

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (2.4.2)

УДК 551.583

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-6-26-32

## Влияние повышения температуры наружного воздуха на работу силовых трансформаторов

Ю.В. Жилкина, Д.А. Воденников

Погодные условия влияют практически на все отрасли народного хозяйства. В электроэнергетике спрос на энергию возрастает в осенне-зимний период, когда увеличивается потребность в обогреве. Однако в последние десятилетия реалии изменения климата и влияния данного процесса на электроэнергетику превратились из теоретического вопроса в один из важнейших факторов. Проблемы влияния повышения температуры наружного воздуха на эксплуатационные и инфраструктурные характеристики электроэнергетики явно указывают на необходимость корректировки диапазона нагрузок в условиях изменения температуры окружающей среды. Выявлено прямое вредное взаимодействие между адаптацией человека и уязвимостью инфраструктуры из-за более жаркого климата. Цель статьи — исследование влияния повышения температуры на энергетическую инфраструктуру, в частности, на силовые трансформаторы.

*Ключевые слова:* распределительный и силовой трансформаторы, распределение электроэнергии, мощность, нагрузка, изменение климата, глобальное потепление.

*Для цитирования:* Жилкина Ю.В., Воденников Д.А. Влияние повышения температуры наружного воздуха на работу силовых трансформаторов // Вестник МЭИ. 2023. № 6. С. 26—32. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-6-26-32.

## The Influence of Outdoor Air Temperature Growth on the Operation of Power Transformers

Yu.V. Zhilkina, D.A. Vodennikov

Weather conditions have an effect on almost all branches of the national economy. In the electric power industry, the demand for energy increases during the fall-and-winter period, when there is an increased need for heating. However, in recent decades, the matters of climate change and the impact of this process on the electric power industry has transformed from a theoretical problem into one of the most important factors. The problems stemming from the influence of an increase in the outdoor air temperature on the electric power industry performance and infrastructural characteristics indicate quite clearly the extent to which their load has to be changed under the conditions of changing the environment temperature. A direct harmful interaction between human adaptation and infrastructure vulnerability due to a climate change has been revealed. The aim of the article is to study how the increase of temperature affects the energy infrastructure, in particular, power transformers.

*Key words:* distribution and power transformers, electricity distribution, power, load, climate change, global warming.

*For citation:* Zhilkina Yu.V., Vodennikov D.A. The Influence of Outdoor Air Temperature Growth on the Operation of Power Transformers. Bulletin of MPEI. 2023;6:26—32. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-6-26-32.

### Введение

Наблюдаемое изменение климата подвергает риску людей, общество, экономику и экосистемы. На протяжении последних десятилетий потери от бедствий, связанных с погодой, значительно выросли на глобальном и региональных уровнях. Наряду с транспортом,

строительной отраслью и сельским хозяйством одной из наиболее уязвимых отраслей экономики является энергетика.

По прогнозам глобальное потепление продолжится в течение следующих десятилетий из-за беспрецедентного увеличения выбросов парниковых газов.

В качестве следствия глобального потепления также учащаются экстремальные погодные условия. Изменение климата повлияет на эксплуатационные и инфраструктурные характеристики электроэнергетических систем с точки зрения долгосрочных климатических условий и краткосрочных неблагоприятных погодных явлений.

В рамках 49-й сессии СИГРЭ, состоявшейся очно в августе 2022 г. в Париже, Исследовательский комитет А2 «Силовые трансформаторы и реакторы» обсуждал тематику закупки силовых трансформаторов и дальнейшее развитие сети — данные процессы идут параллельно друг другу уже более века, причем установка одного или нескольких трансформаторов тесно связана с электрификацией района. Цифровые технологии меняют образ жизни, промышленные ландшафты, правила и многое другое, тем не менее, некоторые вопросы остаются неизменными для производителей, пользователей и всех специалистов в отрасли силовых трансформаторов. Для производителей это означает, что они смогут предложить клиенту устройство, отвечающее всем возникшим потребностям, для решения важных технических проблем в некоторых случаях.

В течение нескольких десятилетий жизненный цикл закупки силовых трансформаторов следует четко установленной схеме: тендер, закупка, экспертиза проекта, испытания, монтаж, эксплуатация. Такая закономерность наблюдается и на уровне подкомпонентов (и они не менее важны при оценке качества готовой продукции), из которых, в конечном итоге, состоят трансформаторы.

Тем не менее, несмотря на кажущееся постоянство обсуждаемых тем, регулярно возникают новые, рождающиеся под влиянием внешних факторов, вопросы от пользователей, производителей. Поскольку широкая общественность больше не готова безоговорочно мириться с установкой силовых трансформаторов, негативно влияющих на окружающую среду, необходимо найти соответствующие решения для устранения такой проблемы, как, например, шум. Пандемия COVID-19 замедлила проведение испытаний или инспекций на объектах. Следует ожидать, что текущий климатический кризис прямо или косвенно скажется на трансформаторной промышленности в ближайшем будущем.

### Материалы и методы

При анализе данных и выводе аналитических зависимостей для прогнозируемой будущей температуры окружающей среды использованы расчеты температуры наиболее нагретой точки, выполненные с помощью руководства МЭК.

Согласно отчету Всемирной метеорологической организации, 2020 г. стал одним из самых жарких за всю историю наблюдений. По мере того, как жаркие дни становятся более частыми, все больше людей устанавли-

вают кондиционеры для своего комфорта. Системам охлаждения требуется электричество, что еще больше увеличивает выбросы парниковых газов, которые и вызывают глобальное потепление. Кроме того, рост числа кондиционеров ведет к увеличению спроса на электроэнергию, в то время как тепло снижает выработку электростанций, потенциально создавая нагрузку на электросеть. Получается замкнутый круг.

С учетом представленных проблем необходимо оценить эффективность существующих энергетических систем в будущих климатических сценариях и выявить меры по смягчению последствий изменения климата. В настоящей работе исследовано влияние изменения климата на работу трансформаторов, а также уточнено, на сколько следует скорректировать их нагрузку в условиях изменения температуры окружающей среды на 2050 г.

Силовые трансформаторы — надежные электромагнитные устройства, применяемые в энергоблоках, передающих и распределительных сетях для повышения или понижения напряжения в энергосистеме. Их мощность варьируется от нескольких МВА до примерно 100 МВА. Ограничения на допустимые температуры проводника и масла указываются в спецификации трансформатора, и, в свою очередь, вероятно, будут основаны на рекомендациях международного стандартного руководства по загрузке масляных силовых трансформаторов МЭК-354 [1]. Нагрузочная способность трансформатора связана с воздействием тепла на его изоляцию. Самую высокую температуру называют температурой наиболее нагретой точки. Влияние температуры наиболее нагретой точки на бумажную изоляцию обмотки используется для количественной оценки предела ее температурного диапазона за расчетный период времени. Проблема заключается в том, что эти пределы считаются динамическими из-за изменяющихся характеристик трансформатора и климатических условий окружающей среды.

### Результаты

Мониторинг трансформаторов с помощью датчиков температуры — один из самых простых и эффективных методов мониторинга состояния для управления активами в интеллектуальной распределительной сети. Показания аномальной температуры почти всегда указывают на некоторый тип повреждения изоляции в трансформаторе. По этой причине обычной практикой стало наблюдение за температурой наиболее нагретой точки основного и нижнего баков на корпусе трансформатора. Когда трансформатор начинает нагреваться, изоляция обмотки ухудшается, и значение диэлектрической проницаемости минерального масла уменьшается относительно стандартного значения. Согласно руководству МЭК, старение системы бумажной изоляции таково, что заявленный срок службы трансформатора может быть достигнут при постоянной макси-

мальной температуре наиболее нагретой точки 98 °С. Помимо данной температуры предполагается, что скорость старения удваивается при каждом увеличении на 6 °С. При температуре порядка 150 °С ускоренные испытания на старение в лаборатории показали, что срок полезного использования бумаги составит всего несколько дней. Это явно ограничивает срок службы трансформатора и является одним из определяющих факторов максимальной нагрузки, которую следует использовать [2].

Наиболее распространенная модель, используемая для расчета максимальной температуры масла, описана в МЭК-354 [1].

Исследование степени старения трансформаторов целесообразно рассматривать через старение от токов нагрузок под влиянием климатических факторов.

Влияние климатических факторов на состояние изоляции трансформатора определяется воздействием температуры и влажности окружающей среды на трансформаторное масло, являющееся охлаждающей и изолирующей средой. Однако, если свойства трансформаторного масла могут быть многократно восстановлены профилактическими мероприятиями (осушкой, очисткой и др.), то твердая изоляция необратимо стареет.

Старение проявляется в виде течения ряда химических процессов, главным образом, окисления, деструкции, при которых распадаются молекулы высокомолекулярных соединений бумажной (твердой) изоляции. Повышение температуры окружающей среды, особенно ее резкие перепады, переход значений температуры через 0 °С, как следствие, рост температуры трансформаторного масла, ускоряют протекание химических реакций, в том числе при воздействии на изоляцию продуктов, возникающих в результате частичных разрядов (например, с кислородом газовой среды или другими активными веществами).

Температурные отношения в стационарном состоянии в IEEE (стандарте Института инженеров электротехники и электроники) аналогичны рис. 1 руководства по загрузке МЭК.

Предельная температура наиболее нагретой точки для трансформатора при любой нагрузке  $K$  равна сумме температур окружающей среды, верхнего масла над окружающей средой и наиболее нагретой точки над верхним маслом:

$$\theta_n = \theta_A + \Delta\theta_{\text{то}} + \Delta\theta_n,$$

где  $\theta_A$  — температура окружающей среды, °С;  $\Delta\theta_{\text{то}}$  — температура масла в верхней части по сравнению с температурой окружающей среды;  $\Delta\theta_n$  — повышение температуры наиболее нагретой точки над температурой масла в верхней части.

Температуру масла в верхней части по сравнению с температурой окружающей среды выразим следующим образом:

$$\Delta\theta_{\text{то}} = \Delta\theta_{\text{то-R}}(1 + RK^2/1 + R)^n,$$

где  $\Delta\theta_{\text{то-R}}$  — повышение температуры масла в верхней части по сравнению с окружающей средой при номинальной нагрузке;  $R$  — отношение нагрузочных потерь при номинальном токе к потерям холостого хода;  $K$  — коэффициент нагрузки (отношение тока нагрузки к номинальному току).

Повышение температуры наиболее нагретой точки над температурой масла равно:

$$\Delta\theta_n = HgK^{2m},$$

где  $H$  — коэффициент температуры наиболее нагретой точки;  $g$  — разность температур обмотки и масла, °С;  $n, m$  — эмпирически полученные показатели, зависящие от метода охлаждения.

Использованы четыре режима охлаждения: естественная циркуляция масла и воздуха (М), естественная циркуляция масла с принудительной циркуляцией воздуха (Д), принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла (ДЦ) и принудительная циркуляция воздуха и масла с направленным потоком масла (НДЦ) (табл. 1).

Температура окружающей среды играет важную роль для определения температуры наиболее нагретой точки трансформатора, определяемой его профилем нагрузки. Температура наиболее нагретой точки линейно увеличивается за счет повышения температуры окружающей среды. По экспертной оценке при подъеме температуры на 1 °С нагрузочная способность может быть уменьшена на 1% без каких-либо потерь в эксплуатации, и наоборот. В среднем температура окружающей среды возрастает до некоторых величин каждый год из-за общего глобального потепления. Это было доказано путем мониторинга температуры окружающей среды в течение последних нескольких лет [3]. Руководство по нагрузке трансформатора МЭК рекомендует эксплуатировать трансформаторы при температуре окружающей среды в 20 °С. Однако, никак не анализируется фактическая температура наиболее нагретой точки при различных температурах окружающей среды. Выявлено, что температура окружающей среды в Центральной части России и Сибири может вырасти до 33,8 °С в период с 2025 по 2050 гг.

Таблица 1

#### Константы, используемые при расчете температуры

Вид охлаждения	Стандарты			
	МЭК		IEEE	
	$n$	$m$	$n$	$m$
М	0,9	0,8	0,8	0,8
Д	0,9	0,8	0,9	0,8
ДЦ	1,0	0,8	0,9	0,8
НДЦ	1,0			

В настоящей работе расчеты стационарного состояния температурных режимов выполнены для определения температуры наиболее нагретой точки распределительных и силовых трансформаторов при прогнозировании возможных будущих температур окружающей среды в Казани в диапазоне от 20 до 40 °С. Значение  $g$  в расчетах принято равным 23 °С. Предполагается, что значение  $H$  составляет 1,1 для распределительных трансформаторов и 1,3 — для средних и больших силовых трансформаторов. Значение  $\Delta\theta_{\text{то-}R}$  принято таким образом (57,8°С — для распределительных и 54,1°С — для силовых трансформаторов), чтобы предельная температура наиболее нагретой точки составляла 98 °С при температуре окружающей среды 20 °С. Для расчетов взяты трансформаторы 500 кВА, с нагрузочными потерями 5 кВт и 20 МВА с нагрузочными потерями 106 кВт при температуре окружающей среды 20 °С.

Потери нагрузки при номинальном токе для трансформатора 50 кВА составили 1330 Вт. Температура наиболее нагретой точки рассчитана для температуры окружающей среды 33,8°С (прогнозируемая максимальная температура в Центральной части России и Сибири в 2050 году). Температура окружающей среды повышена на 13,8°С, что увеличивает потери нагрузки на 73 Вт.

Таким образом, общие потери нагрузки оцениваются в 1403 Вт. Значение  $R$  пересчитано из-за роста потерь нагрузки. При повышенных температурах окружающей среды номинальная нагрузка трансформатора немного возрастает из-за увеличения потерь нагрузки (зависит от температуры), следовательно, присоединяемая нагрузка также растет в той же степени для условий единичного фактора нагрузки ( $K = 1$ ).

При определении фактического фактора снижения номинальной мощности трансформаторов расчетное значение (включая влияние потерь нагрузки, зависящих от температуры) делится на тот же коэффициент приращения. Температура наиболее нагретой точки для температуры окружающей среды 33,8 °С рассчитана как 115 °С. Мощность трансформаторов следует снизить до 86...87% от их максимальной мощности при температуре наиболее нагретой точки 98 °С. Значение

температуры наиболее нагретой точки примерно одинаково для разных номиналов трансформаторов. Номинальные значения трансформаторов не оказывают существенного влияния на коэффициент нагрузки, т. е. недооцененные значения коэффициентов нагрузки для распределительных трансформаторов находятся в том же диапазоне (табл. 2).

Таким образом, потери нагрузки при номинальном токе для трансформатора 16 МВА составляют 88 кВт при температуре окружающей среды 20 °С. Температура наиболее нагретой точки вычислена для температуры окружающей среды 33,8 °С (максимальная прогнозируемая температура в Центральной части России в 2050 г.).

Рост температуры окружающей среды до 13,8 °С увеличивает потери нагрузки на 4,9 кВт, поэтому общие потери нагрузки оцениваются в 92,9 кВт. Температура наиболее нагретой точки для температуры окружающей среды 33,8 °С рассчитана на уровне 115 °С, и наоборот, мощность трансформаторов следует снизить до примерно 86...87% от их номинальной мощности, чтобы поддерживать температуру наиболее нагретой точки 98 °С (согласно руководству МЭК). Значение температуры наиболее нагретой точки примерно одинаково для разных номиналов трансформаторов. Номинальные параметры трансформаторов не оказывают существенного влияния на коэффициент загрузки, то есть сниженные значения коэффициентов нагрузки для силовых трансформаторов находятся в одном и том же диапазоне. Различные значения температур в наиболее нагретых точках и коэффициенты загрузки, обусловленные изменением температуры окружающей среды, рассчитаны для распределительных и силовых трансформаторов и приведены в табл. 3, 4.

### Обсуждение

Из данных рис. 1 видно, что при увеличении температуры окружающей среды температура наиболее нагретой точки также растет. Это соотношение не совсем линейное, поскольку принято влияние сопротивления обмотки, зависящее от температуры.

Номинальные потери нагрузки зависят от температуры окружающей среды, что учитывалось при рас-

Таблица 2

### Расчет температуры наиболее нагретой точки при экстремальной температуре (33,8 °С) для распределительных трансформаторов

Номинальная мощность, кВА	Уровни напряжения, кВ/кВ	Система охлаждения	Потери, не зависящие от нагрузки, Вт	Потери нагрузки при номинальном токе, Вт	$R$	$\Delta\theta_{\text{то}}$	$\Delta\theta_{\text{н}}$	$\Delta\theta_{\text{н}}$ (для $K = 1$ )	$K$ (для $\Delta\theta_{\text{н}} = 98^\circ$ )
50	20/0,4	М	150	1403	9,3	60,4	21,3	115,5	0,868
100	20/0,4	М	245	1973	8,0	60,3	21,3	115,5	0,867
200	20/0,4	М	465	2743	5,9	60,2	21,3	115,4	0,864
500	20/0,4	М	930	5276	5,7	60,2	21,3	115,4	0,863
1000	20/0,4	М	1500	8864	5,9	60,2	21,3	115,4	0,864

Таблица 3

Расчет температуры наиболее нагретой точки при экстремальной температуре (33,8 °С) для силовых трансформаторов

Сердечник	Номинальная мощность, МВА	Система охлаждения	Потери, не зависящие от нагрузки, Вт	Нагрузочные потери при номинальном токе, Вт	$R$	$\Delta\theta_{то}$	$\Delta\theta_{н}$	$\Delta\theta_{н}$ (для $K=1$ )	$K$ (для $\Delta\theta_{н}=98^{\circ}$ )
Алюминий	16	М	16,1	92,9	5,8	56,4	25,2	115,4	0,865
Медь	20	М	16,8	111,8	6,6	56,4	25,2	115,5	0,867
Медь	31,5	М/Д	24,5	143,5	5,8	56,4	25,2	115,4	0,865
Алюминий	40	М/Д	33,5	187,8	5,6	56,4	25,2	115,4	0,865

Таблица 4

Значения температуры наиболее нагретой точки и коэффициента загрузки при различных температурах окружающей среды для распределительных и силовых трансформаторов

$\theta_{ср}$	Распределительный трансформатор		Силовой трансформатор	
	$\theta_{н}$ (для $K=1$ )	$K$ (для $\theta_{н}=98^{\circ}$ )	$\theta_{н}$ (для $K=1$ )	$K$ (для $\theta_{н}=98^{\circ}$ )
20	98,0	1,000	98,00	1,000
22	100,5	0,981	100,5	0,980
24	103,1	0,961	103,1	0,962
26	105,6	0,94	105,6	0,942
28	108,1	0,921	108,1	0,923
30	110,6	0,901	110,7	0,904
32	113,1	0,881	113,2	0,884
34	115,6	0,861	115,7	0,865
36	118,2	0,841	118,2	0,845
38	120,7	0,821	120,8	0,824
40	123,2	0,800	123,3	0,805



Рис. 1. Зависимость температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформаторов от температуры окружающей среды

четах. Влияние температуры окружающей среды на номинальные характеристики трансформаторов (коэффициент загрузки) представлено на рис. 2, который иллюстрирует тот факт, что нагрузка трансформаторов должна быть снижена во избежание чрезмерного старения и потери ресурса [4, 5].

Таким образом, предполагается, что номинальную мощность силовых трансформаторов следует снижать в зависимости от температуры окружающей среды в большей степени, чем распределительных трансформаторов (см. рис. 1, где график температуры в наиболее нагретых точках силовых трансформаторов расположен несколько выше, чем у распределительных трансформаторов). Однако этот факт не показан на рис. 2 из-за различных значений  $R$  для распределительных и силовых трансформаторов, задействованных в расчетах). Более того, были взяты одинаковые значения  $m$  и  $n$  для распределительных и силовых трансформаторов, но данные значения должны отличаться при более детальном анализе. Например, учитывая режим охлаждения НДЦ для силовых трансформаторов ( $n = 1, m = 1$ ) при одной и той же температуре окружающей среды, температура в наиболее нагретой точке будет выше, чем в распределительном трансформаторе, тогда как она будет понижена в меньшей степени, чем в обмотке распределительного трансформатора. Разница температур наиболее нагретых точек и номинальных нагрузок распределительных и силовых трансформаторов при экстремальных температурах (40 °С) на рис. 1 и 2 составляет всего 0,08 и 0,6% соответственно и может увеличиться при изменении режима охлаждения для силовых трансформаторов [6 — 8].

Расчеты температуры наиболее нагретой точки для прогнозируемой будущей температуры окружающей среды выполнены с использованием руководства МЭК. Температура наиболее нагретой точки растет почти линейно за счет повышения температуры окружающей среды. И наоборот, трансформаторы следует меньше нагружать по сравнению с их заданными значениями нагрузки (предоставленными производителями).

Температура в наиболее нагретых точках распределительных и силовых трансформаторов может вырасти до 115 °С в Центральной части России и Сибири (при повышении температуры окружающей среды до 33,8 °С), поэтому нагрузка трансформаторов должна постепенно снижаться до 86...87% от их фактических значений без износа. Если температура в наиболее нагретых точках достигнет 115 °С, относительный срок службы трансформаторов уменьшится в 8 раз при непрерывной работе. Для предотвращения преждевременного старения трансформаторов их следует эксплуатировать не на полную мощность в условиях окружающей среды, представленных выше [9, 10].

### Выводы

Анализ влияния изменения климата на работу трансформаторов показал, что различные системы изоляции, обозначенные в стандартах IEC и IEEE для применения в условиях изменения климата, позволяют конструкторам создавать режимные решения для трансформаторов в целях улучшения отказоустойчивости сетей.

По авторской оценке, данное исследование будет полезно:

- для электроэнергетических компаний с целью пересмотра допустимых нагрузок имеющегося парка трансформаторов, а также безопасного и надежного распределения электроэнергии среди потребителей;
- при анализе того, как долго могут быть отложены новые установки распределения и силовых трансформаторов;
- с целью надежного управления активами в сложной будущей среде интеллектуальных сетей.

Следует учитывать, что природа развития дефектов может быть не только электромагнитной, механической и эксплуатационной, но и климатической. Если мы лучше изучим влияние климата на электрооборудование, то, возможно, удастся предотвратить многие неисправности трансформаторного парка.

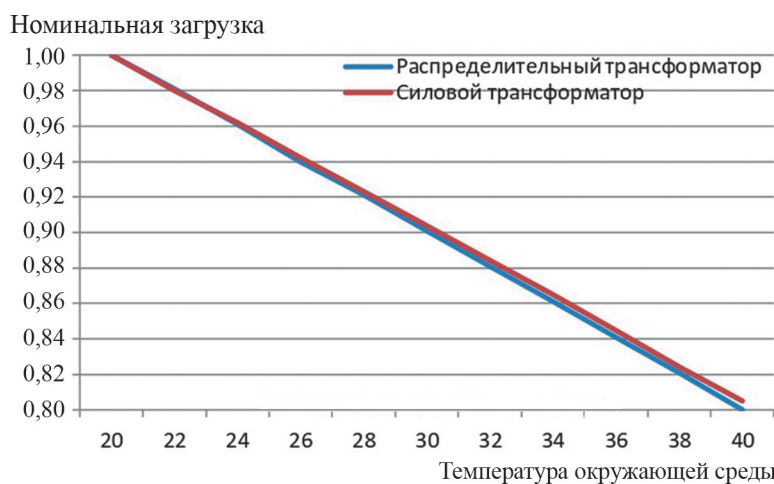


Рис. 2. Зависимость коэффициента номинальной нагрузки трансформаторов от температуры окружающей среды

## Литература

1. ГОСТ 14209—97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов.
2. IEEE 57.91—1995. Руководство IEEE по загрузке трансформаторов с масляным погружением.
3. Саймонсон Э. Номинальная мощность и срок службы трансформаторов: Коллоквиум IEEE по управлению сроком эксплуатации трансформаторов. Лондон, 1998.
4. Воденников Д.А., Жилкина Ю.В. Исследовательский комитет ВЗ «Подстанции и электроустановки» // Энергетика за рубежом. Приложение к журналу «Энергетик». 2022. № 1—2. С. 89—96.
5. Summary Report 2022 SC A2 [Электрон. ресурс] <https://enb.iisd.org/convention-wetlands-ramsar-cop14-summary> (дата обращения 20.11.2022).
6. Саетгараев М.Р., Ахметшин А.Р. Повышение качества электроэнергии с помощью симметрирующих трансформаторов в РЭС 0,4—10 кВ // Теплоэнергетика. Энергия — 2017: Материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Иваново: Изд-во Ивановского гос. энергетического университета им. В.И. Ленина, 2017.
7. Жилкина Ю.В. Влияние климатических рисков на электроэнергетику // Труды Крыловского научного центра. 2022. № 4(402). С. 157—160.
8. Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Чернова Н.В. Определение параметров симметрирующих трансформаторов // Промышленная энергетика. 2015. № 1. С. 54—59.
9. Павлов Н.И. Инновации в силовых трансформаторах // Студенческий: электрон. научн. журнал. 2021. № 35(163) [Электрон. ресурс] <https://sibac.info/journal/student/163/228278> (дата обращения 30.10.2023).
10. Баженов Н.Г., Филина О.А., Озерова Е.Ю. Влияние характеристик трансформатора на качество автоматического регулирования в системах электропитания // Вестник МЭИ. 2019. № 5. С. 62—67.

## References

1. GOST 14209—97. Rukovodstvo po Nagruzke Silovykh Maslyanykh Transformatorov. (in Russian).
2. IEEE 57.91—1995. Rukovodstvo IEEE po Zagruzke Transformatorov s Maslyanym Pogruzheniem. (in Russian).
3. Saymonson E. Nominal'naya Moshchnost' i Srok Sluzhby Transformatorov: Kollokvium IEEE po Upravleniyu Srokom Ekspluatatsii Transformatorov. London, 1998. (in Russian).
4. Vodennikov D.A., Zhilkina Yu.V. Issledovatel'skiy Komitet V3 «Podstantsii i Elektroustanovki». Energetika za Rubezhom. Prilozhenie k Zhurnalu «Energetik». 2022;1—2:89—96. (in Russian).
5. Summary Report 2022 SC A2 [Elektron. Resurs] <https://enb.iisd.org/convention-wetlands-ramsar-cop14-summary> (Data Obrashcheniya 20.11.2022).
6. Saetgaraev M.R., Akhmetshin A.R. Povyshe-nie Kachestva Elektroenergii s Pomoshch'yu Simmetri-ruyushchikh Transformatorov v RES 0,4—10 kV. Teplo-energetika. Energiya — 2017: Materialy XII Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. Studentov, Aspirantov i Molodykh Uchenykh. Ivanovo: Izd-vo Ivanovskogo Gos. Energeti-cheskogo Un-ta im. V.I. Lenina, 2017. (in Russian).
7. Zhilkina Yu.V. Vliyanie Klimaticheskikh Riskov na Elektroenergetiku. Trudy Krylovskogo Nauchnogo Tsentra. 2022;4(402):157—160. (in Russian).
8. Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Chernova N.V. Opredelenie Parametrov Simmetriruyushchikh Trans-formatorov. Promyshlennaya Energetika. 2015;1:54—59. (in Russian).
9. Pavlov N.I. Innovatsii v Silovykh Transformatorakh. Studencheskiy: Elektron. Nauchn. Zhurnal. 2021. № 35(163) [Elektron. Resurs] <https://sibac.info/journal/student/163/228278> (Data Obrashcheniya 30.10.2023). (in Russian).
10. Bazhenov N.G., Filina O.A., Ozerova E.Yu. Vliyanie Kharakteristik Transformatora na Kachestvo Avtomaticheskogo Regulirovaniya v Sistemakh Elektro-snabzheniya. Vestnik MEI. 2019;5:62—67. (in Russian).

## Сведения об авторах:

Жилкина Юлия Викторовна — кандидат экономических наук, ПАО «Россети», e-mail: ZhilkinaYV@mes-centra.ru  
 Воденников Дмитрий Александрович — директор филиала «Московские кабельные сети»

## Information about authors:

Zhilkina Yuliya V. — Ph.D. (Economic), PJSC «Rosseti», e-mail: ZhilkinaYV@mes-centra.ru  
 Vodennikov Dmitriy A. — Director of the Moscow Cable Networks Branch

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 26.12.2022

The article received to the editor: 26.12.2022

Статья принята к публикации: 05.09.2023

The article has been accepted for publication: 05.09.2023