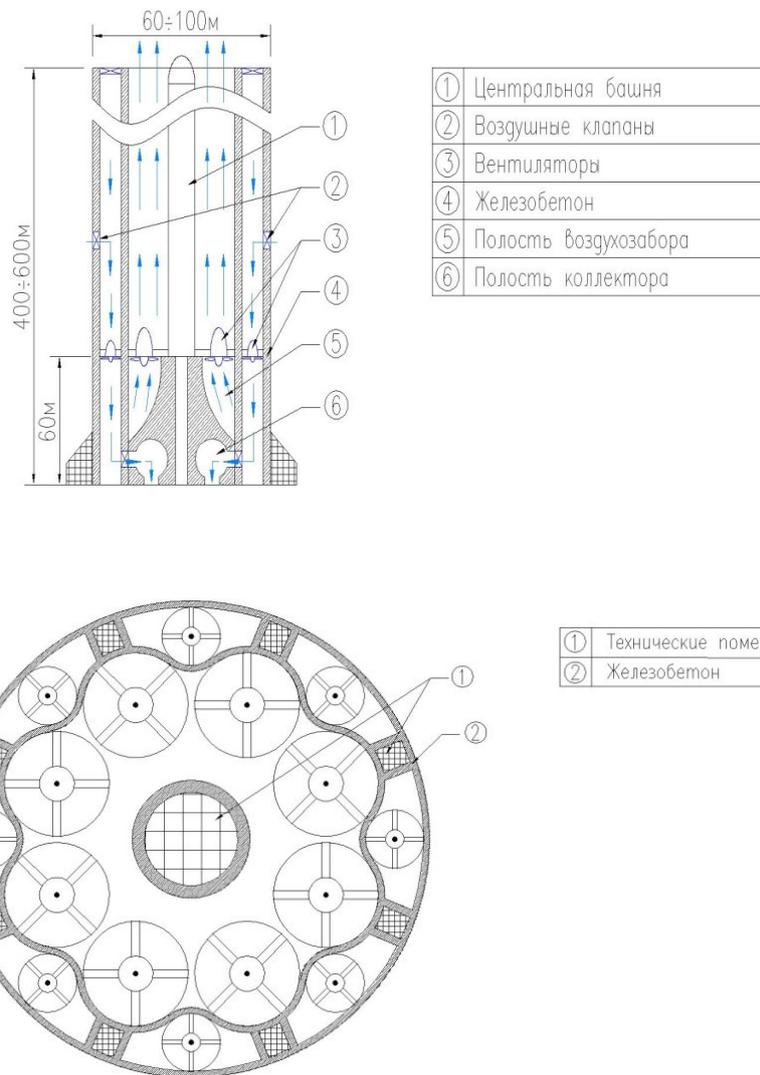


Рис. 4. Вид инжектора кулера в осевом (а) и поперечном (б) сечениях

Fig. 4. View of the cooler injector in axial (a) and transverse (b) sections

Очевидно, объем ВТО, с учетом рассредоточения (1:2500) в перистую облачность составит за сутки:

$$V_{\text{ВТО}} = Q_A * \tau_1 = 50000 \text{ (м}^3/\text{с)} * 24 * 3600 \text{ (с)} * 2500 = 10800 \text{ (км}^3\text{)}.$$

При характерной толщине перистого облака $h_{ci} = 100\text{-}400 \text{ м}$ [8] площадь ВТО и экранируемой территории достигнет:

$$S_{\text{ВТО}} = V_{\text{ВТО}} / h_{ci} = 100\text{-}28 \text{ тыс. км}^2. \quad (2)$$



Рис. 5. Блоки аэротермического кулера с различным количеством инжекторов: а – с 6 (прибрежное материковое или островное базирование) и б – с 3 (прибрежно-полуостровное базирование)

Fig. 5. Blocks of an aerothermal cooler with a different number of injectors: a – with 6 (coastal mainland or island-based) and b – with 3 (coastal-peninsular base)

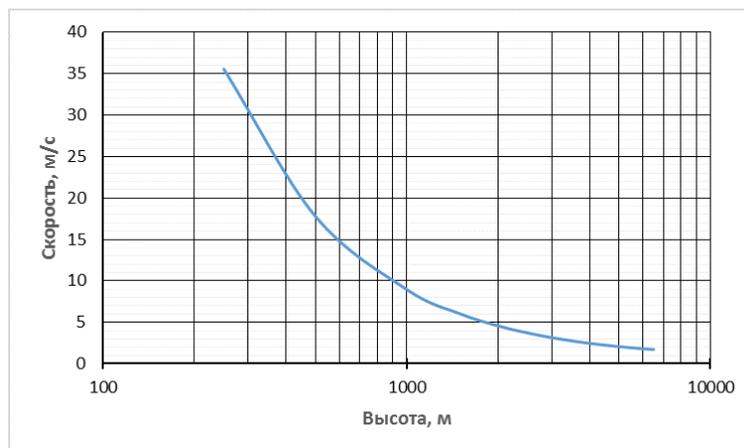


Рис. 6. Зависимость максимальной скорости струи воздуха из сопла инжектора аэротермического кулера от высоты подъема (для вертикальной воздушной струи в нестратифицированной атмосфере)

Fig. 6. The dependence of the maximum velocity of the air jet from the nozzle of the aerothermal cooler injector on the lifting height (for a vertical air jet in an unstratified atmosphere)

Глубина распространения ВТО по континенту $R_{\text{ВТО}}$ для диапазона скорости высотного ветра (и соответственно ВТО) $V_{\text{ВТО}} = 5-30$ м/с, равна:

$$R_{\text{ВТО}} = 24 \cdot 3600 (с) \cdot V_{\text{ВТО}} (м/с) = 430-2580 \text{ км.}$$

В зависимости от требуемой величины площади ослабления солнечной нагрузки на территории, экранируемой ВТО, и количества инжекторов, в качестве источника энергии для электровентиляторов могут использоваться типовые европейские ТЭЦ и АЭС мощностью 100-1000 МВт.

Аэротермический кулер и башенная градирня

Инжекторами кулера [6] могут также быть одна или несколько башенных градирен АЭС (рис. 2), модернизированных для функций совмещения теплового сброса и генерации зонтичной ВТО. Модернизация градирни состоит в оснащении ее башни блоками электровентиляторов необходимой производительности для обеспечения расхода и скорости воздуха на выходе из сопла, достаточной для быстрого прохождения барьерного слоя приземного ветра и нижней тропосферной облачности, т.е. для динамического подъема воздуха градирни на высоту свыше 2 км. Дальнейший подъем воздуха из градирни на высоту геострофического ветра (свыше 6 км) будет происходить путем естественного всплытия воздушной струи (рис. 1) вследствие существенной разности температур воздуха из градирни и окружающего воздуха.

Перспективным вариантом градирни, обеспечивающей экологическую чистоту среды ВТО и минимальный расход пресной воды, представляется башенная «сухая» градирня [9–10], поставляющая в атмосферу только тепловую энергию.

Для круглогодичной эксплуатации аэротермического кулера целесообразно предусмотреть также сохранение возможности функционирования модернизированной градирни при отключении функции генерации ВТО в холодное время года. Инжекторы могут быть оборудованы системой контроля генерируемой воздушной струи на соответствие экологическим требованиям для градирен Европы.

Размещение блоков аэротермического кулера для региональной коррекции климата Европы

Проблемная территория Европы (от Португалии до Черного моря) составляет примерно 70–85% от всей площади Европы или ~8 млн. км². Для экранирования с помощью ВТО такой территории может потребоваться, согласно условию (2), около 60 инжекторов, сгруппированных в 15 кулеров. Примерные места расположения в Европе кулеров и ВТО, с учетом близости акваторий морей и направления высотного (более 6 км) ветра, указаны на онлайн карте Розы высотных ветров [11] Европы (рис. 7).

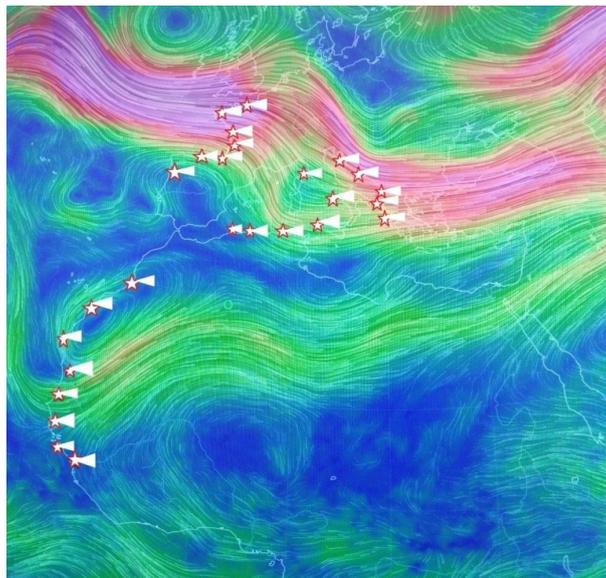


Рис. 7. Схема расположения европейской группировки в составе 10 аэротермических кулеров с 40 инжекторами для охлаждения проблемных регионов Европы от Португалии до Черного моря.

Fig. 7. The layout of the European grouping consisting of 10 aerothermal coolers with 40 injectors for cooling the problem regions of Europe from Portugal to the Black Sea

Необходимо также с помощью кулеров на побережье Атлантики уменьшить солнечный нагрев территории северо-африканской пустыни Сахары — источника больших объемов горячего воздуха, песка и пыли, транспортируемых в различных направлениях на другие континенты вплоть до бассейна реки Амазонки.

В зависимости от остроты негативных эффектов аномального потепления возможна актуализация мест расположения кулеров на карте Европы и последовательности их организации. Учитывая, что максимальная протяженность Пиренейского полуострова площадью около 600 тыс. км² с запада на восток составляет 1200 км и его нахождение между Атлантическим океаном и Средиземным морем, наличие европейских пустынь (Табернас, Монегрос и др.), целесообразно применение ВТО для охлаждения Испании с размещением кулеров вблизи ТЭС на Атлантическом побережье Испании и Португалии. При этом возможно размещение кулеров на Канарских островах для повышения эффективности работы западно-африканской группы кулеров. АЭС атлантического побережья Франции могут быть особенно эффективны для масштабного экранирования ВТО территории Европы при расширении зоны глобального потепления от Сахары до Балтийского моря.

Преимущества и особенности кулера

Представленный принцип регулирования температуры приземной атмосферы и земной поверхности при работе кулера [5–6] примерно аналогичен деятельности гипотетически управляемого вулкана, выводящего в атмосферу исключительно чистые воздушные массы акватории морей, без пепла, колебаний почвы и инициирования цунами.

Облачно-атмосферная нагрузка наземного кулера на климат регионов полностью обратима, регулируема и подконтрольна, в отличие от вземных и дорогостоящих аэрокосмических «линзовых», либо «экранных» способов регулирования солнечной радиации или какого-либо химико-токсичного воздействия на облачность и атмосферу Европы путем распыления аэрозолей на основе серы и других элементов [12–16].

Благодаря высотной «криогенной» дистилляции ВТО (аналогично природным высотным облакам морского происхождения) токсичное «заселение» защищаемой от солнца территории исключено.

Из-за охлаждения приземного воздуха при работе кулера для получения визуального затенения (экранирования) территории Европы вероятно поступление дождевой облачности со стороны морей и увеличение количества осадков в жаркое время года.

Струйный перенос больших объемов воздуха может сопровождаться низкочастотным шумовым фоном. Конструкция инжектора должна максимально компенсировать отрицательные акустические эффекты.

Зона струйного переноса воздуха (радиусом несколько километров вокруг кулера) должна быть закрыта для беспилотников и авиации.

Общие риски использования в проекте кулера градирен, например, атомных электростанций в статье не рассматриваются. Очевидно, что рассеивание радионуклидов исключается полным контролем используемых воздушных масс и отключением электропитания инжектора при атомном инциденте.

Воздушные струи инжекторов аэротермического кулера возможно будут представлять опасность для птиц, летающих вблизи и над градирнями.

Анализируя экологические особенности применения кулеров при растущей угрозе перегрева, засухи, опустынивания и пожароопасности в Европе, необходимо учитывать безусловный приоритет обеспечения природного комфорта, ценности жизни и здоровья европейской цивилизации, как главные цели устойчивого развития.

Аэротермический кулер актуален уже сегодня

Кулер [17–19] целесообразно использовать для умеренного снижения максимальных летних (и среднегодовых) температур проблемных территорий Европы, а также для устранения дефицита пресной воды одновременно с решением задачи коррекции природного влагооборота. Влияние работы кулера может ощущаться на значительном расстоянии (предварительно 1000 км) от берега.

Кулер с инжекторами-градирнями полностью управляем, позволяет менять структуру и оптическую прозрачность ВТО, а также характеристики своей работы вплоть до прекращения генерации зонтичной ВТО, продолжая эксплуатацию по промышленной конденсации атмосферной влаги для поставки чистой природной воды хозяйственно-питьевого назначения [6, 18–21].

Высотная облачность, генерируемая наземным кулером, обладает системно регулируемой человеком плотностью и площадью зонтичного покрытия территории. Это не осуществимо другими методологиями формирования и управления облачностью [13–14].

Отметим, что бесперебойный цикл работы кулера на базе ТЭС делает доступным использование атмосферной влаги морей для устранения статичности внутреннего влагооборота, когда выпадение осадков уже недостаточно за счет меньшей влаги, испарившейся с территориальных водоемов и земель биосферы (лесов, подвергаемых вырубке) со снижающимся влагосодержанием почвы.

Перспективными для кулера [6] на базе ТЭС являются территории не только Европы, но и растущих пустынь Австралии, Ирана, Индии, Северной и Южной Америки, Африки (прибрежная зона пустыни Сахара площадью 9 млн. км²) и Азии при благоприятной Розе ветров со стороны моря (океана). Эти территории перегреты немного больше, чем пустыни и обезвоживающиеся земли Испании и южной Франции, для которых уже сейчас актуально использование бискайско-ламаншевской группы кулеров совместно с французскими АЭС, чтобы снизить максимальный летний перегрев в восточной и южной частях Европы относительно Франции.

Заключение

1. Проблема охлаждения Европы летом имеет решение путем управления температурой земной подстилающей поверхности и приземного воздуха с помощью высотной техногенной зонтичной облачности, используя для этого доступную атмосферную влагу акватории морей и не используемый значительный тепловой сброс европейских энергетических станций.

2. Техническую реализацию охлаждения Европы обеспечит наземный аэротермический кулер – стационарный энергетический комплекс для подготовки и заброса увлажненного воздуха на расчетную высоту 2 км и более при мобилизации возможностей европейской энергетики и неограниченных запасов пресной воды в виде пара в атмосфере над акваториями морей и Атлантического океана.

3. Размещение кулеров на территории юга и запада Европы (от Португалии до Адриатического моря) (рис. 7) обеспечит зонтичной облачностью территорию площадью ~6 млн. км². Для этого потребуются около 60 инжекторов, в составе 10-15 кулеров.

4. Аэротермический кулер является перспективной, и, вместе с тем, формирующейся зеленой мультидисциплинарной технологией для обеспечения целей устойчивого развития на базе современной атомной, тепловой и другой энергетики в зональном, региональном и глобальном формате. Уникальные возможности облачно-атмосферной «зеленой» технологии борьбы с перегревом и засухой актуальны не только для Европы, но и для множества проблемных территорий других континентов.

5. Кулер использует для коррекции климата абсолютно бесплатные средства: безграничную атмосферную влагу акватории морей и бесполезный для человечества и окружающей среды те-

пловой сброс энергетических станций. Строительство кулеров в Европе актуально было начать уже вчера, сегодня еще можно успеть, а завтра может оказаться поздно.

6. Зонтичная облачность перспективна для охлаждения обезвоженных земель и пустынь Испании при размещении кулеров на Атлантическом материковом и островном побережье Испании и Португалии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Котляков В.М.** Академическая география // Наука в России. 2008. № 4. С. 40–49.
- [2] Пар из градирен самой большой в Германии атомной электростанции «Gundremmingen». [Электронный ресурс]. URL: <https://cs5.pikabu.ru/postimg/big/2014/07/11/6/14050688391700831546.jpg>.
- [3] **Беспалов Д.П., Девяткин А.М., Довгалюк Ю.А., Кондратьев В.И., Кулешов Ю.В., Светлова Т.П., Суворов С.С., Тимофеев В.И.** Атлас облаков. – СПб: Д`АРТ, 2011. – 248 с.
- [4] **Григорьев Н.О., Саенко А.Г.** Оценка прозрачности перистых облаков на основе анализа спутниковых фотографий. – Материалы итоговой сессии Ученого совета. – СПб.: Изд. Российского Государственного Гидрометеорологического Университета (РГГМУ), 2005. – 224 с.
- [5] **Рогожкин В.В., Горынин В.И., Мишин Е.Б., Коленов Е.В., Минкин А.И.** COOLERS – Новое средство для обводнения пустыни. Сб. материалов Всероссийской конференции изобретателей «Изобретатели России в импортозамещении». – СПб: Изд. Политехнического университета, 2018, с. 127–136.
- [6] Патент на изобретение RU 2734834 от 23.10.2020, Бюл. № 30, Кулер для регулирования климата / Рогожкин В.В., Коленов Е.В., Горынин В.И., Шеволдин А.В.
- [7] **Пристли С.Х.Б.** Турбулентный перенос в приземном слое атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1964. – 122 с.
- [8] **Андреев А.О., Дукальская М.В., Головина Е.Г.** Облака: происхождение, классификация, распознавание. СПб.: Изд. РГГМУ, 2007. – 228 с.
- [9] **Горбачев А.И., Кондратьева Т.Р., Казинки И.** Экологические предпосылки применения воздушно-конденсатных установок // Энергетик. 2000. Специальный выпуск. С. 22–24.
- [10] **Сабо З.** Повышение эффективности сбережения воды в системах охлаждения электростанций // Энергетик. 2002. Спец. вып. С. 3–11.
- [11] **Камерон Беккариа.** Глобальная карта ветров. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://earth.nullschool.net/about>.
- [12] Пять невероятных способов остановить глобальное потепление с помощью геоинженерии. 2012. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ecobyte.ru/article/121112/457/>.
- [13] **Йоррио Луиджи.** Управление климатом как инструмент борьбы с глобальным потеплением. 2014. [Электронный ресурс]. URL: <https://www-swissinfo.ch/rus/sci-tech/40807950>.
- [14] **Lohman U., Gasparini B.A.** Cirrus cloud climate dial? // Science. 2017. V. 357. P. 248–249.
- [15] Smith W., Wagner G. Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 2021s of deployment // Environmental Research Letters. 2018. V. 13. № 12. Art. 124001.
- [16] Ricke K., Drouet L., Kalderia K., Tavoni M. Country-level social cost of carbon // Nature Climate Change. 2018. V. 8. P. 895-900.
- [17] Патент на изобретение RU 2504417 C1 от 20.01.2014, Бюл. № 2 Атомно-энергетический комплекс / Рогожкин В.В., Мошков К.В., Вализер Н.А., Потапов К.А.
- [18] **Горынин В.И., Рогожкин В.В., Кондратьев С.Ю., Мишин Е.Б., Коленов Е.В.** Технология и средства конденсации атмосферной влаги морей для производства пресной воды // Вестник машиностроения. 2019. № 7. С. 84–88.
- [19] **Горынин В.И., Кондратьев С.Ю., Рогожкин В.В., Мишин Е.Б., Коленов Е.В.** Конденсация атмосферной влаги акватории моря для поточного производства природной пресной воды // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26. С. 23–35.

[20] Горынин В.И., Рогожкин В.В., Кондратьев С.Ю., Мишин Е.Б., Коленов Е.В., Шеволдин А.В. Кулер для регулирования климата – решение проблемы пустыни // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27. № 2. С. 23–37.

[21] Горынин В.И., Рогожкин В.В., Ланин А.А., Туркбоев А. Особенности проектирования и выбора материалов при изготовлении блоков конденсера для производства природной пресной воды // *Научно-технические ведомости СПбГУ. Естественные и инженерные науки*. 2018. Т. 24. № 2. С. 140–148.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РОГОЖКИН Владимир Владимирович – главный специалист, АО "Атомпроект", канд. физ.-мат. наук.

E-mail: vvrogzhkin@atomproekt.com

ГОРЫНИН Владимир Игоревич – начальник лаборатории, Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», д-р техн. наук.

E-mail: vigorynin@gmail.com

КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: petroprom2013@yandex.ru

МИШИН Евгений Борисович – директор Московского проектного института, Московский проектный институт АО «Атомэнергопроект», канд. техн. наук.

E-mail: mishin@aep.ru

КОЛЕНОВ Евгений Викторович – ведущий конструктор, ПАО «Силовые машины», без степени.

E-mail: evkol50@gmail.com

ШЕВОЛДИН Алексей Вячеславович – ведущий инженер, Санкт-Петербургский филиал Московского проектного института АО «Атомэнергопроект», без степени.

E-mail: avshev@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 26.07.2021

REFERENCES

[1] V.M. Kotlyakov, *Akademicheskaya geografiya* // *Nauka v Rossii*. 2008. № 4. S. 40–49.

[2] Par iz gradiren samoy bolshoy v Germanii atomnoy elektrostantsii «Gundremmingen». [Elektronnyy resurs]. URL: <https://cs5.pikabu.ru/postimg/big/2014/07/11/6/14050688391700831546.jpg>.

[3] D.P. Bepalov, A.M. Devyatkin, Yu.A. Dovyalyuk, V.I. Kondratyuk, Yu.V. Kuleshov, T.P. Svetlova, S.S. Suvorov, V.I. Timofeyev, *Atlas oblakov*. – SPb: D`ART, 2011. – 248 s.

[4] N.O. Grigoryev, A.G. Sayenko, *Otsenka prozrachnosti peristykh oblakov na osnove analiza sputnikovykh fotografiiy*. – *Materialy itogovoy sessii Uchenogo soвета*. – SPb.: Izd. Rossiyskogo Gosudarstvennogo Gidrometeorologicheskogo Universiteta (RGGMU), 2005. – 224 s.

[5] V.V. Rogozhkin, V.I. Gorynin, Ye.B. Mishin, Ye.V. Kolenov, A.I. Minkin, *COOLERS – Novoye sredstvo dlya obvodneniya pustyni*. Sb. materialov Vserossiyskoy konferentsii izobretateley «Izobretateli Rossii v importozameshchenii». – SPb: Izd. Politekhnicheskogo universiteta, 2018, s. 127–136.

[6] Patent na izobreteniyе RU 2734834 ot 23.10.2020, Byul. № 30, Kuler dlya regulirovaniya klimata / Rogozhkin V.V., Kolenov Ye.V., Gorynin V.I., Shevoldin A.V.

- [7] **S.Kh.B. Pristli**, Turbulentnyy perenos v prizemnom sloye atmosfery. – L.: Gidrometeoizdat, 1964. – 122 s.
- [8] **A.O. Andreyev, M.V. Dukalskaya, Ye.G. Golovina**, Oblaka: proiskhozhdeniye, klassifikatsiya, raspoznavaniye. SPb.: Izd. RGGMU, 2007. – 228 s.
- [9] **A.I. Gorbachev, T.R. Kondratyeva, I. Kazinki**, Ekologicheskiye predposylki primeneniya vozdušno-kondensatnykh ustanovok // Energetik. 2000. Spetsialnyy vypusk. S. 22–24.
- [10] **Z. Sabo**, Povysheniye effektivnosti sberezheniya vody v sistemakh okhlazhdeniya elektrostantsiy // Energetik. 2002. Spets. vyp. S. 3–11.
- [11] Kameron Bekkaria. Globalnaya karta vetrov. 2018. [Elektronnyy resurs]. URL: <https://earth.nullschool.net/about>.
- [12] Pyat neveroyatnykh sposobov ostanovit globalnoye potepeniye s pomoshchyu geoinzhenerii. 2012. [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.ecobyte.ru/article/121112/457/>.
- [13] **Yorio Luidzhi**, Upravleniye klimatom kak instrument borby s globalnym potepeniyem. 2014. [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www-swissinfo.ch/rus/sci-tech/40807950>.
- [14] **U. Lohman, B.A. Gasparini**, Cirrus cloud climate dial? // Science. 2017. V. 357. Pp. 248–249.
- [15] **W. Smith, G. Wagner**, Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 years of deployment // Environmental Research Letters. 2018. V. 13. № 12. Art. 124001.
- [16] **K. Ricke, L. Drouet, K. Kalderia, M. Tavoni**, Country-level social cost of carbon // Nature Climate Change. 2018. V. 8. P. 895–900.
- [17] Patent na izobreteniyе RU 2504417 C1 ot 20.01.2014, Byul. № 2 Atomno-energeticheskiy kompleks / Rogozhkin V.V., Moshkov K.V., Valizer N.A., Potapov K.A.
- [18] **V.I. Gorynin, V.V. Rogozhkin, S.Yu. Kondratyev, Ye.B. Mishin, Ye.V. Kolenov**, Tekhnologiya i sredstva kondensatsii atmosfernoй vlagi morey dlya proizvodstva presnoy vody // Vestnik mashinostroyeniya. 2019. № 7. С. 84–88.
- [19] **V.I. Gorynin, S.Yu. Kondratyev, V.V. Rogozhkin, Ye.B. Mishin, Ye.V. Kolenov**, Kondensatsiya atmosfernoй vlagi akvatorii morya dlya potochnogo proizvodstva prirodnoy presnoy vody // Materialovedeniye. Energetika. 2020. T. 26. С. 23–35.
- [20] **V.I. Gorynin, V.V. Rogozhkin, S.Yu. Kondratyev, Ye.B. Mishin, Ye.V. Kolenov, A.V. Shevoldin**, Kuler dlya regulirovaniya klimata – resheniye problemy pustyni // Materialovedeniye. Energetika. 2021. T. 27. № 2. S. 23–37.
- [21] **V.I. Gorynin, V.V. Rogozhkin, A.A. Lanin, A. Turkboyev**, Osobennosti proyektirovaniya i vybora materialov pri izgotovlenii blokov kondensera dlya proizvodstva prirodnoy presnoy vody // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24. № 2. С. 140–148.

THE AUTHORS

ROGOZHNIKIN Vladimir V. – JSC "Atomproekt".

E-mail: vvrogozhkin@atomproekt.com

GORYNIN Vladimir I. – Central Research Institute of Structural Materials "Prometey".

E-mail: vigorynin@gmail.com

KONDRATYEV Sergey Yu. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

E-mail: petroprom2013@yandex.ru

MISHIN Evgeniy B. – JSC "Atomenergoproekt".

E-mail: mishin@aep.ru

KOLENOV Evgeniy V. – PJSC "Power machines".

E-mail: evkol50@gmail.com

SHEVOLDIN Aleksey V. – *JSC "Atomenergoproekt", St-Petersburg Branch.*
E-mail: avshev@gmail.com

Received: 26.07.2021

DOI: 10.18721/JEST.27312

УДК 669

А.А. Стрельникова, М.А. Скотникова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СВОЙСТВА α - И β -ФАЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

В статье исследовано влияние высокотемпературной деформации на фазовый состав и физико-механические свойства титанового сплава. В данной статье приведены результаты исследования двухфазного титанового сплава 3М при различных степенях высокотемпературной деформации (80%, 83%, 86%, 90%, 93%). В статье проведены фазовые исследования, применены методы оптической металлографии и инструментального индентирования. Установлены взаимосвязи между структурно-фазовым состоянием, физико-механическими свойствами титанового сплава 3М при изменении степени деформации: с увеличением степени деформации титанового сплава содержание α -фазы возрастает в фазовом составе материала, увеличивается твердость и эластичность сплава, а пластичность снижается. Полученные результаты позволяют существенно углубить знания о связи фазового состояния и физико-механических титанового сплава.

Ключевые слова: титановый сплав, высокотемпературная деформация, механические свойства, фазовый состав, оптическая микроскопия, инструментальное индентирование.

Ссылка при цитировании:

Стрельникова А.А., Скотникова М.А. Исследование влияния высокотемпературной деформации на свойства α - и β -фаз титанового сплава // *Материаловедение. Энергетика.* 2021. Т. 27, № 3. С. 134–144. DOI: 10.18721/JEST.27312

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

A.A. Strelnikova, M.A. Skotnikova

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HIGH-TEMPERATURE DEFORMATION ON THE PROPERTIES OF THE α - AND β -PHASES OF TITANIUM ALLOY

The article studies the influence of the high-temperature deformation on phase composition and physico-mechanical properties of the titanium alloy. Research into the topic allows increasing durability, reliability, and the resource of machines and equipment. Materials and designs of machines and equipment are constantly getting upgraded in the world, therefore, it is very important not only to use already known methods of materials research, but also to develop and improve research methods and techniques. In this scientific project, a two-phase titanium alloy 3M was investigated at different degrees of high-temperature deformation (80%, 83%, 86%, 90%, 93%). The authors carried out phase studies using the methods of optical metallography and instrumental indentation. The relationships between the structural-phase state, physical and mechanical properties of titanium alloy 3M with a change in the degree of deformation have been established. The study of the phase composition, properties of the α - and β -phase by the method of indentation of samples with different degrees of hot deformation of the 3M alloy made it clear that

with an increase in the degree of deformation, the fraction of the α -phase in the alloy increases, and the material becomes harder and less plastic.

Keywords: titanium alloy, high-temperature deformation, mechanical properties, phase composition, optical microscopy, instrumental indentation.

Citation:

A.A. Strelnikova, M.A. Skotnikova, Investigation of the effect of high-temperature deformation on the properties of the α - and β -phases of titanium alloy, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (03) (2021) 134–144, DOI: 10.18721/JEST.27312

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Титановые сплавы являются перспективными материалами, применение которых в промышленности, строительстве постоянно возрастает [1–5].

Много работ посвящено изучению влияния различных видов обработок на механические свойства и структуру титановых сплавов [6–8], в том числе влияние степени деформации на материал [9–12].

В настоящее время основными методами исследования материала являются микроструктурный, рентгенографический анализы, методы испытания на ударный изгиб и методы статистических испытаний на растяжение [13–16]. В последние годы кроме часто используемых методов стали применять метод инструментального индентирования [17–19]. Данный метод исследования позволяет определить физико-механические свойства сплава (инструментальную твердость, работу пластической деформации и работу упругого восстановления, и другие свойства материала) локально и наиболее точно.

Цель работы – исследование влияния высокотемпературной деформации на свойства фаз титанового сплава методом инструментального индентирования.

Методика и материалы

Исследования проводились на образцах титанового сплава 3М с разной степенью деформации 80%, 83%, 86%, 90%, 93%, полученных в результате высокотемпературной обработки давлением – ковкой. Образцы находятся в отожженном состоянии (температура нагрева – 870°C; время выдержки – 1 ч 30 мин; охлаждение – воздух).

Исследование фазового состава структуры титанового сплава 3М проводилось на 5 образцах с разной степенью деформацией 80%, 83%, 86%, 90%, 93% методом оптической микроскопии на приборе NIKON ECLIPSE MA100N.

Исследование влияния степени деформации на физикомеханические свойства (твердость, эластичность и пластичность материала) α - и β - фаз титанового сплава проводилось методом инструментального индентирования. Исследования проводились на приборе Micro Indentation Tester CSM.

Инструментальное индентирование проводили при непрерывном внедрении индентора алмазной пирамиды Виккерса в α - и β -фазы образцов исследуемого сплава при постоянной нагрузке (F) 50 мН. Время нагружения 30 сек, а затем алмазную пирамиду Виккерса отводили до полной потери контакта с образцом. Во время всего испытания в виде диаграмм регистрировались значения нагрузки (F) и глубины погружения (h) индентора (рис.1, а).

Непрерывное измерение значений глубины внедрения индентора от перемещения этого индентора при нагружении и снятии нагрузки позволяет определить следующие свойства сплава: значения инструментальной твердости (H_{IT}), глубины погружения индентора (h), работы пластической деформации W_{plast} , работа упругой деформации W_{elast} , механической работы W_{total} при индентировании.

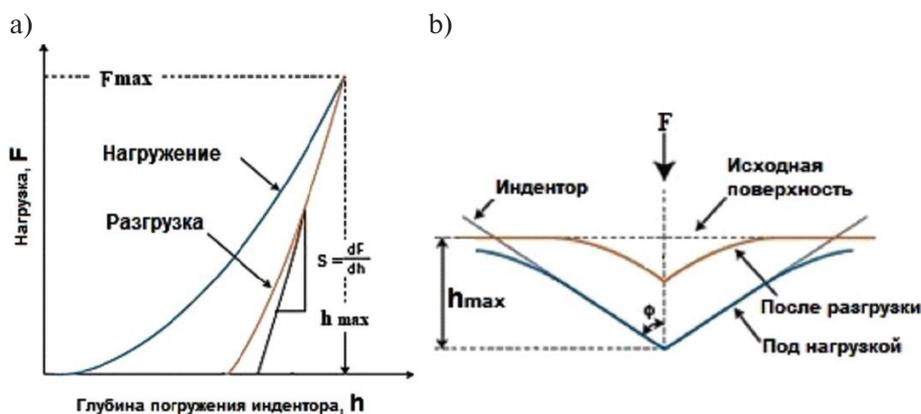


Рис. 1. а – Диаграмма индентирования – зависимость нагрузки от глубины внедрение, б – Схема продольного сечения зоны индентирования
 Fig. 1. а – Indentation diagram – dependence of the load on the penetration depth, б – Diagram of the longitudinal section of the indentation zone

При снятии приложенной нагрузки (остановке инструмента) часть работы упругой деформации исчезает, что сопровождается выделением энергии и восстановлением микрорельефа поверхности (рис. 1, б) [20]¹.

Результаты исследования и их обсуждения

Титановый сплав 3М является двухфазным сплавом. А так как работа посвящена изучению влияния степени деформации на механические свойства α- и β- фаз, то для начала необходимо определить фазовый состав сплава при разных степенях деформации.

Для этого было посчитано процентное соотношение α- и β- фаз в структуре каждого образца. Результаты приведены в табл. 1 и представлены на рис. 2.

Таблица 1

Процент β-фазы, занимаемой от всей площади шлифа

Table 1

The percentage of the β-phase occupied from the total area of the microsection

Образец со степенью предварительной деформации, %	80	83	86	90	93
Процент β-фазы, занимаемой от всей площади шлифа, %	34,52	32,71	30,77	20,05	6,99

Из представленных в табл. 1 результатов, видно, что фазовый состав образцов имеет в своей структуре α- и β-фазы, причём процент β-фазы во много раз меньше α-фазы, и с увеличением степени деформации количество β-фазы уменьшается.

Далее исследовалось влияние степени деформации на физикомеханические свойства (твёрдость и пластичность материала) при инструментальном индентировании.

Результатами измерений при индентировании всех характеристик для каждой фазы и каждой степени деформации являются диаграммы зависимости нагрузки F_n (Н) от времени t (с) и диаграммы зависимости глубины индентирования h (мкм) от времени t (с). Также на основании полученных диаграмм можно построить общую диаграмму зависимости нагрузки F_n от глубины индентирования h.

¹ ГОСТ Р 8.748-2011 Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании

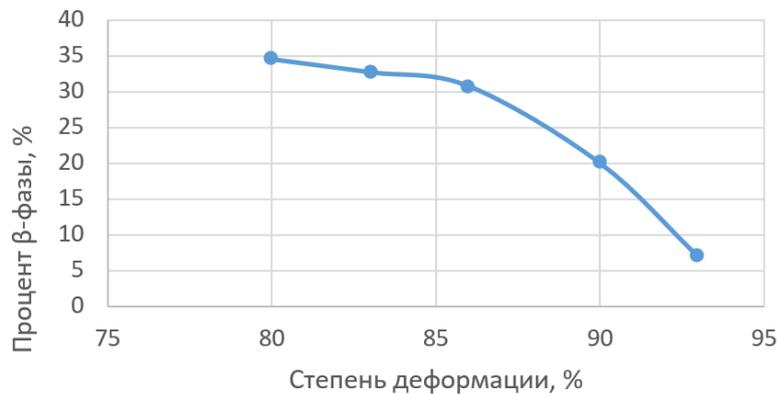


Рис. 2. Диаграмма зависимости процента β -фазы, занимаемой от всей площади шлифа, от степени деформации

Fig. 2. Diagram of the dependence of the percentage of β -phase occupied by the entire area of the microsection on the degree of deformation

Графики результатов, обработанные и приведенные к среднему значению, представлены на диаграммах зависимостей нагрузки F_n от глубины индентирования h для каждой степени деформации (см. рис. 3, а–д) и для каждой фазы (см. рис. 3, е–ж).

Из приведенных графиков можно получить всю информацию о свойствах материала. Рассмотрим влияние степени деформации на твердость, пластичность и эластичность материала.

По глубине внедрения h_{\max} можно судить о твердости материала: чем меньше глубина внедрения, тем больше сопротивление материала, соответственно, больше твердость. Из рис. 3, а–д видим, что глубина внедрения α - фазы меньше глубины внедрения β -фазы при всех степенях деформации. При этом глубина внедрения уменьшается при степени деформации от 80% до 86%, затем увеличивается до степени деформации 90% и снова уменьшается (см. рис. 3, е–ж). Диаграммы глубины индентирования приведены на рис. 4, а. Разница глубин внедрения между фазами α и β больше всего отличается при степени деформации 86% и 93%, следовательно, и твердость больше всего отличается между фазами при этих степенях деформации, что подтверждается диаграммами зависимости твердости инструментальной НИТ, МПа от степени деформации ϵ , % (см. рис 4, б). Исходя из результатов по глубине внедрения, мы можем сказать, что твердость самая высокая для α - фазы при степени деформации 86%, для β - фазы – 83%, а низкая твердость при степени деформации 80% для обеих фаз.

Далее рассмотрим влияние степени деформации на пластичность материала. Остаточная глубина отпечатка после снятия нагрузки h_p говорит о пластичности поверхности материала: чем меньше h_p , тем больше восстанавливается материал после снятия приложенной нагрузки, и тем материал менее пластичный и более эластичный.

Из рис. 3, а–д видим, что глубина отпечатка после снятия нагрузки h_p α -фазы меньше глубины отпечатка после снятия нагрузки β -фазы при всех степенях деформации сплава. То есть α -фаза менее пластичная, чем β -фаза при каждой степени деформации. Если сравнивать между собой глубины отпечатка после снятия нагрузки степеней деформации для β -фазы, то видим, что глубина отпечатка после снятия нагрузки уменьшается при степени деформации от 80% до 86%, затем увеличивается (см. рис. 3, ж). Для α -фазы глубина отпечатка после снятия нагрузки возрастает при степени деформации от 80% до 83%, затем снижается до степени деформации до 86%, после возрастает до 90%, и затем снижается (3, е). Таким образом, для β -фазы более пластичной является степень деформации 93% и менее – 86%, а для α -фазы более пластичной является степень деформации 90% и менее – 86%.

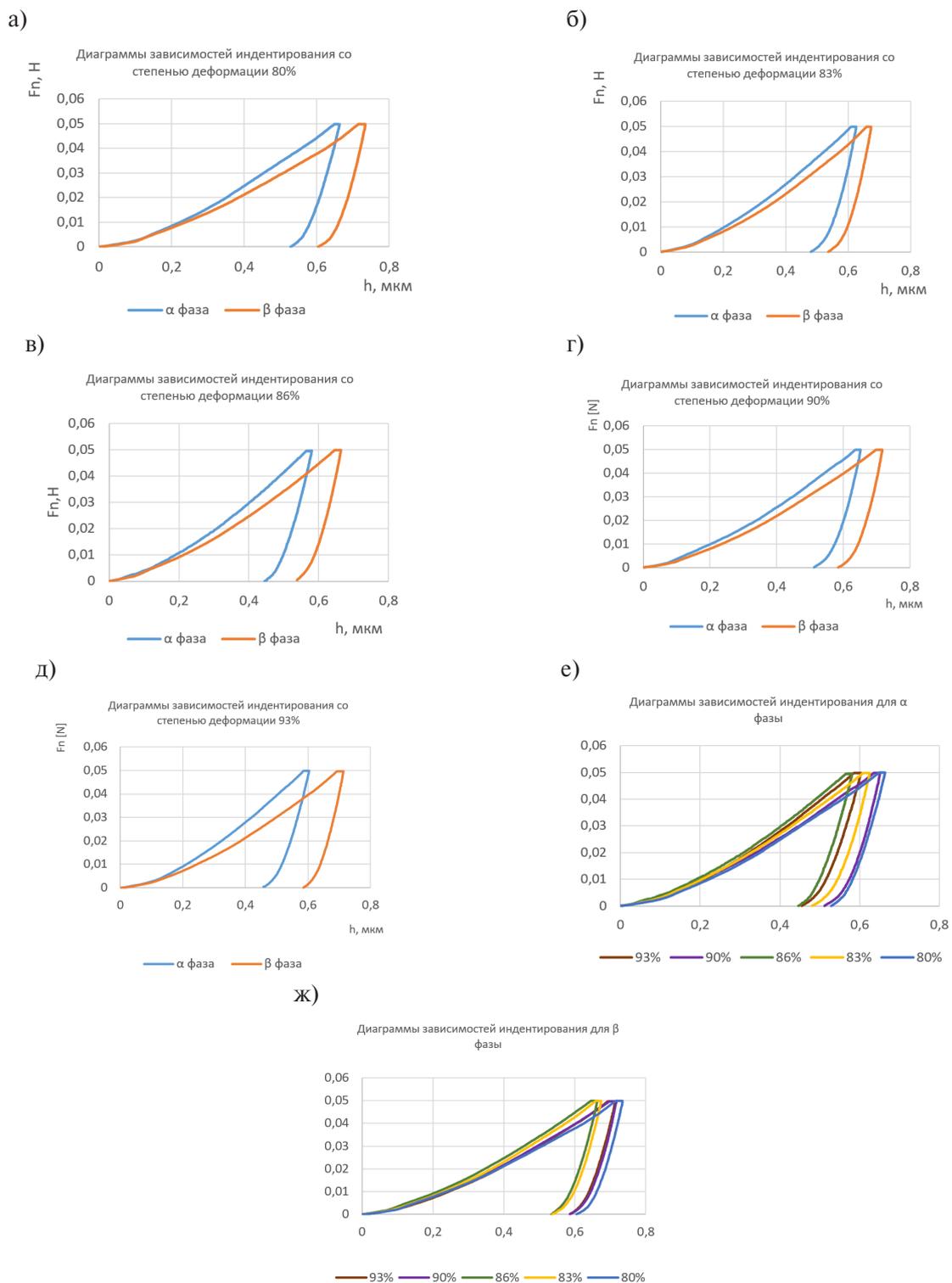


Рис. 3. Диаграмма зависимостей нагрузки F_n от глубины индентирования: а – для степени деформации 80%, б – для степени деформации 83%, в – для степени деформации 86%, г – для степени деформации 90%, д – для степени деформации 93%, е – для каждой степени деформации для α -фазы, ж – для каждой степени деформации для β -фазы.

Fig. 3. Diagram of dependences of the load F_n on the indentation depth: а – for the degree of deformation of 80%, б – for the degree of deformation of 83%, в – for the degree of preliminary deformation of 86%, г – for the degree of preliminary deformation of 90%, д – for the degree of preliminary deformation of 93%, е – for the degree deformation 93%, ж – for each degree of deformation for the α -phase, г – for each degree of deformation for the β -phase

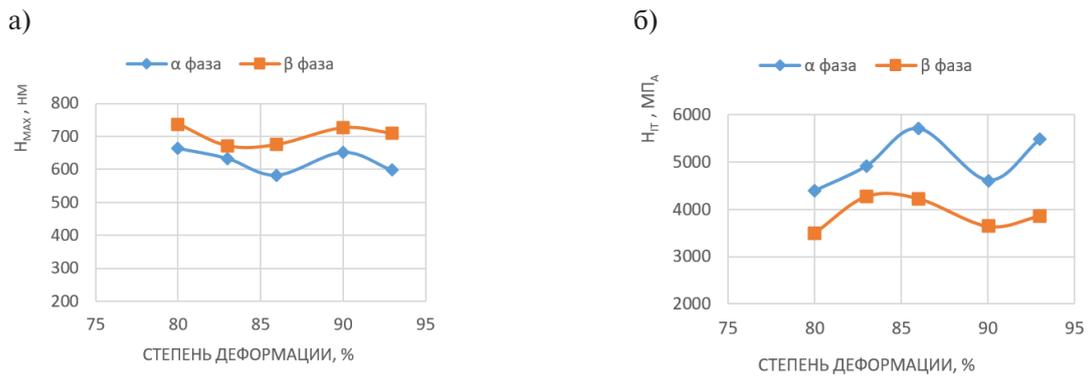


Рис. 4. Диаграмма зависимостей: а – Максимальной глубины индентирования от степени деформации, б – Твердости индентирования от степени деформации

Fig. 4. Diagram of dependences: a – Maximum indentation depth on the degree of deformation, b – Hardness of indentation on the degree of deformation

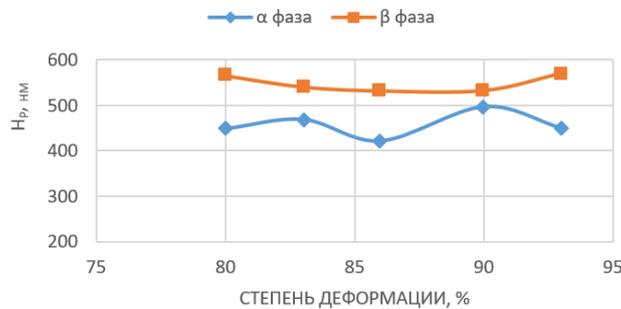


Рис. 5. Диаграмма зависимости остаточной глубины отпечатка после снятия нагрузки h_p от степени деформации
Fig. 5. Diagram of the dependence of the residual indentation depth after unloading h_p on the degree of deformation

Далее рассмотрим влияние высокотемпературной деформации на следующие характеристики: работу упругой деформации, работу пластической (продольной) деформации и полную механическую работу.

Особенности упругопластической деформации приповерхностных объемов материалов заготовок при вдавливании индентором и её локализации в области фактического контакта с поверхностью индентора изучены еще недостаточно.

Ниже на рис. 6, а–в приведены результаты влияния высокотемпературной деформации на работы упругой и пластической деформаций, а также полной механической работы деформации титанового сплава 3М.

Из представленных результатов на рис. 6, а–в видно, что часть механической работы W_{total} , растрчивается на пластическую деформацию W_{plast} . При снятии приложенной нагрузки часть работы (работа упругой деформации W_{elast}) освобождается. Из приведенных выше диаграмм видно, что больше энергии идёт на работу пластической деформации для каждой степени деформации для обеих фаз.

Анализируя диаграммы зависимости работы пластической деформации от степени деформации (рис. 6, а), можно сказать, что α-фаза менее пластичная, чем β-фаза. Далее сравним работу пластической деформации между собой для каждой степени деформации. Для α-фазы работа пластической деформации уменьшается от 80% степени предварительной деформации до 86%, затем увеличивается до 90%, после уменьшается (см. рис. 3, е). Для β-фазы работа пластической

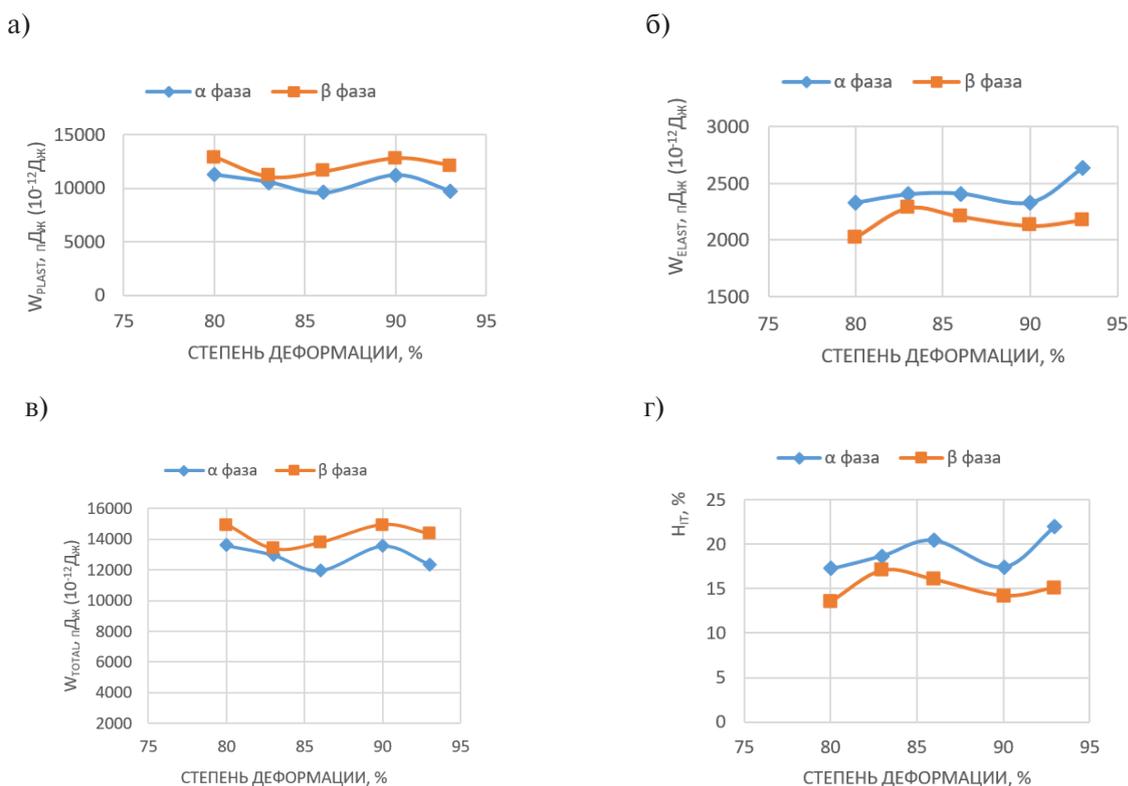


Рис. 6. Диаграммы: а – Работа пластической деформации, б – Работа упругой деформации, в – Полная механическая работа, г – Упругая составляющая работы

Fig. 6. Diagrams: a – Work of plastic deformation, б – Work of elastic deformation, в – Full mechanical work, г – Elastic component of work

деформации снижается от 80% степени деформации до 83%, затем возрастает до 90%, и снижается (з, ж). При этом следует отметить, что максимальная работа пластической деформации совершается при 80% степени деформации для α - и β - фаз, а минимальная при 86% для α - фазы и 83% для β - фазы. Это говорит о том, что материал наиболее пластичен при степени деформации 80% (то есть минимальной степени деформации) для обеих фаз.

Далее рассмотрим влияние высокотемпературной деформации на эластичность материала. Показателем эластичности материала является упругая составляющая работы $\eta_{ГТ}$, % (см. рис. 6, г): чем больше $\eta_{ГТ}$, тем материал более эластичный (менее пластичный).

Анализируя диаграммы зависимости упругой составляющей работы деформации $\eta_{ГТ}$ от степени предварительной деформации (рис. 6, г), можно сказать, что $\eta_{ГТ}$ при вдавливании индентора в α - фазе больше, чем в β - фазе, и что с увеличением степени деформации упругая составляющая работы деформации при вдавливании в α - и β - фазах растет, но изменения $\eta_{ГТ}$ в α - фазах более заметно. При этом следует отметить, что минимальная упругая составляющая работы деформации $\eta_{ГТ}$ совершается при 80% степени предварительной деформации для α - и β - фаз. Следовательно, материал менее эластичный для обеих фаз при наименьшей степени деформации.

Заключение

Фазовый состав титанового сплава изменяется под влиянием высокотемпературной деформации: с увеличением степени деформации процентное содержание α - фазы возрастает, а β - фазы снижается.

Исследование влияния высокотемпературной деформации на свойства фаз титанового сплава 3М показало следующее:

1) α - фаза более твердая, чем β - фаза. Твёрдость самая высокая для α - фазы при степени деформации 86%, для β - фазы – 83%, а низкая твёрдость при степени деформации 80% для обеих фаз. В целом, твердость сплава с увеличением степени деформации улучшается.

2) α - фаза менее пластичная, чем β - фаза. Максимальная работа пластической деформации совершается при 80% степени деформации для α - и β - фаз, а минимальная при 86% для α - фазы и 83% для β - фазы.

3) α - фаза более эластичная, чем β - фаза. Минимальная упругая составляющая работы деформации η_{IT} совершается при 80% степени предварительной деформации для α - и β - фаз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Сенкевич К.С. Перспективы получения и применения гибридных конструкций и композитов из титановых сплавов и нитинолаобзор // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2017. № 4. С. 71–78.

[2] Мухаметрахимов М.Х. Применение наноструктурных материалов из титанового сплава вт6 в условиях низкотемпературной сверхпластичности // Сб. Кайбышевские чтения. Сборник докладов I межвузовской молодежной научной школы-конференции. 2018. С. 109–114.

[3] Федулов В.Н. Режимы упрочнения высокопрочного ($\alpha + \beta$)-титанового сплава вт23 для применения в авиационной технике // Литье и металлургия. 2018. № 3 (92). С. 141–147.

[4] Илларионова А.А. Титан и его применение в строительных и архитектурных сооружениях // В сборнике: Уральская школа молодых металлургов. материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов - молодых ученых. Из-во: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. С. 306–309.

[5] Niinomi Mitsuo, Kazuo Kagami. Recent topics of titanium research and development in Japan. «Ti-2015. Science and technology». Proceedings of the 13th World conference on titanium. San Diego. USA // The Minerals, Metals and Materials Society. 4 (2016) 27–40.

[6] Li J., Zhou J., Feng A., Huang S., Meng X., Sun Y., Sun Y., Tian X., Huang Y. Investigation on mechanical properties and microstructural evolution of TC6 titanium alloy subjected to laser peening at cryogenic temperature. Materials Science & Engineering A, (734) (2018) 291–298.

[7] Zhou L.C., Li Y.H., He W.F., He G.Y., Nie X.F., Chen D.L., Lai Z.L., An Z.B. Deforming TC6 titanium alloys at ultrahigh strain rates during multiple laser shock peening, Materials Science & Engineering A, (578) (2013) 181–186.

[8] Shi R., Nie Z.H., Fan Q.B., Wang F.C., Zhou Y., Liu X. Correlation between dislocation-density-based strain hardening and microstructural evolution in dual phase TC6 titanium alloy, Materials Science & Engineering A. 715 (2018) 101–107.

[9] Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Применение высокочастотных установок при формировании структурно-механических свойств сортового проката // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Т. 15. № 11. С. 509–514.

[10] Калетина Ю.В., Грешнова Е.Д., Калетин А.Ю., Пилюгин В.П. Влияние деформации на структуру и свойства сплава Гейслера Ni47Mn42In11 // ВЕСТНИК ПНИПУ 2018 Т. 20, № 2. С. 5–11.

[11] Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Влияние кручения на степень сдвиговой деформации при различных способах волочения круглой проволоки // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2018. № 25. С. 52–58.

[12] Тмаркин М.А., Шведова А.С., Тищенко Э.Э. Методика проектирования технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования // Вестник машиностроения. 2018. № 4. С. 78–83.

- [13] Панин П.В., Дзунович Д.А., Лукина Е.А. Расчет эталонных интегральных интенсивностей рентгеновской дифракции для α - и β -фаз в титановых сплавах // Труды ВИАМ. 2017. № 12 (60). С. 4.
- [14] Чаусов Н.Г., Марущак П.О., Пилипенко А.П., Маркашова Л.И. Влияние ударно-колебательно-го нагружения на механические свойства $\alpha + \beta$ титановых сплавов // Механика машин, механизмов и материалов. 2017. № 3 (40). С. 96–101.
- [15] Ночовная Н.А., Ширяев А.А. Влияние режимов термической обработки на механические свойства и структуру экспериментальной композиции высокопрочного псевдо- β -титанового сплава // Труды ВИАМ. 2018. № 6 (66). С. 22–29.
- [16] Ляхов А.В., Гадалов В.Н., Макарова И.А., Ельников Е.А., Ерохин Р.Ю., Гвоздев А.Е., Кутепов С.Н., Пантюхин О.В. Исследование влияния термоциклической обработки на спеченные псевдо- α -титановые сплавы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 4. С. 219–227.
- [17] Макаров А.В., Скорынина П.А., Волкова Е.Г., Осинцева А.Л. Влияние нагрева на структуру, фазовый состав и микромеханические свойства метастабильной аустенитной стали, упрочненной наноструктурирующей фрикционной обработкой // Физика металлов и материаловедение. 2018. Т. 119. № 12. С. 1257–1264.
- [18] Яременко О.Б., Куранов А.Е., Васильцов С.Ю. Инструментальное индентирование как неразрушающий метод оценки механических характеристик конструкционных материалов // Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ – 2020): Сборник трудов V Международной научно-технической конференции в дистанционном формате. 2020. С. 274–278.
- [19] Скотникова М.А., Попов А.А., Иванова Г.В., Цветкова Г.В. Исследование свойств поверхностей сплавов с помощью инструментального индентирования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 5. С. 460–466.
- [20] Попов А.А. Повышение износостойкости инструмента при механической обработке трудно-обрабатываемых заготовок: научный доклад. <http://elib.spbstu.ru>. 2020. 25 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СТРЕЛЬНИКОВА Ангелина Анатольевна – *ведущий инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: strelnikova.angelina@bk.ru

СКОТНИКОВА Маргарита Александровна – *профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*
E-mail: skotnikova@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 02.06.2021

REFERENCES

- [1] K.S. Senkevich, Perspektivy polucheniya i primeneniya gibridnykh konstruksiy i kompozitov iz titanovykh spлавov i nitinolaobzor // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnyye pokrytiya. 2017. № 4. S. 71–78.
- [2] M.Kh. Mukhametrakhimov, Primeneniye nanostrukturnykh materialov iz titanovogo splava vt6 v usloviyakh nizkotemperaturnoy sverkhplastichnosti // Sb. Kaybyshevskiye chteniya. Sbornik dokladov I mezhvuzovskoy molodezhnoy nauchnoy shkoly-konferentsii. 2018. S. 109–114.

[3] **V.N. Fedulov**, Rezhimy uprochneniya vysokoprochnogo ($\alpha + \beta$)-titanovogo splava vt23 dlya primeneniya v aviatsionnoy tekhnike // *Litye i metallurgiya*. 2018. № 3 (92). S. 141–147.

[4] **A.A. Illarionova**, Titan i yego primeneniye v stroitelnykh i arkhitekturnykh sooruzheniyakh // V sbornike: *Uralskaya shkola molodykh metallovedov. materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy Ural'skoy shkoly-seminara metallovedov – molodykh uchenykh*. Iz-vo: Uralskiy federalnyy universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. Yeltsina, 2017. S. 306–309.

[5] **Niinomi Mitsuo, Kazuo Kagami**, Recent topics of titanium research and development in Japan. «Ti-2015. Science and technology». Proceedings of the 13th World conference on titanium. San Diego. USA // *The Minerals, Metals and Materials Society*. 4 (2016) 27–40.

[6] **J. Li, J.Zhou, A. Feng, S. Huang, X. Meng, Y. Sun, Y. Sun, X. Tian, Y. Huang**, Investigation on mechanical properties and microstructural evolution of TC6 titanium alloy subjected to laser peening at cryogenic temperature. *Materials Science & Engineering A*, (734) (2018) 291–298.

[7] **L.C. Zhou, Y.H. Li, W.F. He, G.Y. He, X.F. Nie, D.L. Chen, Z.L. Lai, Z.B. An**, Deforming TC6 titanium alloys at ultrahigh strain rates during multiple laser shock peening, *Materials Science & Engineering A*, (578) (2013) 181–186.

[8] **R. Shi, Z.H. Nie, Q.B. Fan, F.C. Wang, Y. Zhou, X. Liu**, Correlation between dislocation-density-based strain hardening and microstructural evolution in dual phase TC6 titanium alloy, *Materials Science & Engineering A*. 715 (2018) 101–107.

[9] **A.A. Filippov, G.V. Pachurin**, Primeneniye vysokochastotnykh ustanovok pri formirovaniy strukturno-mekhanicheskikh svoystv sortovogo prokata // *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyeni*. 2017. T. 15. № 11. S. 509–514.

[10] **Yu.V. Kaletina, Ye.D. Greshnova, A.Yu. Kaletin, V.P. Pilyugin**, Vliyaniye deformatsii na strukturu i svoystva splava Geyslera Ni47Mn42In11 // *VESTNIK PNIPU* 2018 T. 20, № 2. S. 5–11.

[11] **V.A. Kharitonov, M.Yu. Usanov**, Vliyaniye krucheniya na stepen sdvigovoy deformatsii pri razlichnykh sposobakh volocheniya krugloy provoloki // *Modelirovaniye i razvitiye protsessov OMD*. 2018. № 25. S. 52–58.

[12] **M.A. Tamarkin, A.S. Shvedova, E.E. Tishchenko**, Metodika proyektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov obrabotki detaley dinamicheskimi metodami poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya // *Vestnik mashinostroyeniya*. 2018. № 4. S. 78–83.

[13] **P.V. Panin, D.A. Dzunovich, Ye.A. Lukina**, Raschet etalonnnykh integralnykh intensivnostey rentgenovskoy difraktsii dlya α - i β -faz v titanovykh splavakh // *Trudy VIAM*. 2017. № 12 (60). S. 4.

[14] **N.G. Chausov, P.O. Marushchak, A.P. Pilipenko, L.I. Markashova**, Vliyaniye udarno-kolebatelnogo nagruzheniya na mekhanicheskiye svoystva $\alpha + \beta$ titanovykh splavov // *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2017. № 3 (40). S. 96–101.

[15] **N.A. Nochovnaya, A.A. Shirayev**, Vliyaniye rezhimov termicheskoy obrabotki na mekhanicheskiye svoystva i strukturu eksperimentalnoy kompozitsii vysokoprochnogo psevdob-titanovogo splava // *Trudy VIAM*. 2018. № 6 (66). S. 22–29.

[16] **A.V. Lyakhov, V.N. Gadalov, I.A. Makarova, Ye.A. Yelnikov, R.Yu. Yerokhin, A.Ye. Gvozdev, S.N. Kutepov, O.V. Pantyukhin**, Issledovaniye vliyaniya termotsiklicheskoj obrabotki na spechennyye psevdob-titanovyye splavy // *Izvestiya Tuls'kogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2018. № 4. S. 219–227.

[17] **A.V. Makarov, P.A. Skorynina, Ye.G. Volkova, A.L. Osintseva**, Vliyaniye nagreva na strukturu, fazovyy sostav i mikromekhanicheskiye svoystva metastabilnoy austenitnoy stali, uprochnennoy nanostrukturiruyushchey friksionnoy obrabotkoy // *Fizika metallov i metallovedeniye*. 2018. T. 119. № 12. S. 1257–1264.

[18] **O.B. Yaremenko, A.Ye. Kuranov, S.Yu. Vasil'tsov**, Instrumentalnoye indentirovaniye kak nerazrushayushchiy metod otsenki mekhanicheskikh kharakteristik konstruksionnykh materialov // *Zhivuchest i konstruksionnoye materialovedeniye (ZhivKoM – 2020): Sbornik trudov V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii v distantsionnom formate*. 2020. S. 274–278.

[19] **M.A. Skotnikova, A.A. Popov, G.V. Ivanova, G.V. Tsvetkova**, Issledovaniye svoystv poverkhnosti splavov s pomoshchyu instrumentalnogo indentirovaniya // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye. 2020. T. 63. № 5. S. 460–466.

[20] **A.A. Popov**, Povysheniye iznosostoykosti instrumenta pri mekhanicheskoy obrabotke trudnoobrabatyvayemykh zagotovok: nauchnyy doklad. <http://elib.spbstu.ru>. 2020. 25 s.

THE AUTHORS

STRELNIKOVA Angelina A. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: strelnikova.angelina@bk.ru

SKOTNIKOVA Margarita A. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: skotnikova@mail.ru

Received: 02.06.2021

Научное издание

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА

Том 27, № 3, 2021

Учредитель — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охраны культурного наследия
(свидетельство о регистрации СМИ ЭЛ № ФС 77-78004 от 27.03.2020 г.)

Ответственный секретарь — *О.А. Матенев*

Компьютерная верстка *А.А. Кононовой*

Телефон редакции (812) 294-22-86

E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Подписано в печать 30.09.2021.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ "МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА"

(ранее «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки»)

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Материаловедение. Энергетика» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием: зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (Свидетельство о регистрации СМИ от 27.03.2020 г. ЭЛ № ФС 77-78004);

имеет международный стандартный номер сериального периодического издания (ISSN 2687-1300);

внесен Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки РФ в Перечень периодических научных и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук и кандидата наук;

с 2005 г. входит в национальную информационно-аналитическую систему «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)»;

сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН и включены в фонд научно-технической литературы (НТЛ) ВИНТИ РАН, в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка», в международную библиографическую и реферативную базу данных ProQuest, международную наукометрическую базу Index Copernicus, Google Scholar, международную систему по периодическим изданиям «Ulrich's Periodicals Directory», представлены на платформе Web of Science в виде отдельной базы данных Russian Science Citation Index (RSCI), EBSCO, CNKI, ROAD.

Журнал публикует результаты работ в следующих областях науки и техники: энергетика, электротехника, материаловедение, металлургия.

Редакция журнала соблюдает права интеллектуальной собственности и со всеми авторами научных статей заключает издательский лицензионный договор.

Публикация материалов, в том числе соискателей ученых степеней, осуществляется бесплатно.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Представление материалов

В статье должны быть кратко изложены новые и оригинальные результаты исследований, полученные авторами; следует избегать повторов, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

При написании оригинальной научной статьи и оформлении рукописи авторы должны придерживаться следующих правил.

Статья должна представлять собой описание выполненных исследований с указанием их места в соответствующей области наук и обсуждением значения выполненной работы. Рукопись должна содержать достаточное количество информации и ссылок на общедоступные источники для того, чтобы работа могла быть повторена независимо от авторов.

Название статьи должно быть кратким, но информативным. Обращаем внимание на то, что журнал издается как на русском, так и на английском языке. В связи с этим не следует использовать аббревиатуру в названии статьи.

Аннотация должна давать читателю сжатую информацию о содержании статьи, быть информативной и отражать не только основные цели статьи, но и главные результаты и выводы работы. Аннотация не является частью текста и сама по себе должна быть законченным описанием.

Ключевые слова должны отражать основную проблематику статьи; они приводятся на русском языке для русской и на английском для англоязычной версии статьи. Количество ключевых слов – не менее трех и не более семи.

Адрес для корреспонденции должен содержать фамилию автора для корреспонденции (не обязательно первого автора), его полный почтовый адрес, телефон, факс, e-mail.

При необходимости Редакция может потребовать представления Акта экспертизы.

Представление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ по адресу: <http://journals.spbstu.ru>

Статьи подаются в формате .docx (MS Word 2007–2010). Файл статьи, подаваемый через электронную редакцию, должен содержать только сам текст, без названия, списка литературы, фамилий и данных авторов. Список литературы, название статьи, вся информация об авторах задаются при подаче через электронную редакцию в отдельных полях. В тексте статьи должны быть ссылки на все источники из списка литературы. Порядковый номер источника в тексте статьи указывается в квадратных скобках.

2.2. Оформление материалов

2.2.1. Объем статей, как правило, 15–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий (в том числе цветных) не должно превышать 4, таблиц – 3.

2.2.2. Число авторов – не более трех от одной организации и не более пяти от разных организаций. Статья должна быть подписана всеми авторами. Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.2.3. Статья должна содержать следующие разделы:

номер УДК в соответствии с классификатором;

фамилии авторов на русском и английском языках;

название на русском и английском языках;

аннотации – не менее 100 слов на русском и английском языках;

ключевые слова – не менее 3 и не более 7 на русском и английском языках;

введение (актуальность, краткое обоснование существующей проблемы) – 1,0–1,5 стр.;

цель работы (краткая четкая формулировка поставленной задачи);

методика проведения исследований и расчетов, включая краткую информацию об использованных приборах, методах и точности экспериментальных измерений и теоретических расчетов и т. д.