

Моделирование тепловых процессов в силовых трансформаторах трёхфазной тяговой сети

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2b}, Б.А. Аржанников^{3c}, И.А. Фесак^{4d}

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

³ Уральский государственный университет путей сообщения, ул. Колмогорова, 66, Екатеринбург, Россия

⁴ Западно-Сибирская дирекция по энергообеспечению – структурное подразделение Трансэнерго, филиала ОАО РЖД, ул. Октябрьская, 2/1, Новосибирск, Россия

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c em@nppem.ru, ^d fesakilya@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-0937-1030>,

^d <https://orcid.org/0009-0000-3993-3818>

Статья поступила 12.01.2026, принята 16.01.2026.

Правильная оценка нагрузочной способности силовых трансформаторов имеет большое значение для безопасной и стабильной работы электроэнергетической системы (ЭЭС). Основным параметром, определяющим нагрузочную способность, является температура наиболее нагретой точки (ННТ) трансформатора. Для корректного расчёта ННТ требуется выполнение моделирования тепловых процессов. В статье представлены результаты исследований, направленных на изучение и моделирование тепловых процессов в силовых трансформаторах трёхфазной тяговой сети. Для сравнения выполнено моделирование однофазной системы тягового электроснабжения (СТЭ) 25 кВ типовой конструкции. В связи с быстрыми вариациями тяговой нагрузки, диапазоны изменения которой сопоставимы с постоянной времени нагрева обмотки, при расчётах необходимо учитывать тепловые инерции масла и обмотки. В двухобмоточном трансформаторе первичная и вторичная обмотки должны нагреваться примерно одинаково, в трёхобмоточном в наиболее нагруженном режиме находится первичная обмотка. Поэтому при определении тепловых режимов необходимо контролировать её токи. При расчётах и моделировании использовался программный продукт Fazonord AC-DC. Предложенная методика моделирования является универсальной и позволяет определять нагревы тяговых трансформаторов и износ изоляции для трёхфазных СТЭ любой сложности. Отличительными особенностями методики являются: определение тяговых нагрузок на основе моделирования движения поездов по участкам железной дороги с реальными планами и профилями пути; корректный учёт высоковольтной сети питающей ЭЭС. По результатам компьютерного моделирования можно отметить следующие преимущества трёхфазной СТЭ: отсутствие асимметрии токов тяговых трансформаторов; меньшие температуры наиболее нагретых точек тяговых трансформаторов; пониженный уровень потерь в тяговых трансформаторах; менее интенсивный тепловой износ изоляции.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения; тяговый трансформатор, наиболее нагретая точка, тепловые процессы; моделирование.

Modeling of thermal processes in power transformers of a three-phase traction network

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2b}, B.A. Arzhannikov^{3c}, I.A. Fesak^{4d}

¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

³ Ural State Transport University; 66, Kolmogorov St., Ekaterinburg, Russia

⁴ West Siberian Directorate for Energy Supply – a structural division of Transenergo, Branch of Russian Railways JSC; 2/1, Oktyabrskaya St., Novosibirsk, Russia

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c em@nppem.ru, ^d fesakilya@yandex.ru,

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-0937-1030>,

^d <https://orcid.org/0009-0000-3993-3818>

Received 12.01.2026, accepted 16.01.2026

Correctly assessing the load-carrying capacity of power transformers is essential for the safe and stable operation of the electric power system (EPS). The main parameter determining the load-carrying capacity is the transformer's hotspot temperature (HT). Correctly calculating the HT requires thermal process modeling. This article presents the results of research aimed at studying and modeling thermal processes in power transformers in a three-phase traction network. For comparison, a single-phase 25 kV traction power supply (TPS) system of a typical design is simulated. Due to rapid variations in traction load, the ranges of which are comparable to the winding heating time constant, the thermal inertia of the oil and winding must be taken into account in the calculations. In a two-winding transformer, the primary and secondary windings should heat up approximately equally, while in a three-winding transformer, the primary winding experiences the highest load. Therefore, its currents must be monitored when determining thermal conditions. Fazonord AC-DC software is used for the calculations and modeling. The proposed modeling methodology is universal and enables the determination of

traction transformer heating and insulation wear for three-phase traction power systems of any complexity. Distinctive features of the methodology include: determination of traction loads based on modeling of train movements along railway sections with actual track plans and profiles; accurate consideration of the high-voltage grid supplying the power system. Based on the results of computer modeling, the following advantages of a three-phase traction power system can be noted: absence of traction transformer current asymmetry; lower temperatures at the hottest points of traction transformers; reduced losses in traction transformers; and less intense thermal wear of insulation.

Keywords: traction power supply system; traction transformer; hottest point; thermal processes; modeling.

Введение. Адекватная оценка нагрузочной способности (НС) силовых трансформаторов (СТ) имеет большое значение для безопасной и стабильной работы электроэнергетической системы (ЭЭС). Ключевым параметром, определяющим НС, является температура наиболее нагретой точки (ННТ) трансформатора. Для корректного расчёта ННТ требуется выполнение моделирования тепловых процессов. Актуальность данной задачи подтверждается большим числом публикаций по данной тематике. Так, например, вопросы моделирования переходных тепловых процессов в СТ с учётом стохастического характера вариаций их коэффициентов загрузки рассмотрены в [1]. Авторами разработана имитационная модель, позволяющая вычислять температуру магнитопровода, обмотки и масла. На её основе возможно моделирование работы СТ для всех режимов работы агрегата. Приведены результаты численного эксперимента.

Модель, обеспечивающая выполнение прогноза температуры ННТ силового трансформатора при наличии автоматики ограничения его перегрузки представлена в [2]. Рассмотрена возможность её применения в алгоритме функционирования автоматического устройства ограничения перегрузки. Методика обнаружения сверхнормативных нагревов СТ предложена в [3]. Показано, что её практическое использование даст возможность увеличить надёжность СТ. Вопросы влияния тепловых режимов СТ на потери активной мощности рассмотрены в [4]. Выявлены причины возникновения погрешностей при расчётах потерь. Предложена модель для определения тепловых режимов СТ, которая позволяет учитывать вариации температуры окружающей среды и токов нагрузки. Задача оценки остаточного ресурса СТ на основе температуры ННТ решена в [5].

Результаты разработки метода оценки нагрузочной способности СТ предложены в [6]. На основе анализа механизмов нагрева и охлаждения трансформатора разработана модель теплового баланса. Проведены расчёты температурного поля трансформатора, а его нагрузочная способность оценена с учётом предельно допустимой рабочей температуры. Задача моделирования тепловых процессов в СТ решена в [7]. Показано, что рассеивание тепла является проблемой в СТ большой мощности. Представлена модель и результаты моделирования для определения тепловых режимов СТ.

Результаты расчёта теплопроводности СТ с элегазовым охлаждением приведены в [8]. Для анализа теплопередачи использовался метод конечных элементов. Учтены все значимые параметры, влияющие на работу агрегата. Рассчитанные значения температуры сравнивались с экспериментальными результатами. Усовершенствованная модель тепловой цепи для расчёта тем-

пературы в зонах перегрева СТ описана в [9]. Её точность подтверждена путём сравнения результатов с данными заводских испытаний.

Алгоритм определения температуры ННТ СТ предложен в [10]. Предложена модель для температуры ННТ СТ. На её основе получены зависимости потерь мощности от температуры ННТ. Результаты моделирования показали, что погрешность предложенной расчётной модели составляет 2,4 %. Задача оценки влияния геомагнитных бурь на тепловые процессы в баке силового трансформатора решена в [11]. Рассмотрены вопросы моделирования тепловых процессов в СТ, подверженных воздействию геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ). Разработан метод расчёта дополнительных потерь и температуры ННТ СТ при протекании ГИТ через заземлённые обмотки. Рассчитаны зависимости повышения температуры ННТ от геомагнитно-индуцированных токов различной величины. Определены предельные значения повышения температуры.

Упрощённая тепловая модель тягового трансформатора (ТТ) предложена в [12]. Описана тепловая математическая модель ТТ, размещённого на железнодорожной платформе. Результаты исследования характеристик теплопередачи при естественной конвекции на внешней поверхности изоляторов силовых трансформаторов представлены в [13]. Показано, что температура влияет на состояние внутренней изоляции втулок, а внутренний перегрев приводит к тепловому пробою и вызывает серьёзные аварии. Путём аппроксимации данных получена зависимость между геометрическими параметрами и коэффициентом конвективной теплопередачи.

Анализ теплопередачи в стационарном режиме СТ с элегазовым охлаждением выполнен в [14]. Для моделирования использовался метод конечных элементов с целью получения стационарного распределения температуры в СТ с охлаждением на основе SF₆. Полученные результаты сравнивались с результатами измерений, собранных в ходе испытаний, проведённых производителем данного агрегата.

Результаты усовершенствования динамической модели тепловой цепи СТ с масляным охлаждением приведены в [15]. Рассмотрена возможность увеличения рабочей мощности силовых трансформаторов на основе новой динамической модели теплового контура. Разработанная динамическая модель позволяет учитывать факторы окружающей среды и условия эксплуатации. Для её проверки рассчитывались потери в реальном времени и температура ННТ. Полученные результаты сравнивались с измеренными данными. Сравнение показало, что точность предложенной модели является удовлетворительной.

Усовершенствованная модель для вычисления температуры в ННТ трансформаторов на основе многопараметрического синтеза предложена в [16]. Показано, что для мощных СТ температура ННТ оказывает существенное влияние на скорость их термического старения и надёжность работы. Однако расчёт температуры ННТ представляет собой сложную инженерную задачу из-за разнообразия внешней среды, множества источников тепла и чувствительности коэффициентов теплопередачи. Предложена улучшенная модель для расчёта температуры ННТ, которая позволяет анализировать процесс теплоотдачи трансформаторов. В ней учитывается скорость ветра, интенсивность солнечного излучения и вязкость масла. Предложенная модель была проверена с использованием экспериментальных данных, полученных на трансформаторе 220 кВ, работающем с различными графиками нагрузки. Было установлено, что данный подход позволяет повысить точность расчёта на 2,64 %.

Результаты моделирования влияния наличия твёрдых частиц на теплопередачу и распределение температуры в трансформаторном масле представлены в [17]. Показано, что СТ являются одним из важнейших элементов ЭЭС. Содержащееся в СТ масло представляет собой сложную часть изоляционной системы. Взвешенные в нём частицы могут приводить к ухудшению её состояния. Моделирование проведено в среде Comsol. На его основе получены температурные зависимости для каждого типа частиц. Показано, что присутствие воздуха оказывает негативное влияние. Наличие воды, частиц меди и наночастиц оказывает благоприятное влияние на рассеивание тепла и снижение тепловых напряжений.

Исследование распределения температур в обмотке силового трансформатора с помощью вычислительной гидродинамики проведено в [18]. Основное внимание уделено распределению температуры и течению жидкости в масляноохлаждаемой обмотке силового трансформатора. Экспериментальная установка состояла из трёх витков зигзагообразной дисковой обмотки, в которой потери моделировались нагревательными картриджами в каждом сегменте обмотки. Точные датчики температуры измеряли температуру каждого витка. Кроме того, проведено моделирование с использованием вычислительного решателя гидродинамики, результаты которого подтверждены экспериментальными данными.

Задача улучшения тепловых характеристик силовых трансформаторов решена в [19]. Отмечено, что для обеспечения оптимальной тепловой эффективности СТ с масляным охлаждением необходимы комплексные решения сложной теплогидравлической задачи. Авторами представлена усовершенствованная модель, обеспечивающая точный расчёт потерь в СТ и более глубокий анализ тепловых процессов в масле. Это позволит повысить точность прогнозирования срока службы трансформатора. Кроме того, минимальное отклонение между расчётными и измеренными температурами даст возможность оптимизировать систему охлаждения, что приведёт к созданию более экономичной конструкции трансформатора.

Алгоритм моделирования тепловых процессов в СТ на основе сопряжённого поля тепло- и гидродинамики предложен в [20]. Показано, что отказы СТ серьёзно

влияют на надёжность электроснабжения и стабильность работы ЭЭС. Частичное старение изоляции, вызванное тепловыми эффектами в крупногабаритных трансформаторах, является одним из существенных факторов, негативно влияющих на стабильность работы. Мониторинг температуры в реальном времени способствует раннему предупреждению о рисках и потенциальных неисправностях в процессе эксплуатации. Для моделирования распределения температуры и скорости потока в маслонаполненном трансформаторе в различных условиях авторами разработана технология математического моделирования. Путём анализа взаимосвязи между тепловыми и гидродинамическими процессами была сформирована модель СТ мощностью 720 МВ·А. Потери в СТ были рассчитаны в программном обеспечении Ansoft для конечно-элементного анализа. С учётом взаимосвязи тепло- и гидродинамического взаимодействия при теплопередаче в программном обеспечении Fluent была создана модель потока вязкой жидкости. Было получено распределение температуры и скорости потока в соответствии с законами теплопередачи и гидродинамики. На основе моделирования в различных условиях были сделаны выводы о факторах, влияющих на температурное поле.

Модель расчёта температуры в ННТ трансформатора с учётом тепловых связей между обмотками описана в [21]. Показано, что при несбалансированной трёхфазной нагрузке распределительного трансформатора температуры обмоток различаются. Это приводит к изменению процесса теплоотдачи между обмотками соседних фаз. Однако традиционная модель расчёта температуры ННТ учитывает только сбалансированные нагрузки, игнорируя влияние температурной связи между обмотками. Авторами используется моделирование для изучения распределения температуры внутри СТ при несбалансированных нагрузках, а также анализируется температурная связь между обмотками. Между обмотками происходит сложный процесс теплопередачи, включающий излучение и конвекцию. С помощью представленной модели можно точно рассчитать температуру ННТ в условиях работы с несбалансированной нагрузкой. По сравнению с традиционной моделью максимальная погрешность снижена с $-4,1$ до $-1,3$ °С.

Анализ сопряжённого теплообмена в трансформаторе с масляным охлаждением с использованием 3D-модели метода конечных элементов выполнен в [22]. Распределение температурного поля в активных компонентах трансформаторов и изменение скорости потока масла в баке важны для определения продолжительности его работы. Эти характеристики трансформаторов имеют существенное значение при анализе возможной перегрузки. Авторами для прогнозирования тепловых и гидродинамических свойств исследуемого объекта использована методология сопряжённого теплообмена. 3D-модель разработана с использованием метода конечных элементов и программы Comsol.

Моделирование трёхмерного температурного поля трансформатора с учётом циркуляции проведено в [23]. Показано, что температура внутри трансформаторного отсека отражает рабочее состояние СТ в реальном времени, поэтому колебания температуры можно использовать для оценки условий эксплуатации агрегата. Были

смоделированы и рассчитаны характеристики бака, стального сердечника и обмоток трансформатора с учётом циркуляции масла, что позволило получить распределение температурного поля. Сделан вывод о том, что температура обмоток и сердечника трансформатора значительно выше температуры трансформаторного отсека на той же высоте; а температура обмоток выше аналогичного показателя для сердечника.

Результаты исследования метода скользящего прогнозирования динамической тепловой мощности СТ приведены в [24]. Показано, что проведение динамической оценки номинальной мощности трансформатора для повышения коэффициента его использования является одним из важных направлений развития управлением активами. Авторами предложен метод динамического прогнозирования тепловых характеристик трансформаторов. Получена формула прогнозирования мощности, а также определены тепловые параметры модели с учётом переходных профилей температур в ННТ. На этой основе построена модель прогнозирования температуры окружающей среды, основанная на принципе эквивалентности граничных условий и объединённая с методом анализа временных рядов. Зимние и летние профили температуры окружающей среды используются в качестве входных данных для оценки динамической мощности СТ и реализации краткосрочного прогноза.

Влияние токов высших гармоник (ВГ) на потери в обмотках и распределение температуры в СТ исследовано в [25]. Авторами реализованы модели для определения магнитного поля и теплового потока в трансформаторе. Проведён анализ влияния ВГ на потери и температуру ННТ. Результаты показали, что с увеличением частоты гармоник потери в обмотках трансформатора возрастают экспоненциально. Температура горячих точек обмотки трансформатора также имеет экспоненциальную зависимость от частоты.

Задача динамического теплового моделирования силовых трансформаторов решена в [26]. Представлены тепловые модели для расчёта температуры ННТ и в верхнем слое масла, позволяющие получить точные данные о переходных тепловых процессах на основе информации, полученной в ходе испытаний на нагрев; при этом учитывались изменения вязкости масла и потери. Проверенная в полевых условиях динамическая тепловая модель для оценки изоляции СТ представлена в [27]. Тепловые характеристики силовых трансформаторов позволяют оценить срок службы трансформатора. Температура масла и перегрев обмоток являются основными параметрами, влияющими на состояние трансформатора. Для проверки достоверности тепловой модели, на трансформаторы, прошедшие заводские приёмочные испытания, были установлены комплекты датчиков. Применение данных, записанных в режиме реального времени во время работы трансформаторов, позволили оценить точность моделей, предложенных в стандартах IEC и IEEE. Для оценки температуры масла и зон перегрева была реализована тепловая модель, которая может использоваться в качестве инструмента мониторинга

трансформаторов. Усовершенствованная теплоэлектрическая модель для оценки нагрузочной способности СТ описана в [28]. Для полного использования нагрузочной способности трансформатора предложена усовершенствованная модель, основанная на принципе теплоэлектрической аналогии. В качестве дополнительного источника тепла введено солнечное излучение, а теплопроводность скорректирована с учётом влияния температуры на вязкость масла. Для оценки нагрузочной способности трансформатора разработана модель, учитывающая ограничения по температурам верхнего слоя масла и ННТ, относительному износу и уровню мощности вспомогательного оборудования. Проведены расчёты температуры масла и нагрузочной способности трансформатора мощностью 50 МВ · А. Результаты показали, что по сравнению с известными моделями, погрешность определения указанных температур в предложенной модели меньше.

Анализ представленных публикаций даёт возможность сформулировать следующие выводы:

1. Для обеспечения стабильной работы ЭЭС и систем тягового электроснабжения (СТЭ) необходимо адекватно оценивать нагрузочную способность силовых трансформаторов. Ключевым параметром, определяющим НС, является температура наиболее нагретой точки $\Theta_{\text{ННТ}}$ трансформатора. Для корректного расчёта $\Theta_{\text{ННТ}}$ требуется выполнение моделирования тепловых процессов.

2. В современных условиях выбор допустимых режимов работы ЭЭС (СТЭ), обеспечивающих выполнение условия $\Theta_{\text{ННТ}} \leq \Theta_{\text{ННТ}}^{(\text{доп})}$, должен проводиться на основе компьютерного моделирования. Здесь $\Theta_{\text{ННТ}}^{(\text{доп})}$ – допустимая температура ННТ.

3. Методы и средства, позволяющие моделировать тепловые процессы в СТ трёхфазной тяговой сети, в рассмотренных публикациях не представлены.

Для моделирования трёхфазных СТЭ можно эффективно использовать подход, предложенный в [29–31] и реализованный в программном комплексе Fazonord AC-DC, разработанном в ИрГУПСе. Ниже приведены результаты моделирования тепловых режимов в тяговых трансформаторах трёхфазной СТЭ.

Методика и результаты моделирования. При расчётах режимов в ПК Fazonord AC-DC имеется возможность вычисления токов отдельных катушек трансформаторов, что позволяет проводить моделирование тепловых процессов и оценивать износ изоляции обмоток. В связи с быстрыми вариациями тяговой нагрузки, диапазоны изменения которой сопоставимы с постоянной времени нагрева обмотки, при расчётах необходимо учитывать тепловые инерции масла и обмотки. В двухобмоточном трансформаторе первичная и вторичная обмотки должны нагреваться примерно одинаково, в трёхобмоточном в наиболее нагруженном режиме находится первичная обмотка. Поэтому, при определении тепловых режимов необходимо контролировать её токи. Схема алгоритма моделирования тепловых процессов в трансформаторе показана на рис. 1, а исходные данные, используемые при расчётах, приведены на табл. 1.

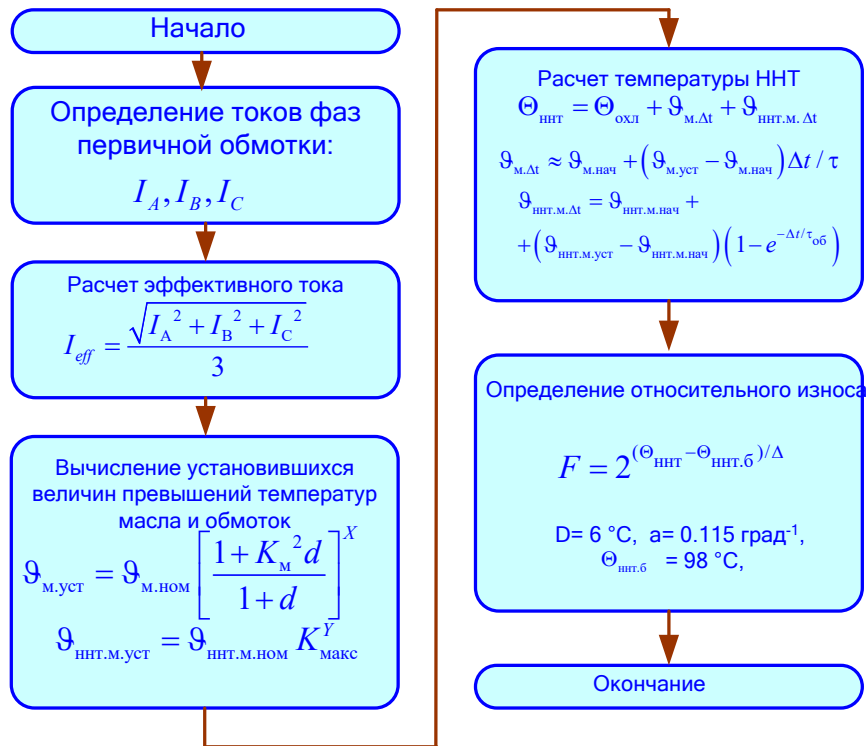


Рис. 1. Алгоритм моделирования: ННТ – наиболее нагретая точка

Таблица 1. Исходные данные, используемые при расчётах

№	Обозначение	Наименование
1	$T_{нач}$	Начальный номинальный износ изоляции, лет;
2	$T_{из.б}$	Базовая продолжительность жизни изоляции, $T_{из.б} = 25$ лет;
3	α	коэффициент, характеризующий интенсивность старения изоляции, $\alpha = 0,115 \text{ град}^{-1}$;
4	$\Theta_{ннт.б}$	Базовая температура износа изоляции обмоток, $\Theta_{ннт.б} = 98 \text{ }^\circ\text{C}$;
5	$\Theta_{охл}$	Температура охлаждающей среды, $^\circ\text{C}$;
6	$\vartheta_{м ном}$	Установившееся значение превышения температуры верхних слоев масла при номинальной нагрузке, $\vartheta_{м ном} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$;
7	$\vartheta_{ннт.м.ном}$	Разность температур наиболее нагретой точки обмотки и масла в верхних слоях при номинальной нагрузке, $\vartheta_{ннт.м.ном} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$;
8	X	Показатель степени масла, $X = 0,9$;
9	Y	Показатель степени обмотки, равный $Y = 1,6$;
10	$\vartheta_{м.нач}$	Начальное превышение температуры масла, $^\circ\text{C}$;
11	$\vartheta_{ннт.м.нач}$	Начальное превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой масла, $^\circ\text{C}$;
12	τ	Постоянная времени масла, равная для тяговых трансформаторов 120 мин;
13	$\tau_{об}$	Тепловая постоянная обмотки, значение которой лежит в пределах от 5 до 10 мин;
14	$\Delta P_k, \Delta P_x$	Потери короткого замыкания и потери холостого хода трансформатора, кВт;
15	$I_{ном}$	Номинальный ток первичной обмотки трансформатора, А;
16	I_A, I_B, I_C	Токи фаз первичной обмотки трансформатора текущего интервала времени, А.

Расчёты тепловых процессов в СТ с оценкой степени износа изоляции обмоток выполнены для схемы, подробно описанной в [31]. Осуществлялось моделирование движения поездов по графику, представленному на

рис. 2. Там же приведены зависимости токов локомотивов от пространственной координаты. Для сравнения выполнено моделирование однофазной СТЭ 25 кВ типовой конструкции.

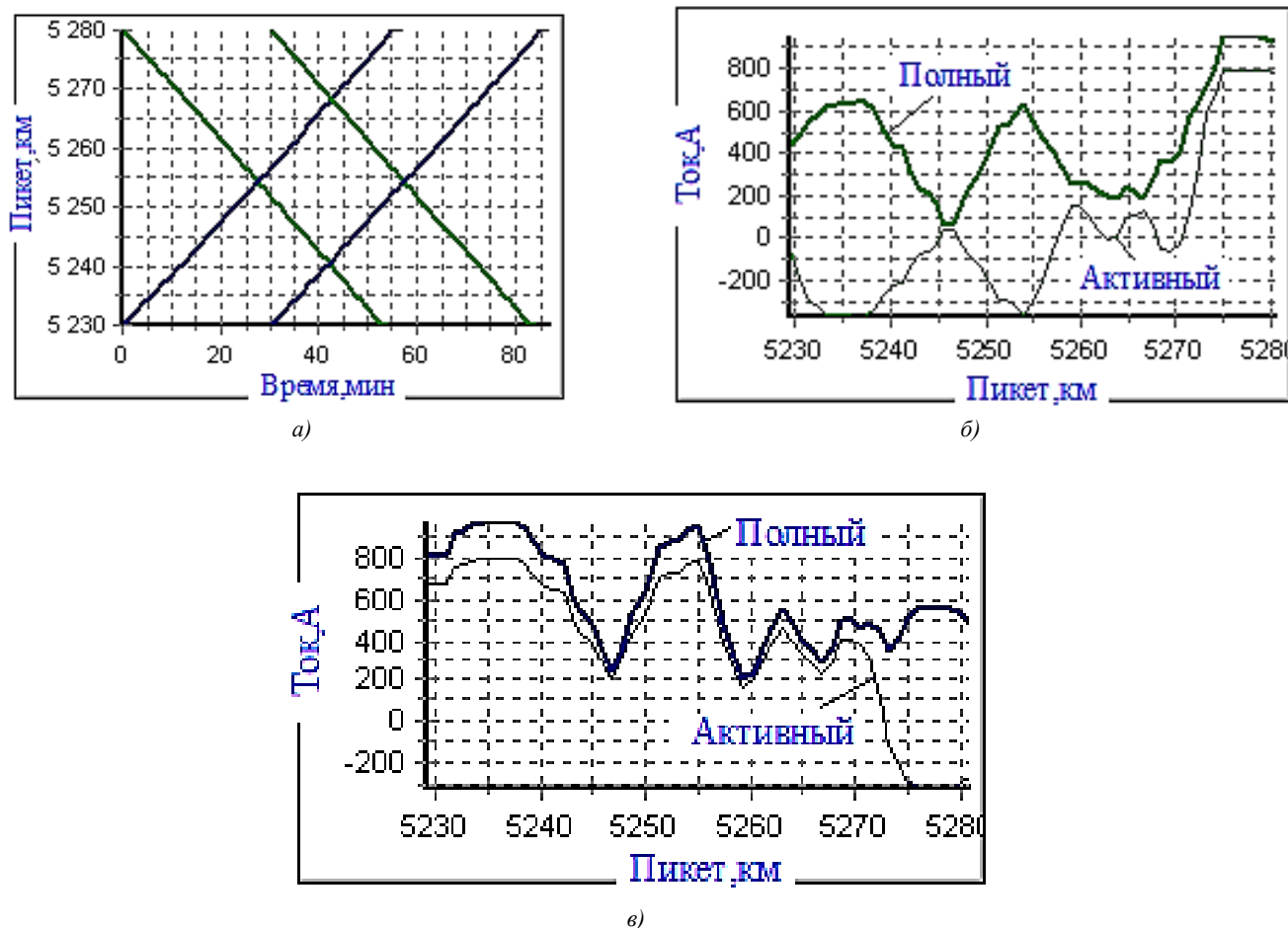


Рис. 2. График следования грузовых составов по участку железнодорожной магистрали (а) и зависимости потребляемых локомотивами токов от расстояния (б), (в)

Результаты моделирования приведены на рис. 3–8. На рис. 3 приведены зависимости токов первичной обмотки тягового трансформатора (ТТ) от времени. Из них видно, что в трёхфазной СТЭ соблюдается равенство $I_A \approx I_B \approx I_C$. В СТЭ типовой конструкции ток наиболее загруженной фазы А примерно в два раза выше токов I_B и I_C ; при этом максимальная величина отношения

$$v = \frac{I_A^{(1)}}{I_A^{(3)}}$$

равно 6, здесь индекс (1) отвечает однофазной

СТЭ, а индекс (3) – трёхфазной. Результаты сравнения токов трёхфазной и однофазной СТЭ представлены на рис. 4, из которого видно, что по первичной обмотке ТТ однофазной СТЭ протекают значительно большие токи.

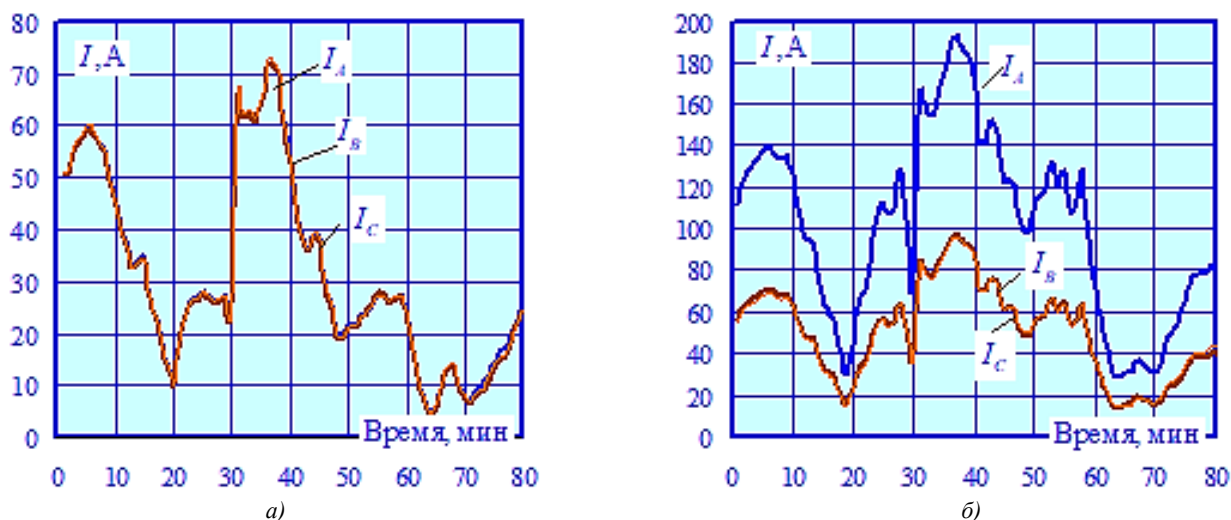


Рис. 3. Токи на стороне 220 кВ трансформатора ТТ: а – трёхфазная СТЭ; б – однофазная СТЭ

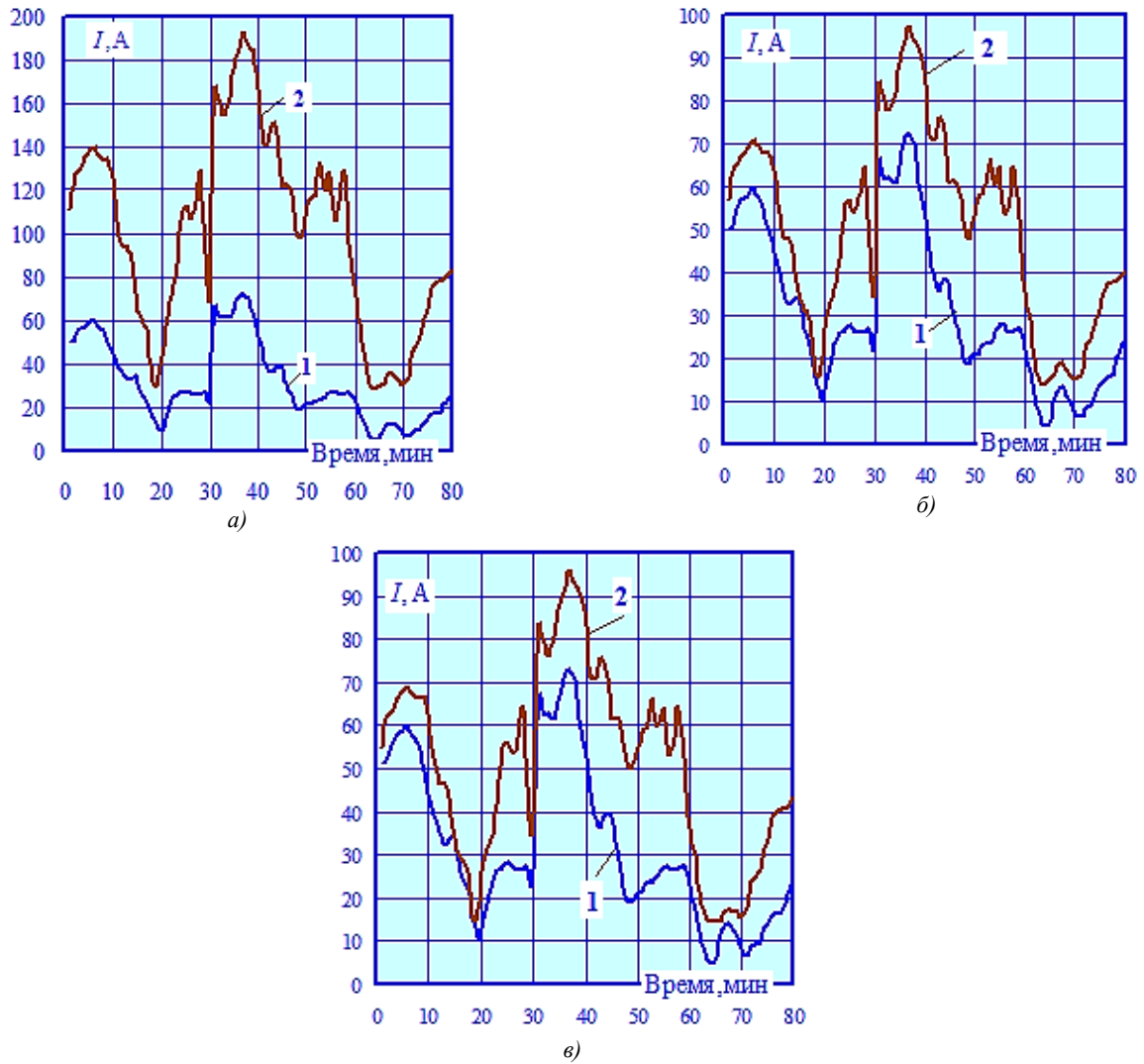


Рис. 4. Сравнение токов первичной обмотки тяговых трансформаторов трёхфазной (1) и однофазной (2) СТЭ: *a* – фаза А; *б* – фаза В; *в* – фаза С]

На рис. 5 приведены результаты расчёта суммарных потерь активной мощности в трансформаторах трёхфаз-

ной и однофазной СТЭ. Средние значения отношения $\frac{\Delta P^{(1)}}{\Delta P^{(3)}}$ для трансформатора ТП 1 равно 2, а для ТП 2–2,11.

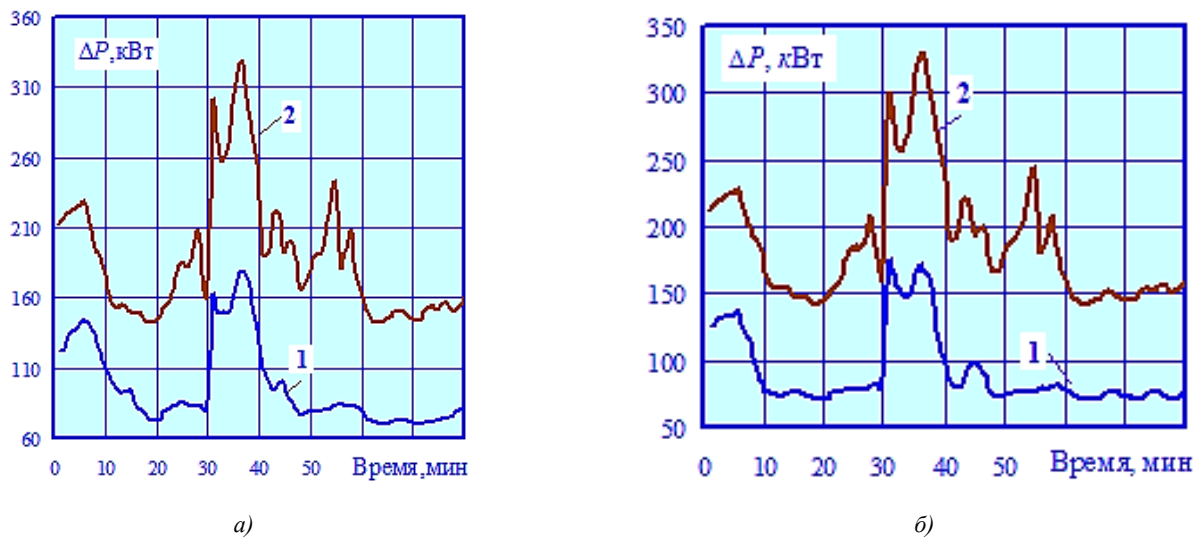


Рис. 5. Суммарные потери в трансформаторах: *a* – ТТ 1; *б* – ТТ 2; 1 – трёхфазная СТЭ; 2 – однофазная СТЭ

На рис. 6 показана структура потерь в ТТ. Из них видно, что в типовой СТЭ 25 кВ потери в стали и меди значительно выше аналогичных показателей для трёхфазной СТЭ. На рис. 7 приведены графики зависимостей

температур ННТ от времени. Из них видно, что максимальные значения $\Theta_{\text{ННТ}}$ в трёхфазной СТЭ на 19 % ниже аналогичных показателей для типовой СТЭ 25 кВ.

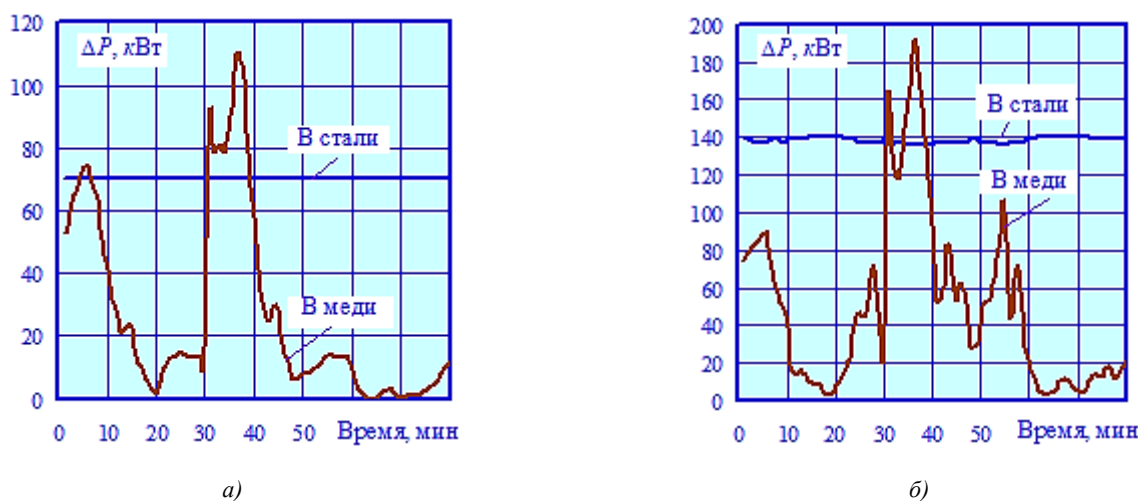


Рис. 6. Структура потерь в ТТ ТП 1: а – трёхфазная СТЭ; б – однофазная СТЭ

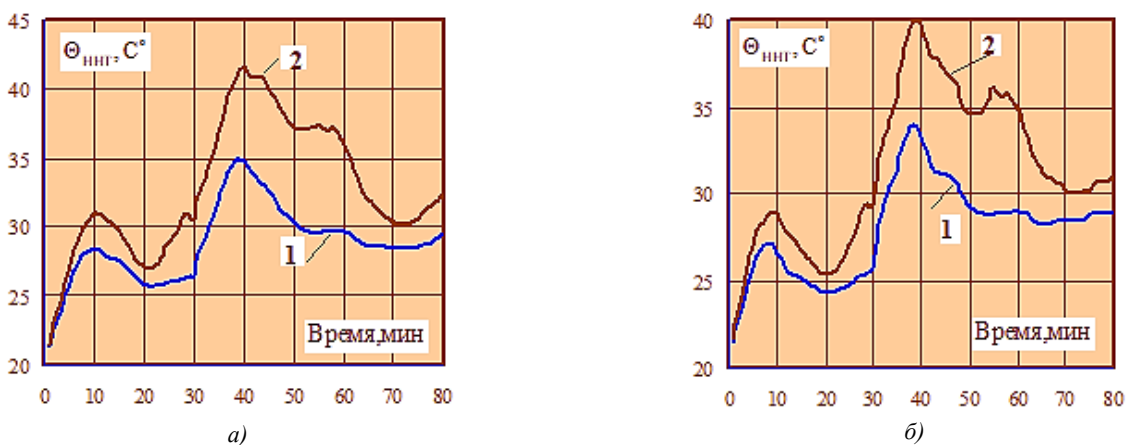


Рис. 7. Температуры ННТ тяговых трансформаторов ТП 1(а) и ТП 2 (б): 1 – трёхфазная СТЭ; 2 – однофазная СТЭ

На рис. 8 приведены результаты определения относительного износа F изоляции ТТ. Приведённые на этом рисунке графики $F = F(t)$ показывают, что тепловой

износ изоляции в трёхфазной СТЭ протекает со значительно меньшей интенсивностью.

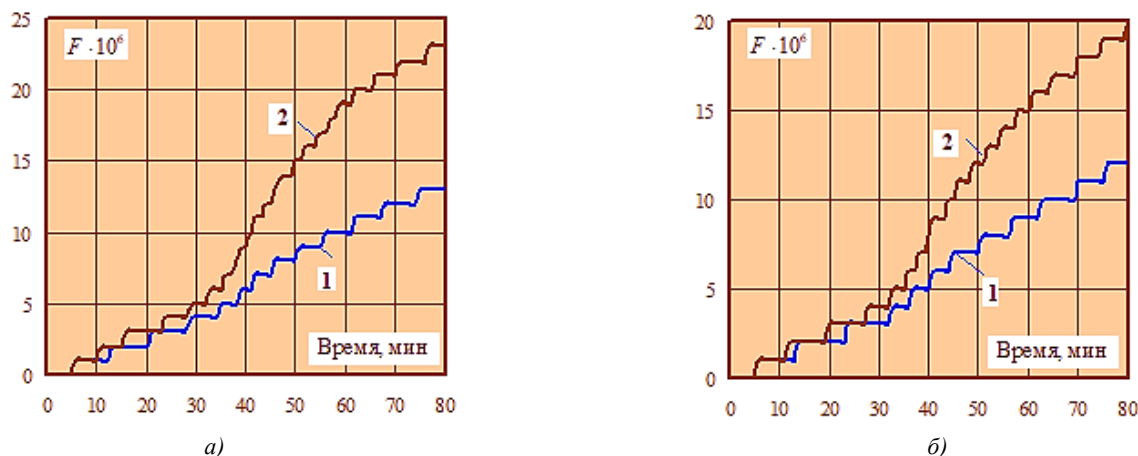


Рис. 8. Относительный износ изоляции: (а) – ТП 1; (б) ТП 2: 1 – трёхфазная СТЭ; 2 – однофазная СТЭ

В работе [31] показано, что трёхфазная СТЭ имеет следующие преимущества по сравнению с типовой СТЭ однофазной конструкции:

- более стабильные напряжения на токоприемниках электропроводов,
 - полное использование мощности ТТ;
 - меньшие токи проводов контактных подвесок;
 - практическое отсутствие несимметрии на шинах 110–220 кВ ТП;
 - более низкие гармонические искажения.
- Исследования, результаты которых представлены в настоящей статье, показали дополнительные преимущества трёхфазной СТЭ, заключающиеся в следующем:
- отсутствие асимметрии токов тяговых трансформаторов;
 - меньшие температуры наиболее нагретых точек тяговых трансформаторов;

- пониженный уровень потерь в ТТ;
- менее интенсивный тепловой износ изоляции.

Заключение. Разработаны методика и компьютерные модели, позволяющие определять тепловые режимы силовых трансформаторов трёхфазных систем тягового электроснабжения. Методика является универсальной и позволяет определять нагревы ТТ и износ изоляции для трёхфазных СТЭ любой сложности. Отличительными особенностями предложенной методики являются: определение тяговых нагрузок на основе моделирования движения поездов по участкам железной дороги с реальными планами и профилями пути; корректный учёт высоковольтной сети питающей ЭЭС.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00937).

Литература

1. Переходные тепловые процессы в силовых трансформаторах при стохастическом характере изменения их коэффициентов загрузки / Эралиева Г.Ш., Кабаев Т., Бузурманкулова Ч.Б., Суйунтбекова Н. // Проблемы автоматизации и управления. 2022. № 1 (43). С. 4–12.
2. Госьков М.О., Константинов А.М. Модель прогнозирования нагрева силового трансформатора при динамической уставке автоматизации ограничения перегрузки оборудования // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2023. Т. 2. С. 17–22.
3. Широков О.Г., Зализный Д.И., Лось Д.М. Методика автоматического обнаружения ненормального нагрева силового трансформатора // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2004. № 4. С. 51–55.
4. Карагодин В.В., Полянский К.А., Рыжий Н.В. Оценка влияния тепловых процессов на потери активной мощности в обмотках силовых трансформаторов с естественной циркуляцией масла // Промышленная энергетика. 2020. № 4. С. 8–18.
5. Тимонин Ю.Н., Степанов В.М. Определение остаточного ресурса силового трансформатора по температуре наиболее нагретой точки его обмотки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3–5. С. 83–85.
6. C. Wang, S. Fang, J. Feng and Y. Wang "Research on Heat Balance Model and Load Capacity Evaluation Method of Oil-immersed Transformer" 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), Beijing, China, 2019, pp. 459–464, doi: 10.1109/iSPEC48194.2019.8975257.
7. V.V.S.S. Haritha, T.R. Rao, A. Jain and M. Ramamoorthy, "Thermal modeling of electrical utility transformer" 2009 International Conference on Power Systems, Kharagpur, India, 2009, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICPWS.2009.5442724.
8. M.B. Eteiba, M.M.A. Aziz and J.H. Shazly "Heat Conduction Problems in SF6 Gas Cooled-Insulated Power Transformers Solved by the Finite-Element Method" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 3, pp. 1457–1463, July 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2008.915793.
9. W. Ben-gang, F. Chen-zhao, L. Hong-lei, L. Ke-jun and L. Yong-liang "The improved thermal-circuit model for hot-spot temperature calculation of oil-immersed power transformers" 2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, Chongqing, China, 2016, pp. 809–813, doi: 10.1109/ITNEC.2016.7560473.
10. Pengfei Yi, Yang Hu, Songlin Wu, Yuyu Zhou, Li Luo, Li Zhang, Lepeng Xiao. Study on Temperature Rise of Hot Spot of Oil-immersed Power Transformer Winding. 2023 5th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEEET). 2023.
11. V.V. Vakhnina, V.A. Shapovalov, V.N. Kuznetsov and D.A. Kretov "The Influence of Geomagnetic Storms on Thermal Processes in the Tank of a Power Transformer" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 4, pp. 1702–1707, Aug. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2386276.
12. L. Veg, J. Laksar, R. Pechanek and K. Hruska "Simplified thermal model of traction transformer for commercial use" 2016 17th International Conference on Mechatronics – Mechatronika (ME), Prague, Czech Republic, 2016, pp. 1–5.
13. B. Chen, J. Huang and Y. Xia "Study of Natural Convection Heat Transfer Characteristics and Correlation Equation on The Outer Surface of Power Transformer Bushings" 2023 13th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), Chengdu, China, 2023, pp. 266–270, doi: 10.1109/ICPES59999.2023.10400090.
14. M.M.A. Aziz, M.B. Eteiba and J.H. Shazly "Steady state heat transfer in a SF6. gas cooled-insulated power transformer using finite element technique" 2006 Eleventh International Middle East Power Systems Conference, El-Minia, Egypt, 2006, pp. 406–411.
15. L. Zhu, H. Li, X. Yao and S. Ji "Improvement and application of dynamic thermal circuit model for oil-immersed power transformer" 2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), Santa Fe, NM, USA, 2014, pp. 591–594, doi: 10.1109/IPMHVC.2014.7287345.
16. Y. Liang, N. Liu, Q.-Z. Chen, Y. Li, Y.-Y. Xu and G.-J. Zhang "An improved model of hot-spot temperature for oil-immersed transformers based on multi-parameter fusion" 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Xi'an, China, 2018, pp. 756–759, doi: 10.1109/ICPADM.2018.8401134.
17. Y. Dib, T. Seghier, B. Yousfi, F.A. Machuca and A.M. Mabwe "Modeling the Effect of Particles on Heat Transfer and Temperature Distribution in Transformer Oil" 2024 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC), Setif, Algeria, 2024, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICEEAC61226.2024.10576288.
18. S. Khandan, S. Tenbohlen, C. Breuer and R. Lebreton "CFD study of fluid flow and temperature distributions in a power transformer winding" 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, UK, 2017, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICDL.2017.8124674.
19. A. Gamil, A. Al-Abadi, M. Schiessl, F. Schatzl and E. Schlucker "Improvements on Thermal Performance of Power Transformers: Modelling and Testing" 2019 6th International Advanced

- Research Workshop on Transformers (ARWtr)*, Cordoba, Spain, 2019, pp. 13–18, doi: 10.23919/ARWtr.2019.8930180.
20. Q. Wen, Z. Baohui, H. Zhiguo and B. Zhiqian "Simulation and analysis of oil-immersed transformer based on thermal–fluid coupled field" *2014 International Conference on Power System Technology*, Chengdu, China, 2014, pp. 826–831, doi: 10.1109/POWERCON.2014.6993882.
 21. Kehan Luo, You Zhou, Xiaoxuan Lin, Yingting Luo, Mo Shi, Lei Wang. Study on Fast Calculation Model of Hot Spot Temperature of Distribution Transformer Considering Temperature Coupling between Windings. 2025 IEEE International Conference on Power Systems and Smart Grid Technologies (PSSGT). 2025.
 22. I. Hadzhiev, I. Yatchev and E. Mechkov "Conjugate Heat Transfer Analysis Using 3D FEM Model of an Oil-immersed Distribution Transformer" *2018 International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech)*, Sofia, Bulgaria, 2018, pp. 1–4, doi: 10.1109/HiTech.2018.8566619.
 23. W. Lei, H. Qiang, Z. Zijian, H. Linxing and Z. Jianli "Three-Dimensional Temperature Field Simulation and Analysis of Natural Oil Circulation Transformer" *2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE)*, Chongqing, China, 2021, pp. 295–298, doi: 10.1109/CEEPE51765.2021.9475695.
 24. Chen Zhang, Xuzhu Dong, Jiangjun Ruan, Yongqing Deng, Changzhi Peng. Research on Rolling Forecast Method of Short-Term Dynamic Thermal Rating of Oil-immersed Power Transformer. 2024 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE). 2024.
 25. J. Wu, C. Liu, X. Zhang, J. Hao, J. Sun and Z. Li "Influence of Harmonic Current on the Winding Loss and Temperature Distribution of AC Transformer" *2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, Chongqing, China, 2021, pp. 1492–1498, doi: 10.1109/ACPEE51499.2021.9437126.
 26. D. Susa, M. Lehtonen and H. Nordman "Dynamic thermal modelling of power transformers" in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 197–204, Jan. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.835255.
 27. M. Ryadi and A. Tanguy «Field Validated Dynamic Thermal Model for Power Transformer Insulation System Assessment» *2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, San Antonio, TX, USA, 2018, pp. 101–105, doi: 10.1109/EIC.2018.8481065.
 28. Q. Wei *et al.* "An Improved Thermal–electric Analogy Model for Evaluating Loading Capability of Oil-immersed Transformers" *2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, Chongqing, China, 2021, pp. 1261–1266, doi: 10.1109/ACPEE51499.2021.9437048.
 29. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, Иркутск, 2005. 273 с.
 30. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М. : Директ-Медиа, 2023. 156 с.
 31. Моделирование трёхфазных систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока / Б.А. Аржанников, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, А.В. Черепанов, А.Е. Крюков, Д.А. Середкин, И.А. Фесак ; под ред. А.В. Крюкова и Б.А. Аржанникова. Екатеринбург, 2023. 171 с.
 - technical and economic cooperation of Asia-Pacific countries in the 21st century. 2023. Vol. 2. P. 17–22.
 3. Shirokov O.G., Zalizny D.I., Los D.M. Methodology for automatic detection of abnormal heating of a power transformer // Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi. 2004. No. 4. Pp. 51–55.
 4. Karagodin V.V., Polyansky K.A., Ryzhiy N.V. Assessing the Impact of Thermal Processes on Active Power Losses in Windings of Power Transformers with Natural Oil Circulation // Industrial Power Engineering. 2020. No. 4. Pp. 8–18.
 5. Timonin Yu.N., Stepanov V.M. Determining the Residual Life of a Power Transformer Based on the Temperature of the Hottest Point of Its Winding // Bulletin of Tula State University. Technical Sciences. 2010. No. 3–5. Pp. 83–85.
 6. C. Wang, S. Fang, J. Feng and Y. Wang "Research on Heat Balance Model and Load Capacity Evaluation Method of Oil-immersed Transformer" *2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, Beijing, China, 2019, pp. 459–464, doi: 10.1109/iSPEC48194.2019.8975257.
 7. V.V.S.S. Haritha, T.R. Rao, A.Jain and M. Ramamoorthy, "Thermal modeling of electrical utility transformer" *2009 International Conference on Power Systems*, Kharagpur, India, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPWS.2009.5442724.
 8. M.B. Eteiba, M.M.A. Aziz and J.H. Shazly "Heat Conduction Problems in SF6 Gas Cooled-Insulated Power Transformers Solved by the Finite-Element Method" in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 3, pp. 1457–1463, July 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2008.915793.
 9. W. Ben-gang, F. Chen-zhao, L. Hong-lei, L. Ke-jun and L. Yong-liang "The improved thermal-circuit model for hot-spot temperature calculation of oil-immersed power transformers" *2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference*, Chongqing, China, 2016, pp. 809-813, doi: 10.1109/ITNEC.2016.7560473.
 10. Pengfei Yi, Yang Hu, Songlin Wu, Yuyu Zhou, Li Luo, Li Zhang, Lepeng Xiao. Study on Temperature Rise of Hot Spot of Oil-immersed Power Transformer Winding. 2023 5th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT). 2023.
 11. V.V. Vakhnina, V.A. Shapovalov, V.N. Kuznetsov and D.A. Kretov "The Influence of Geomagnetic Storms on Thermal Processes in the Tank of a Power Transformer" in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 4, pp. 1702-1707, Aug. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2386276.
 12. L. Veg, J. Laksar, R. Pechanek and K. Hruska "Simplified thermal model of traction transformer for commercial use" *2016 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*, Prague, Czech Republic, 2016, pp. 1–5.
 13. B. Chen, J. Huang and Y. Xia "Study of Natural Convection Heat Transfer Characteristics and Correlation Equation on The Outer Surface of Power Transformer Bushings" *2023 13th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*, Chengdu, China, 2023, pp. 266–270, doi: 10.1109/ICPES59999.2023.10400090.
 14. M.M.A. Aziz, M.B. Eteiba and J.H. Shazly "Steady state heat transfer in a SF6. gas cooled-insulated power transformer using finite element technique" *2006 Eleventh International Middle East Power Systems Conference*, El-Minia, Egypt, 2006, pp. 406–411.
 15. L. Zhu, H. Li, X. Yao and S. Ji «Improvement and application of dynamic thermal circuit model for oil-immersed power transformer» *2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC)*, Santa Fe, NM, USA, 2014, pp. 591–594, doi: 10.1109/IPMHVC.2014.7287345.
 16. Y. Liang, N. Liu, Q.-Z. Chen, Y. Li, Y.-Y. Xu and G.-J. Zhang "An improved model of hot-spot temperature for oil-immersed transformers based on multi-parameter fusion" *2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, Xi'an, China, 2018, pp. 756–759, doi: 10.1109/ICPADM.2018.8401134.

References

1. Transient thermal processes in power transformers with a stochastic nature of changes in their load factors / Eralieva G.Sh., Kabaev T., Buzurmankulova Ch.B., Suyuntbekova N. // Problems of automation and control. 2022. No. 1 (43). P. 4–12.
2. Goskov M.O., Konstantinov A.M. Model for predicting the heating of a power transformer with a dynamic setting of the automatic equipment overload limitation system // Scientific,

17. Y. Dib, T. Seghier, B. Yousfi, F. A. Machuca and A. M. Mabwe "Modeling the Effect of Particles on Heat Transfer and Temperature Distribution in Transformer Oil" *2024 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC)*, Setif, Algeria, 2024, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICEEAC61226.2024.10576288.
18. S. Khandan, S. Tenbohlen, C. Breuer and R. Lebreton "CFD study of fluid flow and temperature distributions in a power transformer windin" *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Manchester, UK, 2017, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICDL.2017.8124674.
19. A. Gamil, A. Al-Abadi, M. Schiessl, F. Schatzl and E. Schlücker "Improvements on Thermal Performance of Power Transformers: Modelling and Testing" *2019 6th International Advanced Research Workshop on Transformers (ARWtr)*, Cordoba, Spain, 2019, pp. 13–18, doi: 10.23919/ARWtr.2019.8930180.
20. Q. Wen, Z. Baohui, H. Zhiguo and B. Zhiqian "Simulation and analysis of oil-immersed transformer based on thermal-fluid coupled field" *2014 International Conference on Power System Technology*, Chengdu, China, 2014, pp. 826–831, doi: 10.1109/POWERCON.2014.6993882.
21. Kehan Luo, You Zhou, Xiaoxuan Lin, Yingting Luo, Mo Shi, Lei Wang. Study on Fast Calculation Model of Hot Spot Temperature of Distribution Transformer Considering Temperature Coupling between Windings. *2025 IEEE International Conference on Power Systems and Smart Grid Technologies (PSSGT)*. 2025.
22. I. Hadzhiev, I. Yatchev and E. Mechkov "Conjugate Heat Transfer Analysis Using 3D FEM Model of an Oil-immersed Distribution Transformer" *2018 International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech)*, Sofia, Bulgaria, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/HiTech.2018.8566619.
23. W. Lei, H. Qiang, Z. Zijian, H. Linxing and Z. Jianli "Three-Dimensional Temperature Field Simulation and Analysis of Natural Oil Circulation Transformer" *2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE)*, Chongqing, China, 2021, pp. 295–298, doi: 10.1109/CEEPE51765.2021.9475695.
24. Chen Zhang, Xuzhu Dong, Jiangjun Ruan, Yongqing Deng, Changzhi Peng. Research on Rolling Forecast Method of Short-Term Dynamic Thermal Rating of Oil-immersed Power Transformer. *2024 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE)*. 2024.
25. J. Wu, C. Liu, X. Zhang, J. Hao, J. Sun and Z. Li "Influence of Harmonic Current on the Winding Loss and Temperature Distribution of AC Transformer" *2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, Chongqing, China, 2021, pp. 1492–1498, doi: 10.1109/ACPEE51499.2021.9437126.
26. D. Susa, M. Lehtonen and H. Nordman "Dynamic thermal modelling of power transformers" in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 197–204, Jan. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.835255.
27. M. Ryadi and A. Tanguy "Field Validated Dynamic Thermal Model for Power Transformer Insulation System Assessment" *2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, San Antonio, TX, USA, 2018, pp. 101–105, doi: 10.1109/EIC.2018.8481065.
28. Q. Wei *et al.* "An Improved Thermal-electric Analogy Model for Evaluating Loading Capability of Oil-immersed Transformers" *2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, Chongqing, China, 2021, pp. 1261–1266, doi: 10.1109/ACPEE51499.2021.9437048.
29. V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov. Complex Asymmetric Modes of Electrical Systems / V.P. Zakaryukin, Irkutsk, 2005. 273 p.
30. V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov. Modeling of DC Traction Power Supply Systems Based on Phase Coordinates. M. : Direct-Media, 2023. 156 p.
31. Modeling of Three-Phase AC Traction Power Supply Systems of Railways / B.A. Arzhannikov, V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov, A.V. Cherepanov, A.E. Kryukov, D.A. Seredkin, I.A. Fesak ; edited by A.V. Kryukov and B.A. Arzhannikov. Ekaterinburg, 2023. 171 p