

УДК 621.311

Юрий Дмитриевич Кутумов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: kutumov97@mail.ru

Андрей Юрьевич Мурзин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, декан электроэнергетического факультета, Россия, Иваново, e-mail: murzin-64@mail.ru

Максим Алексеевич Крунов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: maks.krunov@mail.ru

Разработка и апробация методики определения параметров схем замещения силовых трансформаторов по аварийным осциллограммам для расчетов токов короткого замыкания

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время в субъектах электроэнергетики активно внедряется Единая информационная модель Единой энергетической системы России. На основе данных из Единой информационной модели разрабатываются расчетные модели различного сетевого и генерирующего оборудования (в том числе, блочных трансформаторов и автотрансформаторов связи атомных станций) для расчетов токов короткого замыкания. Однако в реальной практике субъект электроэнергетики не обладает достаточными данными для полного формирования Единой информационной модели. Так, для многообмоточных трансформаторов актуальным является вопрос определения активных сопротивлений в схеме замещения прямой последовательности, для всех трехфазных трансформаторов (в том числе, блочных трансформаторов атомных станций) – вопрос расчетов параметров схемы замещения нулевой последовательности.

Материалы и методы. При составлении и анализе схем замещения силовых многообмоточных трансформаторов использованы положения классической теории анализа и синтеза электрических цепей. Определение параметров схем замещения трансформаторов осуществлено с использованием программ просмотра аварийных осциллограмм (Waves, Transcor и пр.).

Результаты. Различными способами определены значения импедансов схемы замещения многообмоточных трансформаторов, дана характеристика указанных способов. Предложена методика определения параметров схем замещения силовых трансформаторов по аварийным осциллограммам. Сформулирован метод верификации расчетной модели сети для расчетов токов короткого замыкания. Обозначена сфера применения аварийных осциллограмм для верификации параметров схем замещения трансформаторов. Приведены результаты определения различных параметров схем замещения силовых трансформаторов по аварийным осциллограммам.

Выводы. Для ряда трансформаторов величина потерь активной мощности при проведении опыта короткого замыкания может не сходиться с аналогичной величиной потерь, полученной с применением значений активных сопротивлений отдельных обмоток трансформатора. Аварийные осциллограммы являются средством, достаточным для определения/верификации параметров схем замещения силовых трансформаторов (в том числе, нулевой последовательности), однако существует ряд ограничений их применения, связанных с величиной аварийных составляющих токов и напряжений, а также погрешностями трансформаторов тока.

Ключевые слова: силовой трансформатор, блочный трансформатор электростанции, Единая информационная модель ЕЭС России, схема замещения трансформатора, токи короткого замыкания, осциллограммы аварийных режимов

Yuri Dmitrievich Kutumov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: kutumov97@mail.ru

Andrey Yurievich Murzin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Dean of Electrical Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: murzin-64@mail.ru

Maxim Alekseevich Krunov

Ivanovo State Power Engineering University, Master Degree Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: maks.krunov@mail.ru

Development and testing of a methodology to determine parameters of equivalent circuits of power transformers based on fault oscillograms for short-circuit current calculation

Abstract

Background. Currently, the Common Information Model of the United Power System of Russia is being actively implemented in the electric power industry. Data which is received from Common Information Model is used to develop calculation models for various grid and generating equipment (including unit transformers and interconnecting autotransformers of nuclear power plants) for short-circuit current calculation. However, in real-world practice, an electric power engineering entity does not possess sufficient data to completely instantiate Common Information Model. For example, for multi-winding transformers, determining the active resistances in the positive-sequence equivalent circuit is up-to-date issue, while for all three-phase transformers (including unit transformers of nuclear power plants), calculating the parameters of the zero-sequence equivalent circuit is crucial.

Materials and methods. When compiling and analyzing the equivalent circuit diagrams for multi-winding power transformers, the principles of classical theory of electrical circuit analysis and synthesis have been used. When determining the parameters of the transformer equivalent circuit diagrams, programs for viewing fault oscillograms (Waves, Transcop, etc.) have been used.

Results. Impedance values of the equivalent circuit of multi-winding transformers are determined using various methods, and their characteristics have been provided. A methodology to determine the parameters of equivalent circuits for power transformers using fault oscillograms has been proposed. A method to verify the grid calculation model for short-circuit current calculations has been formulated. The scope of application of fault oscillograms to verify the parameters of equivalent circuits for transformers has been outlined. The results of determining various parameters of equivalent circuits for power transformers using fault oscillograms have been presented.

Conclusions. For some transformers, the active power losses during the short-circuit test may not match the same loss value calculated using the active resistance values of the individual transformer windings. Fault oscillograms are a sufficient tool to determine/verify the parameters of power transformer equivalent circuits (including zero-sequence circuits). However, there is a number of limitations in their use related to the magnitude of fault current and voltage components, as well as current transformer errors.

Key words: power transformer, power plant unit transformer, Common Information Model of the United Power System of Russia, transformer equivalent circuit, short-circuit current, emergency mode oscillograms

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.4.035-048

Введение. В настоящее время в организациях, осуществляющих деятельность в сфере электроэнергетики (субъектах электроэнергетики – Концерн «Росэнергоатом», АО «СО ЕЭС» и др.), интенсифицируется процесс внедрения Единой информационной модели (Common Information model, CIM) Единой энергетической системы (ЕЭС) России [1–4].

Внедрение CIM позволит усовершенствовать информационный обмен между субъектами электроэнергетики, являющийся обязательным атрибутом отрасли [5]. Кроме этого, на основе CIM разрабатываются расчетные модели различного сетевого и генерирующего оборудования (в том числе, блочных трансформаторов, трансформаторов / автотрансформаторов связи атомных и иных электростанций), математические модели сети (ММС) для расчетов токов короткого замыкания (КЗ), электроэнергетических режимов [6, 7].

Несмотря на очевидные преимущества CIM [2, 3, 8], в настоящее время существует ряд проблем ее внедрения. Во-первых, массив данных CIM достаточно велик и требует в ряде случаев решения вопросов, связанных с точными расчетами отдельных параметров оборудования. Во-вторых, в различных компаниях (и даже в различных службах одной компании) существуют методические различия при моделировании установившихся и

переходных режимов в электроэнергетических системах (ЭЭС) [9, 10]. Из-за этого предоставляемые для формирования расчетных моделей ЭЭС информационные модели могут иметь различную степень полноты.

Так, актуальными вопросами при расчетах токов КЗ и выборе параметров настройки устройств релейной защиты (а также вопросами, которые, как правило, не учитываются при расчетах электроэнергетических режимов) являются:

1) вопрос определения параметров схем замещения прямой и в особенности нулевой последовательностей линий электропередачи (ЛЭП) и трансформаторов [9–13];

2) вопрос определения активных сопротивлений трансформаторных ветвей (или трансформаторов в целом), особо актуальный при расчете постоянной времени тока КЗ при оценке времени до насыщения трансформаторов тока [14];

3) вопрос определения параметров информационной и расчетной моделей трансформатора при броске тока намагничивания (поднимается в [15–17] и вообще не затронут в [18, 19]).

Параметры схемы замещения нулевой последовательности трансформаторов (в особенности блочных трансформаторов тепловых и атомных станций) существенно влияют на величины токов нулевой последовательности, что

сказывается на результатах проверки чувствительности основных и резервных защит сетевых элементов. Актуальность этой проблемы вытекающая, в силу того что при определенных ремонтных схемах летом для повышения чувствительности токовых защит нулевой последовательности на ряде электростанций включаются блочные трансформаторы, работающие на холостом ходу (так называемые «релейные указания»).

Проблема определения активных сопротивлений трансформаторных ветвей также может быть решена в ходе указанного исследования. Вопрос определения параметров информационной и расчетной моделей трансформатора при броске тока намагничивания требует отдельной методики исследования и должен быть, на наш взгляд, решен отдельно.

Таким образом, целью настоящего исследования является создание информационных и расчетных моделей силовых трансформаторов для расчетов электрических величин при КЗ.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- разработка методики моделирования двухобмоточных и многообмоточных трансформаторов;

- описание методики верификации расчетных моделей силовых трансформаторов с использованием аварийных осциллограмм, описание возможных ее ограничений и проблемных моментов;

- апробация указанной методики на массиве результатов осциллографирования аварийных событий.

Методы исследования. При составлении и анализе схем замещения силовых многообмоточных трансформаторов использовались положения классической теории анализа и синтеза электрических цепей. Определение параметров схем замещения трансформаторов осуществлялось с использованием программ просмотра аварийных осциллограмм (Waves, Transcor и пр.).

Результаты. Методика моделирования двухобмоточных и многообмоточных трансформаторов. В [18, 19] формулируются следующие требования к формированию информационной модели силового трансформатора (среди прочих).

1. Для каждого силового трансформатора (*PowerTransformer*) должны быть созданы объекты класса «Корпус силового трансформатора» (*TransformerTank*) в количестве, соответствующем исполнению (трехфазное – один, однофазное – три). Учитывая ассоциативные связи в модели трансформатора (рис. 1), уместным будет считать, что однофазные трансформаторы должны иметь информационную/расчетную модель для каждой фазы, а не для трех сразу (наиболее приоритетно моделирование в фазных координатах).

2. Модель трансформатора не содержит модели отдельных обмоток, параметры обмоток

должны быть указаны в атрибутах объектов класса «Электрический вывод силового трансформатора» (*PowerTransformerEnd*) и «Технические параметры вывода трансформатора» (*TransformerEndInfo*) (указанное отличается подход, планируемый к использованию в РФ, от классического, где присутствует класс *TransformerWinding*).

3. Каждый объект класса «Электрический вывод силового трансформатора» (*PowerTransformerEnd*) должен иметь уникальное в пределах трансформатора значение атрибута «Номер обмотки» (*endNumber*), причем вывод с наивысшим классом напряжения должен иметь *endNumber* = 1, и далее – по убыванию величины номинального напряжения.

4. Для силовых трансформаторов, имеющих три и менее выводов, параметры обмоток заполняются для схемы замещения типа «звезда»; для трансформаторов, имеющих более трех выводов, – для схемы замещения типа «полный многоугольник» (*TransformerMeshImpedance*).

5. В классе *TransformerMeshImpedance* задаются для каждой ветви атрибуты, соответствующие сопротивлению не только прямой, но и нулевой последовательности трансформатора.

6. Для параметров $U_{K\%}$, ΔP_K опыта КЗ (*ShortCircuitTest*) должна быть указана полная мощность (*basePower*), к которой отнесена их величина.

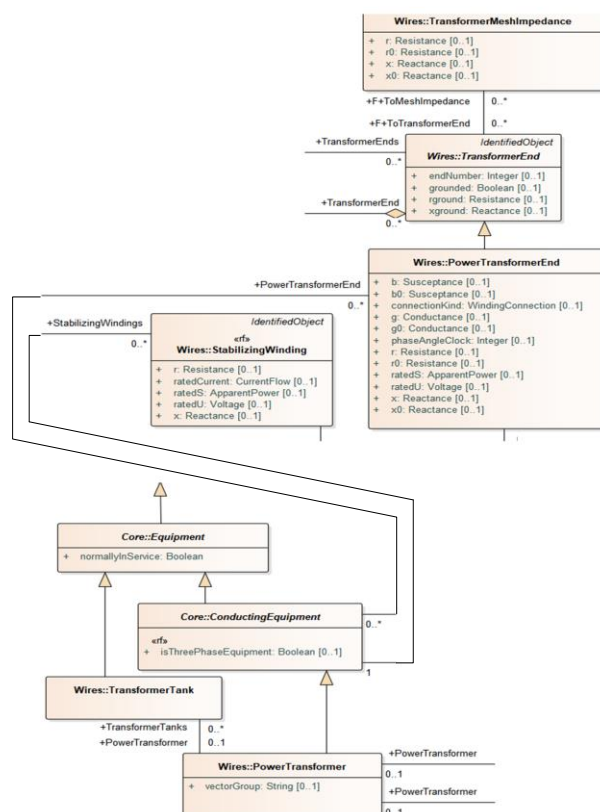


Рис. 1. Диаграмма классов, необходимая для описания информационной модели силового трансформатора (фрагмент)

Учитывая п. 4, а также иные приведенные в [18, 19] требования, классифицируем трансформаторы следующим образом:

- трехузловые (автотрансформаторы, двухобмоточные с расщеплением, трехобмоточные и др.) – моделируются с применением схемы замещения «звезда» (рис. 2,а);
- четырехузловые (трехобмоточные с расщеплением стороны НН, четырехобмоточные и пр.) и прочие N -узловые – моделируются с применением схемы замещения «многоугольник» (рис. 2,б).

Таким образом, разнообразные схемы замещения четырехузловых трансформаторов (рис. 3) (впрочем, как и любых N -узловых), согласно [11–13], должны быть приведены к единому стандарту (рис. 2); использование сопротивлений в классе PowerTransformerEnd (рис. 2,б) хоть и допустимо, но не является предпочтительным.

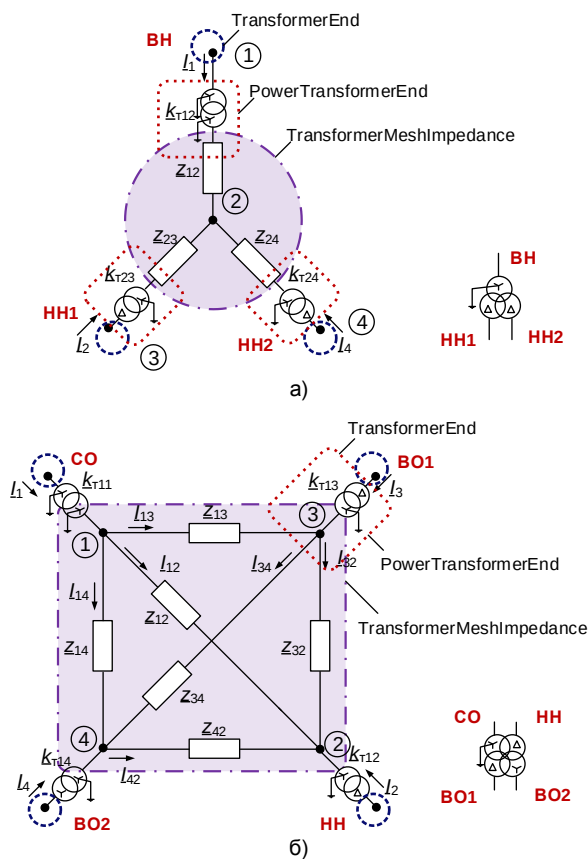


Рис. 2. Модели многообмоточных трансформаторов [18, 19]: а – 3-узловой трансформатор (на примере двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой НН); б – 4-узловой трансформатор (на примере преобразовательного трехобмоточного трансформатора с расщеплением «выпрямительной» обмотки на 2 части на ВПТ Выборг)

Анализ расчетных моделей электрических сетей 330–750 кВ, используемых в субъектах электроэнергетики, проектных организациях, показывает, что расчетные математические модели сетей для расчетов токов КЗ в целом

выполняются согласно [11–13, 20–22] и система, заложенная в ГОСТ по СИМ, в них практически не применяется (рис. 4, 5).

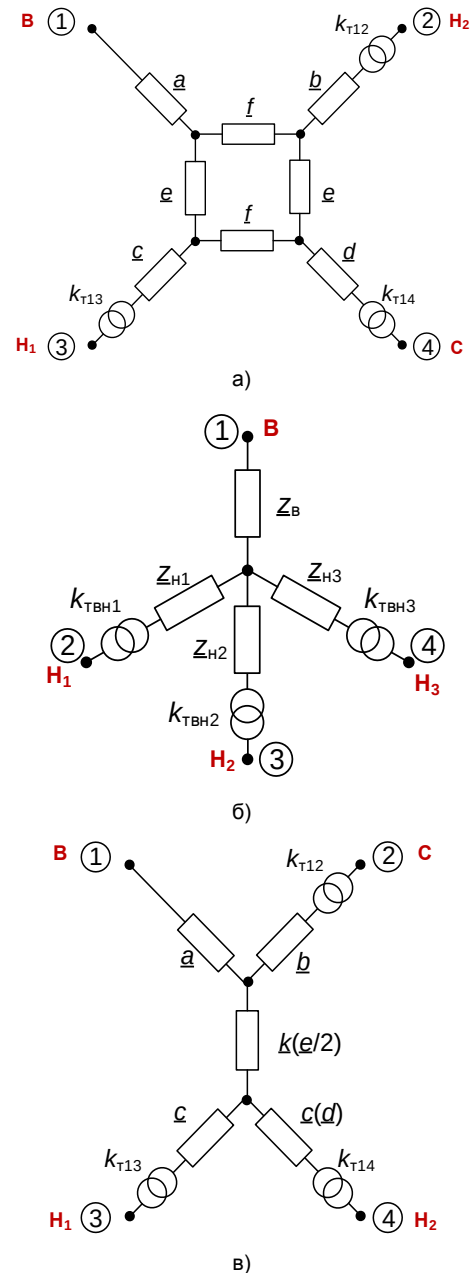


Рис. 3. Традиционно используемые схемы замещения для моделирования 4-узловых трансформаторов: а – четырехобмоточный трансформатор; б – двухобмоточный трансформатор с расщеплением обмотки НН на 3 части; в – трехобмоточный трансформатор с расщеплением обмотки НН на 2 части

Методика моделирования трансформаторов в рамках СИМ для расчетов токов КЗ (ТКЗ): апробация и ключевые вызовы. Залог успешного процесса создания расчетной модели для расчетов токов КЗ – полнота исходных данных (полнота информационной модели). Тем не менее зачастую паспорта многообмоточных трансформаторов редко содержат полный

набор величин ΔP_{ki-j} , а в ряде случаев – и u_{k^0i-j} , что затрудняет создание и информационной, и в некоторых случаях расчетных моделей в обобщенном виде (рис. 1, 2).

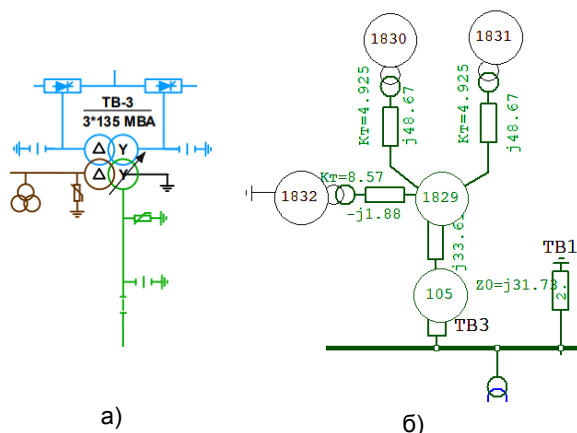


Рис. 4. Трансформатор ТВ-3 (ОДЦНП-135000/330/110) ПС 400 кВ Выборг (а) и его расчетная модель для расчетов ТКЗ (б) в программном комплексе APM SP3A

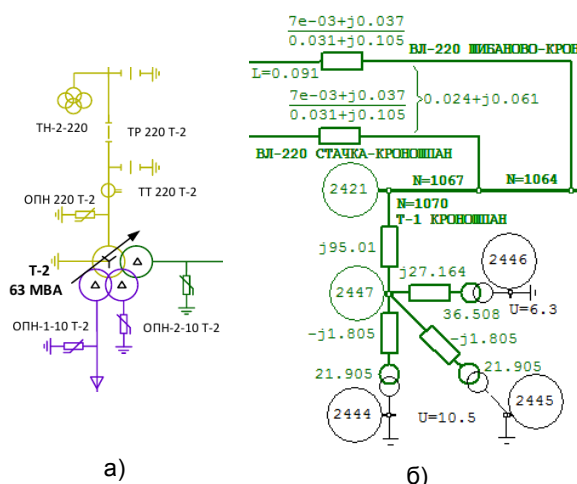


Рис. 5. Трансформатор Т-2 (ТРДН-63000/220У1) ПС 220 кВ Кроношпан (а) и его расчетная модель для расчетов ТКЗ (б) в программном комплексе АРМ СРЗА

Тем не менее величины ΔP_{ki-j} могут быть определены исходя из приведенных в паспортах значений сопротивлений отдельных обмоток (в соответствии с порядком осуществления опыта короткого замыкания для трехфазных автотрансформаторов) [22]:

$$\Delta P_{\text{KB-C}} = \left[3I_{\text{HOMBH}}^2 (R_{\text{BH}} - R_{\text{CH}}) + \right. \\ \left. + 3(I_{\text{HOMBH}} - I_{\text{HOMCH}})^2 \right] (1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)); \quad (1)$$

$$\Delta P_{\text{KB-H}} = \left[3I_{\text{HOMBH}}^2 R_{\text{BH}} k_s^2 + I_{\text{HOMHH}}^2 R_{\text{HH}} \right] \times (1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)); \quad (2)$$

$$\Delta P_{K-C-H} = \left[3I_{\text{HOMCH}}^2 R_{\text{CH}} k_s^2 + I_{\text{HOMHH}}^2 R_{\text{HH}} \right] \times (1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)), \quad (3)$$

где $k_s = S_{\text{номнн}} / S_{\text{ном}}$, R_{BH} , R_{CH} , R_{HH} – сопротивления обмоток ВН, СН, НН (из паспортных данных); θ_2 – температура, к которой приводим значения ΔP_{ki-j} ; θ_1 – температура, для которой посчитаны R_{BH} , R_{CH} , R_{HH} ; $\alpha = 1/273,15$ – температурный коэффициент.

Для большей простоты и наглядности рассмотрим определение значений $\Delta P_{k-i,j}$ для автотрансформаторов, расположенных в операционной зоне Костромского РДУ (табл. 1–3):

- 1) на Ивановских ПГУ (АТ-203 типа АТДЦТН-200000/230/121/38,3; $S_{\text{номНН}} = 80$ МВА);
- 2) на ПС 220 кВ Иваново (АТ-1, 2 типа АТДЦТН-200000/230/121/11; $S_{\text{номНН}} = 100$ МВА);
- 3) на ПС 220 кВ Кострома-2 (АТ-1, 2 типа АТДТН-125000/230/121/6,27; $S_{\text{номНН}} = 63$ МВА).

Таблица 1. Паспортные и расчетные параметры
АТ-203 Ивановских ПГУ

Параметр	Значение		
$R_{ВН}$, Ом	0,3898	(согласно паспорту, при 40°С)	
$R_{СН}$, Ом	0,1869	(согласно паспорту, при 40°С)	
$R_{НН}$, Ом	0,0320	(согласно паспорту, при 40°С)	
$I_{НОМВН}$, А	502	(согласно паспорту)	
$I_{НОМСН}$, А	954	(согласно паспорту)	
$I_{НОМНН}$, А	1206	(согласно паспорту)	
	значения ΔP_{ki-j} , U_{ki-j}	$\underline{Z}_{i-j}$, Ом	
$\Delta P_{КВ-Н}$, кВт	168 (пасп.)	106 (расч.)	1,389+j87,803
$U_{К\%В-Н}$	33,2	–	
$\Delta P_{КВ-С}$, кВт	365 (пасп.)	302 (расч.)	0,483+j27,504
$U_{К\%В-С}$	10,4	–	
$\Delta P_{КС-Н}$, кВт	184 (пасп.)	144 (расч.)	1,521+j52,614
$U_{К\%С-Н}$	19,9	–	
$\underline{Z}_В$, Ом	0,175+j31,343		(к 230 кВ)
$\underline{Z}_С$, Ом	0,307-j3,843		(к 230 кВ)
$\underline{Z}_Н$, Ом	1,213+j56,456		(к 230 кВ)

Таблица 2. Паспортные и расчетные параметры
АТ-1 ПС 220 кВ Иваново

Параметр	Значение		
$R_{ВН}$, Ом	0,3312	(согласно паспорту, при 38°С)	
$R_{СН}$, Ом	0,172	(согласно паспорту, при 38°С)	
$R_{НН}$, Ом	0,00396	(согласно паспорту, при 38°С)	
$I_{НОМВН}$, А	503	(согласно паспорту)	
$I_{НОМСН}$, А	955	(согласно паспорту)	
$I_{НОМНН}$, А	5250	(согласно паспорту)	
	значения ΔP_{ki-j} ; U_{ki-j}	$\underline{Z}_{j}$, Ом	
$\Delta P_{КВ-Н}$, кВт	365 (пасп.)	191 (расч.)	1,931+j84,618
$U_{К\%В-Н}$	32	–	
$\Delta P_{КВ-С}$, кВт	431 (пасп.)	240 (расч.)	0,57+j26,973
$U_{К\%В-С}$	10,2	–	
$\Delta P_{КС-Н}$, кВт	326 (пасп.)	257 (расч.)	1,725+j55,518
$U_{К\%С-Н}$	21	–	
$\underline{Z}_В$, Ом	0,175+j31,343		(к 230 кВ)
$\underline{Z}_С$, Ом	0,307-j1,063		(к 230 кВ)
$\underline{Z}_Н$, Ом	1,542+j56,582		(к 230 кВ)

Анализ данных табл. 1–3 показывает, что для Ивановских ПГУ паспортные значения ΔP_{ki-j}

и полученные с помощью расчетов по сопротивлениям обмоток $R_{обм}$ близки друг к другу, а для иных рассмотренных энергообъектов – отличаются в 1,5–2 раза. Указанное может быть обусловлено различием методик заводских испытаний трансформатора при снятии его различных параметров. Следовательно, производителям данного оборудования / субъектам электроэнергетики целесообразно разработать единую, физический непротиворечивую методику определения ΔP_{ki-j} , $R_{обм}$.

Таблица 3. Паспортные и расчетные параметры АТ-1 ПС 220 кВ Кострома-2

Параметр	Значение		
$R_{ВН}$, Ом	0,81	(согласно паспорту, при 30,5°С)	
$R_{СН}$, Ом	0,39	(согласно паспорту, при 30,5°С)	
$R_{НН}$, Ом	0,00205	(согласно паспорту, при 30,5°С)	
$I_{номВН}$, А	314	(согласно паспорту)	
$I_{номСН}$, А	596	(согласно паспорту)	
$I_{номНН}$, А	5801	(согласно паспорту)	
	значения ΔP_{ki-j} , U_{ki-j}	Z_{ij} , Ом	
$\Delta P_{КВ-Н}$, кВт	272 (пасп.)	147 (расч.)	3,625+j192,945
$U_{к\%В-Н}$	45,6	–	
$\Delta P_{КВ-С}$, кВт	296 (пасп.)	247 (расч.)	1,002+j47,811
$U_{к\%В-С}$	11,3	–	
$\Delta P_{КС-Н}$, кВт	275 (пасп.)	198 (расч.)	3,665+j124,367
$U_{к\%С-Н}$	29,4	–	
Z_B , Ом	0,481+j58,195		(к 230 кВ)
Z_C , Ом	0,521-j10,384		(к 230 кВ)
Z_H , Ом	3,144+j134,75		(к 230 кВ)

В связи с этим необходимо (по возможности) актуализировать методики измерения ΔP_{ki-j} и $R_{обм}$ для их приведения к единой физической основе в целях развития возможности использования данных параметров для наполнения информационных/расчетных моделей. Указанные сопротивления хоть и невелики, но представляют интерес при расчетах апериодических составляющих токов КЗ и времени до насыщения трансформаторов тока.

Методика, описанная выше, была использована при определении параметров расчетных моделей четырехузловых трансформаторов нескольких типов (табл. 4–6):

- четырехобмоточного (ПС 220 кВ Кроношпан) (рис. 3,а);
- трехобмоточного с расщеплением вентильной обмотки на 2 части (ПС 330 кВ Выборг) (рис. 3, в);
- двухобмоточного с расщеплением обмотки НН на 3 части (Жигулевская ГЭС) (рис. 3, б).

Расчетные модели основаны на схеме, показанной на рис. 2, и могут быть получены путем эквивалентных преобразований из схем на рис. 3.

Нетрудно заметить, что в трансформаторах с расщепленными обмотками ряд межузловых сопротивлений вырождается. Таким образом, при отсутствии данных для их расчетов (что часто

бывает) их можно принимать равными бесконечности и исключать из расчетной модели (рис. 2).

Таблица 4. Параметры расчетной модели трансформатора ТРДТН-63000/220У1 на ПС 220 кВ Кроношпан ($S_{баз} = 63$ МВА) (приведены к базисному напряжению 230 кВ)

Класс атрибута – TransformerMeshImpedance		Класс атрибута – TransformerTest	
Номера выводов	Z_{ij} , Ом	U_k , % (voltage)	ΔP_k , кВт (loss)
12 (В-С)	15040-j · 1835	18,65	467,314
13 (В-Н2)	-855-j · 875	15,2	219,757
14 (В-Н1)	6,79+j · 87,8	11,1	229,46
23 (С-Н2)	6,23+j · 22,9	3,02	414,613
24 (С-Н1)	-245-j · 226	7,12	424,316
34 (Н1-Н2)	4,35+j · 27,9	3,67	176,759

Таблица 5. Параметры расчетной модели трансформатора ОДЦТНП-135000/330/110 (ТВ-4) на ПС 400 кВ Выборг ($S_{баз} = 135$ МВА) (приведены к базисному напряжению 330 кВ)

Класс атрибута – TransformerMeshImpedance		Класс атрибута – TransformerTest	
Номера выводов	Z_{ij} , Ом	U_k , % (voltage)	ΔP_k , кВт (loss)
12 (СО-Н)	1,56+j · 44,0	17,4	532,17
13 (СО-ВО1)	-351,8-j · 1501	42,373	919,377
14 (СО-ВО2)	-351,8-j · 1501	42,373	919,377
23 (Н-ВО1)	1,94+j · 60,8	23,573	739,69
24 (Н-ВО2)	1,94+j · 60,8	23,573	739,69
34 (ВО1-ВО2)	∞	47,093	1510

Таблица 6. Параметры расчетной модели трансформатора ОРЦ-135000/500-77У1 на Жигулевской ГЭС ($S_{баз} = 135$ МВА) (приведены к базисному напряжению 500 кВ)

Класс атрибута – TransformerMeshImpedance		Класс атрибута – TransformerTest	
Номера выводов	Z_{ij} , Ом	U_k , % (voltage)	ΔP_k , кВт (loss)
12 (В-Н2)	4,7+j · 268,3	40,044	390,881
13 (В-Н3)	4,65+j · 265,1	39,564	390,881
14 (В-Н1)	4,6+j · 261,7	39,054	390,881
23 (Н2-Н3)	-16300-j · 24360	80,22	250,191
24 (Н2-Н1)	-16090-j · 24050	79,71	250,191
34 (Н1-Н3)	-15900-j · 23760	79,23	250,191

Методика верификации расчетных моделей силовых трансформаторов с использованием аварийных осциллограмм. Модели оборудования должны верифицироваться теми организациями, в пределах которых они используются (например, в АО «СО ЕЭС» требование к верификации математических моделей сети для расчета токов КЗ обозначено в [10]). Одним из методов верификации является метод «модель–авария», при котором сопоставляются результаты расчетов токов и напряжений в математической модели сети и в реальности (по данным с регистраторов аварийных событий). Приемлемой

считается точность расчета, соответствующая относительной погрешности 5–10 %.

Следует отметить, что такой способ верификации охватывает участок энергосистемы целиком и не позволяет оценить погрешности в расчетах параметров отдельных единиц оборудования (например, трансформаторов, их сопротивлений прямой и нулевой последовательностей). В связи с этим актуальна разработка способа верификации ММС методом «модель отдельного энергообъекта – повреждение».

Согласно [11] (1979 г.), сопротивление нулевой последовательности трансформатора следует принимать приближенно равным 75–90 % от его сопротивления прямой последовательности: $x_{0T} = (0,75–0,9) \cdot x_{1T}$; согласно [12] (1998 г.) – $x_{0T} = 1,0 \cdot x_{1T}$, согласно [10] (2020 г.) – $x_{0T} = (0,8–1,0) \cdot x_{1T}$. Очевидно, что для трансформаторов со сложной конфигурацией обмоток (двухобмоточных трансформаторов с расщеплением, автотрансформаторов и др.) такое приближение может оказаться некорректным.

Методика верификации моделей силовых трансформаторов зависит от их конфигурации (схемы соединения обмоток), режима нейтрали и других факторов.

Так, для двухобмоточных силовых трансформаторов с $U_{номВН} \geq 110$ кВ (рис. 6) сопротивления прямой и нулевой последовательностей могут быть получены из следующих выражений:

$$\dot{U}_{1(1)} - \dot{U}_{2(1)} k_{T(1)} = \dot{i}_{1(1)} z_{1T}; \quad (4)$$

$$\dot{U}_{1(0)} = \dot{i}_{1(0)} z_{0T}, \quad (5)$$

где z_{1T} , z_{0T} – сопротивления прямой и нулевой последовательностей трансформатора; $\dot{U}_{1(1)}$, $\dot{U}_{1(0)}$, $\dot{U}_{2(1)}$ – напряжения прямой и нулевой последовательностей в узлах 1 и 2; $\dot{i}_{1(1)}$, $\dot{i}_{1(0)}$ – токи прямой и нулевой последовательностей в узлах 1 и 2; $k_{T(1)}$ – коэффициент трансформации в схеме замещения прямой последовательности.

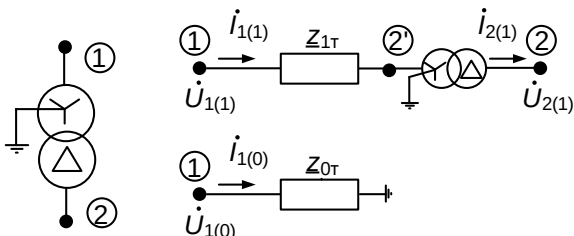


Рис. 6. Двухобмоточный трансформатор с группой соединения обмоток Y_0/D с $U_{номВН} \geq 110$ кВ

Для трехобмоточных силовых трансформаторов с $U_{номВН} \geq 110$ кВ (рис. 7) сопротивления прямой и нулевой последовательностей могут быть получены из следующих выражений:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1(1)} - \dot{U}_{2(1)} k_{T12(1)} &= \\ &= \dot{i}_{1(1)} z_{1B} + \dot{i}_{2(1)} z_{1H} / k_{T12(1)}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1(1)} - \dot{U}_{3(1)} k_{T13(1)} &= \\ &= \dot{i}_{1(1)} z_{1B} + \dot{i}_{3(1)} z_{1C} / k_{T13(1)}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{3(1)} k_{T13(1)} - \dot{U}_{2(1)} k_{T12(1)} &= \\ &= -\dot{i}_{3(1)} z_{1C} / k_{T13(1)} + \dot{i}_{2(1)} z_{1H} / k_{T12(1)}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\dot{U}_{1(0)} = \dot{i}_{1(0)} (z_{0B} + z_{0H}) = \dot{i}_{1(0)} z_{0T}. \quad (9)$$

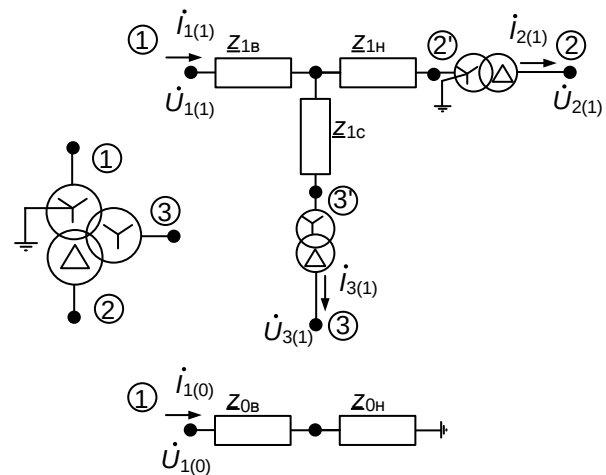


Рис. 7. Трехобмоточный трансформатор с группой соединения обмоток $Y_0/Y/D$ с $U_{номВН} \geq 110$ кВ

В целом, возможно сформулировать последовательность верификации модели по следующему алгоритму:

- определение полноты исходных данных (осциллограмм);
- оценка корректности осциллограмм (отсутствие шумов, насыщение трансформаторов тока и пр.);
- расчеты симметричных составляющих токов и напряжений на сторонах трансформатора;
- расчеты коэффициентов трансформации трансформаторов в текущем аварийном (или доаварийном) режиме с использованием значений токов на сторонах:

$$k_{Tij(1)} = \frac{\dot{i}_{j(1)}}{\dot{i}_{i(1)}}, \quad (10)$$

при отсутствии замеров токов на сторонах расчет по напряжениям на сторонах в доаварийном режиме (менее предпочтительно):

$$k_{Tij(1)} = \frac{\dot{U}_{j(д/ав)}}{\dot{U}_{i(д/ав)}}; \quad (11)$$

д) определение параметров схемы замещения трансформатора, которые могут быть определены для той анцапфы устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), которой соответствует коэффициент трансформации по (10) и/или (11);

е) оценка полученных результатов и возможная корректировка расчетной модели при формировании устойчивых массивов данных по авариям.

Отметим, что для параметров схем замещения на рис. 6, 7 могут быть использованы не только вектора токов / напряжений, но и их мгновенные значения. Так, для схемы замещения нулевой последовательности на рис. 6 справедливо следующее соотношение:

$$3u_0(t) = R_{0T} \cdot 3i_0(t) + L_{0T} \frac{d3i_0(t)}{dt}, \quad (12)$$

что в дискретном виде примет вид

$$3u_{0n} = R_{0T} \cdot 3i_{0n} + L_{0T} \frac{3i_{0n} - 3i_{0n-1}}{\Delta t}, \quad (13)$$

где R_{0T} , L_{0T} – сопротивление и индуктивность нулевой последовательности трансформатора; Δt – частота дискретизации осциллографа.

Для ориентировочной оценки Z_{0T} слагаемым $R_{0T} \cdot 3i_{0n}$ можно пренебречь в силу (как будет показано ниже) его малой величины, тогда значение L_{0T} будет определено следующим образом:

$$L_{0T} \approx \frac{\Delta t \cdot 3u_{0n}}{3i_{0n} - 3i_{0n-1}}, \quad (14)$$

при возможности фиксации момента перехода тока нулевой последовательности через ноль ($3i_{0n} = 0$) значение L_{0T} определяется как

$$L_{0T} = \frac{\Delta t \cdot 3u_{0n} (3i_{0n} = 0)}{-3i_{0n-1} (3i_{0n} = 0)}. \quad (15)$$

В ходе исследования необходимо обозначить следующие проблемные моменты, ограничивающие применение предложенной методики.

1. В настоящее время нет однозначно принятой методики расчета сопротивлений многообмоточных трансформаторов при промежуточных положениях РПН. Существуют три подхода к их определению:

а) параболическая аппроксимация по трем наборам напряжений КЗ (PowerFactory) [23]:

$$u_{k\%i-j}(n) = k_1^2 n + k_2 n + k_3, \quad (16)$$

где n – номер анцапфы РПН;

б) линейная аппроксимация (Энергосетьпроект, типовая работа №5481тм-Т1 [24]):

$$u_{k\%}^+(n) = u_{\text{кном}\%} + \frac{n_+}{N_{\text{кр}}} (u_{\text{ккр}\%}^+ - u_{\text{кном}\%}); \quad (17)$$

$$u_{k\%}^-(n) = u_{\text{кном}\%} + \frac{n_-}{N_{\text{кр}}} (u_{\text{ккр}\%}^- - u_{\text{кном}\%}), \quad (18)$$

где $N_{\text{кр}}$ – число ступеней регулирования от среднего до крайнего положения РПН; n_+ , n_- – ступень регулирования в сторону повышения (понижения) напряжения, для которой ведем расчет;

в) степенная аппроксимация (Ю.С. Беляков, ПЭИПК, 1995 г. [24]):

$$u_{k\%}^+(n) = u_{\text{кном}\%} \left(1 + \frac{n_+ \Delta u_{\%}}{100\%} \right)^{k_+}; \quad (19)$$

$$u_{k\%}^-(n) = u_{\text{кном}\%} \left(1 + \frac{n_- \Delta u_{\%}}{100\%} \right)^{k_-}, \quad (20)$$

где

$$k_+ = \frac{\lg \left(\frac{u_{\text{ккр}\%}^+}{u_{\text{кном}\%}} \right)}{\lg \left(1 + \frac{N_{\text{кр}} \Delta u_{\%}}{100\%} \right)}; \quad (21)$$

$$k_- = \frac{\lg \left(\frac{u_{\text{ккр}\%}^-}{u_{\text{кном}\%}} \right)}{\lg \left(1 - \frac{N_{\text{кр}} \Delta u_{\%}}{100\%} \right)}. \quad (22)$$

На рис. 8 для примера показаны значения сопротивления $X_{\text{С-Н}}$, $X_{\text{В-С}}$ ($X_{\text{В-Н}} = \text{const}$, так как РПН находится на стороне СН) автотрансформатора связи Ивановских ПГУ АТ-203 АТДЦТН-200000/220 У1 при использовании различных подходов при различных положениях анцапф РПН (приведены к стороне 220 кВ).

Для указанного автотрансформатора была проанализирована аварийная ситуация, связанная с однофазным КЗ вблизи шин 110 кВ Ивановских ПГУ (2019 г.) (рис. 9).

Определено отношение токов на сторонах СН и ВН в доаварийном режиме: $k_T = 119,4/59,12 = 2,019$, что соответствует 12-й анцапфе ($U_{\text{СН}} = 113,74$ кВ). Для данной анцапфы было определено сопротивление $Z_{\text{В-С}}$ по осциллограмме (по токам прямой и обратной последовательности), а также по диаграммам на рис. 8 (табл. 7).

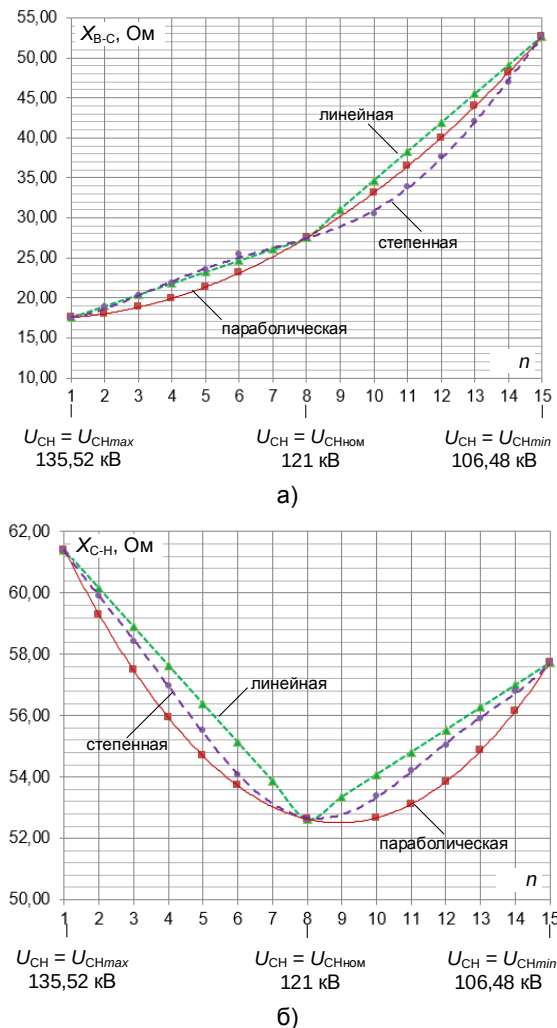


Рис. 8. Значения сопротивлений X_{b-c} (а), X_{c-n} (б) автотрансформатора АТДЦТН-200000/220 У1 при использовании различных подходов к их расчету при промежуточных анцапфах РПН

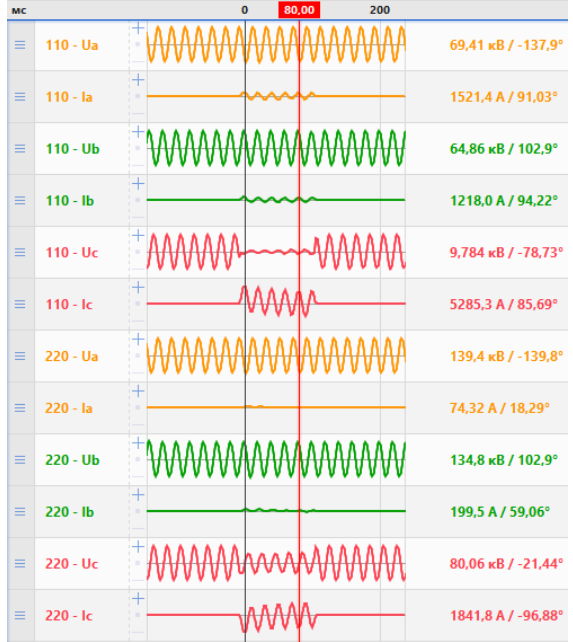


Рис. 9. Осциллограммы токов и напряжений на сторонах 110 и 220 кВ АТ-203 Ивановских ПГУ, записанные в ходе развития аварийного события в 2019 г.

Таблица 7. Результаты определения сопротивления АТ-203 Ивановских ПГУ (X_{b-c})

Рассчитываемая величина	Осциллограмма	Аппроксимация	
$Z_{1b}+Z_{1c}$, Ом	$5,31+j36,54$	$0,59+j40,03$	параболическая
$Z_{2b}+Z_{2c}$, Ом	$-1,11+j37,36$	$0,62+j41,89$	линейная
		$0,59+j37,67$	степенная

Анализ данных табл. 7 показывает, что лучшую сходимость с расчетным (по осциллограмме) результатом определения реактивного сопротивления дает степенная аппроксимация. Однако стоит отметить, что указанная проблема требует более глубокой проработки.

2. Различные программы для просмотра аварийных осциллограмм могут по-разному вычислять значения симметричных составляющих токов, особенно при их относительно небольших значениях, сопоставимых с токами нагрузки (100–400 А), поэтому токи и напряжения симметричных составляющих целесообразно рассчитывать самостоятельно с применением формул, известных из классической электротехники (рис. 10).

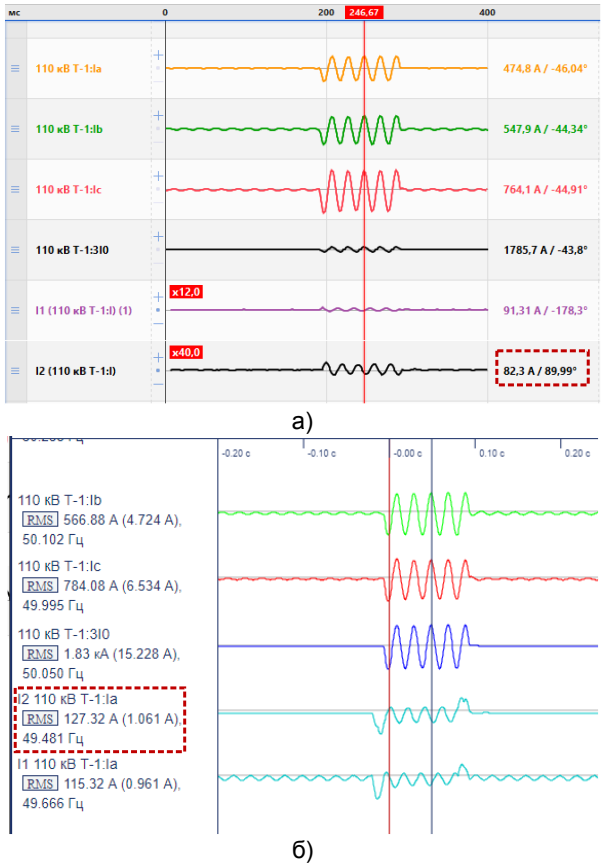


Рис. 10. Результаты расчета тока обратной последовательности в программных комплексах Waves (а) и Transcop (б)

Верификация расчетных моделей силовых трансформаторов с использованием аварийных осциллограмм: практический аспект. Рассмотрим реализацию методики верификации параметров трансформаторов на двух типовых примерах:

– двухобмоточный трансформатор с двусторонним питанием;
– трехобмоточный трансформатор с двусторонним питанием.

1. Двухобмоточные трансформаторы с двусторонним питанием. Определение их сопротивлений нулевой последовательности.

Рассмотрим двухобмоточный трансформатор ТДЦ-125000/110 (ЗТ Ивановской ТЭЦ-3) с параметрами: $S_{\text{ном}} = 125 \text{ МВА}$; $u_k\% = 10,6\%$; $\Delta P_k = 413 \text{ кВт}$; $U_{\text{номВН}} = 121 \text{ кВ}$. Согласно расчетам [11], сопротивление прямой последовательности трансформатора составляет $z_{1T} = 0,387 + j12,39 \text{ Ом}$. Анализ результатов расчета дал следующие результаты (рис. 11, 12):

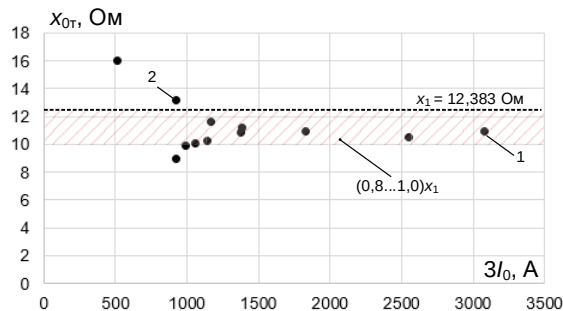
– расчетные значения x_{0T} значительно ниже, чем значения x_{1T} , причем в ряде случаев ниже диапазонов, указанных в [11–13];

– с ростом величины $3I_0$ (т.е. с приближением места КЗ к электростанции) расчетная величина x_{0T} снижается и устанавливается на уровне $\sim 0,75x_{1T}$, т.е. при больших значениях токов и напряжений нулевой последовательности получаем более точный результат в части определения параметров трансформатора;

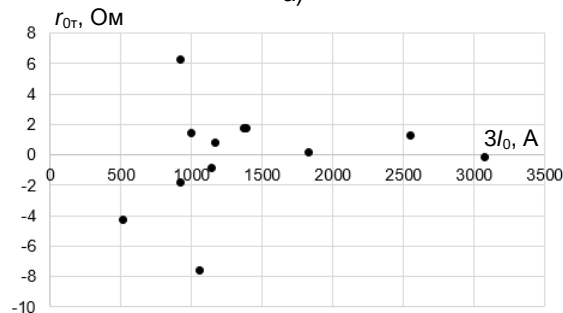
– в полученных значениях r_{0T} отсутствует некое медианное значение, что связано с величиной $r_{0T} \ll x_{0T}$, находящейся, по сравнению с x_{0T} , в пределах погрешности;

– для трансформатора 2Т расчетное значение $x_{0T} > x_{1T\text{пасп.}}$.

Таким образом, задача определения параметров нулевой последовательности трансформаторов по аварийным осциллограммам требует в каждом случае индивидуального расчета, а проблема в целом – имитационного моделирования.



а)



б)

Рис. 11. Зависимости реактивного x_{0T} и активного r_{0T} сопротивлений нулевой последовательности трансформатора ЗТ Ивановской ТЭЦ-3 от замеренного напряжения нулевой последовательности на шинах электростанции для ряда замеров

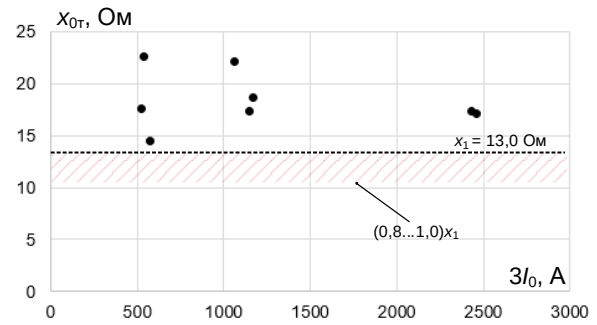
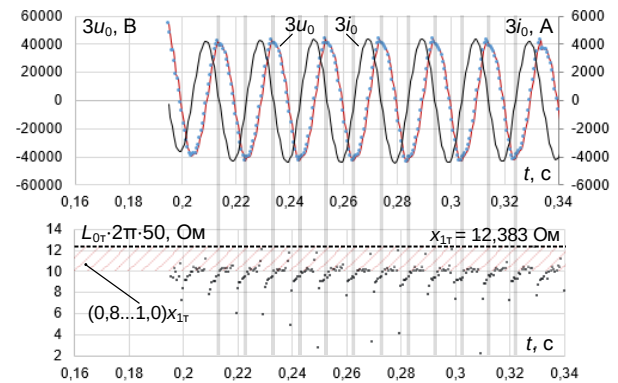


Рис. 12. Зависимости реактивного сопротивления нулевой последовательности x_{0T} трансформатора 2Т Ивановской ТЭЦ-3 от замеренного напряжения нулевой последовательности на шинах электростанции для ряда замеров

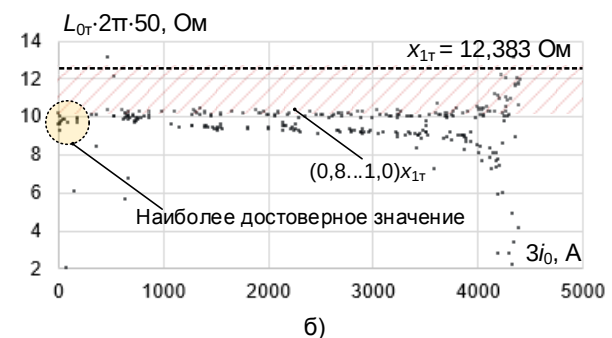
При использовании мгновенных значений токов и напряжений нулевой последовательности и выражений (14), (15) значения x_{0T} получаются схожими с полученными выше (табл. 8, рис. 13, 14).

Таблица 8. Сравнение данных по сопротивлениям трансформаторов, полученных с помощью векторных вычислений $x_{0T}(\text{вект.})$ и с помощью анализа мгновенных значений токов и напряжений $x_{0T}(\text{мгнов.})$

Осциллограмма	$x_{0T}(\text{вект.}), \text{ Ом}$	$x_{0T}(\text{мгнов.}), \text{ Ом}$
1 (рис. 11, 13)	9,588	10,0...10,2
2 (рис. 11, 14)	11,058	9,5...11,0.



а)



б)

Рис. 13. Осциллограммы токов и напряжений нулевой последовательности (рис. 11, осциллограмма 1), диаграмма изменения величины x_{0T} трансформатора ЗТ Ивановской ТЭЦ-3 (а), а также зависимость x_{0T} от мгновенного значения тока $3i_0(t)$ (б)

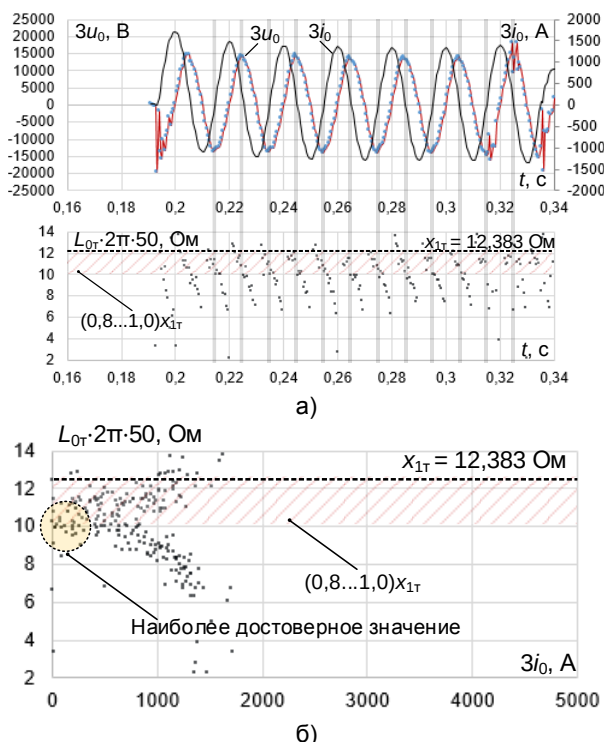


Рис. 14. Осциллограммы токов и напряжений нулевой последовательности (рис. 11, осциллограмма 2), диаграмма изменения величины x_{0T} трансформатора 3Т Ивановской ТЭЦ-3 (а), а также зависимость x_{0T} от мгновенного значения тока $3i_0(t)$ (б)

Нетрудно заметить, что результаты анализа мгновенных значений коррелируют с результатами анализа векторных соотношений токов и напряжений (и не только в момент времени, когда $3i_{0n} = 0$). Расхождение значений индуктивности при экстремальных значениях $3i_0$ связано с относительно малой величиной $3i_{0n} - 3i_{0n-1}$ на экстремуме синусоиды тока.

В связи с этим становится возможным использовать метод, основанный на анализе мгновенных значений, в тех случаях, когда мгновенное значение токов не является достоверным на всем протяжении осциллограммы, например при насыщении трансформаторов тока.

Рассмотрим блочный трансформатор ТДЦ-160000/220-У1, расположенный на территории другой электростанции в центральной России со следующими параметрами: $S_{ном} = 160$ МВА; $u_{k\%} = 11,2\%$; $\Delta P_k = 415$ кВт; $U_{номВН} = 242$ кВ.

Нетрудно заметить, что в рассматриваемой ситуации при внешнем однофазном КЗ трансформаторы тока насытились (рис. 15).

Значения x_{0T} , полученные для малых токов, в данном случае не являются достоверными, так как отсутствуют фиксированные моменты перехода тока через ноль из-за насыщения. В то же время значения x_{0T} , полученные для больших токов $3i_0$, являются достоверными, так как они не сопряжены с максимумом синусоидальной величины.

Значение сопротивления x_{0T} , согласно полученной оценке, составляет 20–28 Ом, что в относительных единицах составляет $x_{0T} = (0,5-0,7) \cdot x_{1T}$,

что значительно меньше тех значений, которые указаны в нормативных документах.

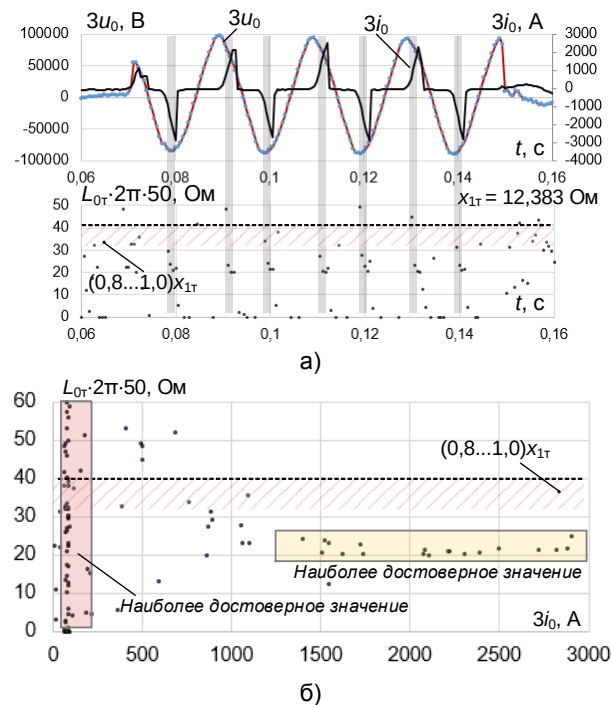


Рис. 15. Осциллограммы токов и напряжений нулевой последовательности, диаграмма изменения величины x_{0T} блочного трансформатора ТДЦ-160000/220-У1 (а), а также зависимость x_{0T} от мгновенного значения тока $3i_0(t)$ (б)

2. *Трехобмоточные трансформаторы с двусторонним питанием. Определение их сопротивлений прямой и нулевой последовательностей.* Рассмотрим подобные трансформаторы на примере Т2 на ПС 110 кВ Ивановская-6 (ТДТН-63000/110/35/6) с номинальными параметрами: $S_{ном} = 63$ МВА; $u_{kBC\%} = 9,9\%$; $u_{kCH\%} = 6,7\%$; $u_{kBH\%} = 17,6\%$; $U_{ном} = 115/38,5/6,6$ кВ.

Регистратор аварийных событий «Парма» записывает значения фазных токов и напряжений на сторонах 110 и 35 кВ. Указанный массив данных не позволяет определить отдельные сопротивления в схеме замещения по рис. 7. Для определения доступны лишь величины:

$$Z_{1BC} = Z_{1B} + Z_{1C}; \quad (23)$$

$$Z_{0T} = Z_{0B} + Z_{0H}. \quad (24)$$

При определении паспортных значений трансформатора использовалась информация об актуальном положении РПН и подход, описанный выше на примере Ивановских ПГУ.

Результаты определения величины Z_{0T} для 20 событий, связанных с однофазными КЗ (2015–2021 г.), приведены на рис. 16, 17.

Порядок расчета и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

– сопротивление нулевой последовательности трансформатора составляет 0,81–0,93 от значения соответствующей суммы $Z_{1B} + Z_{1H}$, имеваемой на рис. 14 «паспортными данными»;

– лучшая сходимость паспортных и расчетных (по осциллограммам) результатов наблюдается только при значениях первичных токов, превышающих величину $(0,4–0,6) I_{1\text{номТТ}}$, поэтому для оценки параметров схем замещения трансформаторов наиболее целесообразно использовать электрические величины указанного порядка ($I_{1\text{расч}}, I_{2\text{расч}}, 3I_{0\text{расч}} > 0,4 I_{1\text{номТТ}}$ и выше), вплоть до тех уровней, пока трансформатор тока не насытится (в таком случае необходимо использовать отдельный алгоритм восстановления сигнала трансформатора тока при его насыщении);

– рассчитанные по осциллограммам значения сопротивлений прямой и обратной последовательностей близки друг другу, что косвенно подтверждает допустимость верификации модели трансформатора по значениям симметричных составляющих.

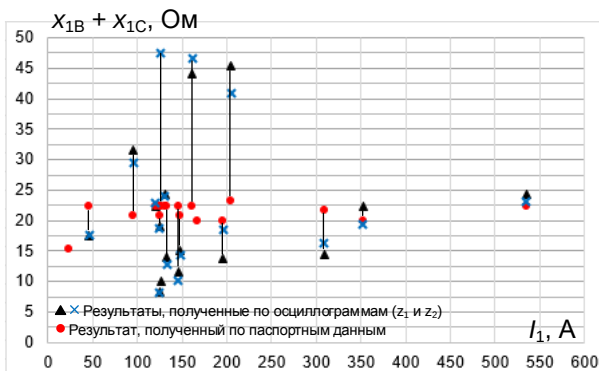


Рис. 16. Зависимости реактивного сопротивления прямой и обратной последовательностей $x_{1В} + x_{1С}$ трансформатора 1Т ПС 110 кВ Ивановская-6 от замеренного тока прямой последовательности через его обмотку ВН

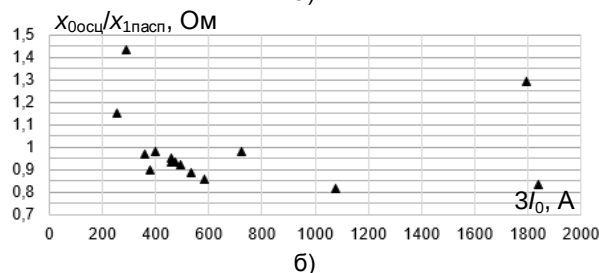
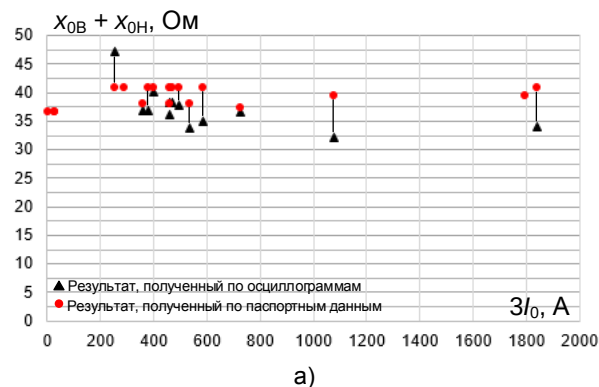


Рис. 17. Зависимости реактивного сопротивления нулевой последовательности $x_{0Т}$ трансформатора 1Т ПС 110 кВ Ивановская-6 от замеренного тока нулевой последовательности через его обмотку ВН (а) и рассчитанное отношение $x_{0Т} / (x_{1В} + x_{1С})$ (б)

Выводы. Аварийные осциллограммы являются средством, достаточным для определения/верификации параметров схем замещения силовых трансформаторов (в том числе и в особенности нулевой последовательности), однако существует ряд ограничений их применения:

– для определения параметров расчетных моделей трансформаторов целесообразно использовать электрические величины существенного порядка ($I_{1\text{расч}}, I_{2\text{расч}}, 3I_{0\text{расч}} > 0,4 I_{1\text{номТТ}}$ и выше), вплоть до тех уровней, при которых происходит насыщение трансформаторов тока;

– при насыщении трансформаторов тока, если не использовать алгоритмы восстановления формы кривой тока, для определения параметров схемы замещения нулевой последовательности трансформаторов может быть использован только метод, основанный на анализе мгновенных значений токов и напряжений;

– активное сопротивление трансформаторов затруднительно определить по аварийным осциллограммам;

– индуктивное сопротивление нулевой последовательности трансформаторов в большинстве случаев находится в указанных в нормативных документах пределах, но в ряде случаев может достигать $x_{0Т} = (0,5–0,7) x_{1Т}$.

Список литературы

1. Юсупов И.Х. АО «Концерн Росэнергоатом»: опыт внедрения общей информационной модели // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 6(81). – С. 16–17.
2. Богомолов Р.А. Создание CIM-модели в АО «СО ЕЭС» // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 2(65). – С. 26–31.
3. Волкова Т. Перспектива обмена данными информационных моделей в электроэнергетике между субъектами электроэнергетики в АО «Россети Тюмень» в соответствии со стандартом CIM // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № S3(30). – С. 10–12.
4. Головинский И.А. Об основах национальных стандартов цифровой трансформации в электроэнергетике // Энергоэксперт. – 2022. – № 1(81). – С. 68–72.
5. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 20.12.2022 № 1340 «Об утверждении Правил предоставления информации, необходимой для осуществления оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике» (Зарег. 16.03.2023 № 72599).
6. Шишков Е.М. Применение CIM-модели для расчета установившихся режимов многоцепных воздушных линий электропередачи // Путь к новому пониманию: интеграция междисциплинарных исследований в современную науку и практику: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Иркутск, 25 октября 2024 года. – Уфа: ООО «Аэтерна», 2024. – С. 31–33.
7. Хитрич Д.О. Вопросы интеграции формата CIMXML в процессы формирования перспективных расчетных моделей // Новая наука: от идеи к результату. – 2025. – № 5. – С. 234–243.
8. Системный оператор: в энергетике обеспечен сквозной процесс моделирования на базе CIM

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eepir.ru/new/sistemnyj-operator-v-nbsp-energetike-obespechen-skvoznoj-process-modelirovaniya-na-nbsp-baze-cim/> [Дата обращения 22.04.2026].

9. **Методические** указания по составлению расчетных моделей электроэнергетических систем для проведения расчетов электрических режимов. – М.: АО «СО ЕЭС», 2011.

10. **Требования** к формированию и актуализации математических моделей электрической сети для расчета параметров аварийного режима. Утв. распоряжением № 68р АО «СО ЕЭС» от 19.06.2020 г. – М.: АО «СО ЕЭС», 2020. – 18 с.

11. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. – М.: Изд-во «Энергия», 1979. – 152 с.

12. **Руководящие** указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 149 с.

13. **ГОСТ Р 52735-2007** Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293837/4293837777.pdf> [Дата обращения 22.04.2026].

14. **ГОСТ Р 58669-2019** Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/738/73857.pdf?ysclid=moale3esnk482082003> [Дата обращения 22.04.2026].

15. **Засыпкин А.С.** Релейная защита трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.

16. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 09. Дифференциально-фазная высококачественная защита линий 110–330 кВ. – М.: Энергия, 1972. – 115 с.

17. **Кутумов Ю.Д., Цветков М.И.** Исследование влияния бросков намагничивающего тока трансформаторов на устойчивость функционирования измерительных органов релейной защиты в целях совершенствования методик выбора их уставок // Вестник ИГЭУ. – 2025. – Вып. 4. – С. 28–37.

18. **ГОСТ Р 58651.3-2020** Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Информационная модель электроэнергетики. Профиль информационной модели линий электропередачи и электросетевого оборудования напряжением 110–750 кВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573115945> [Дата обращения 02.04.2026].

19. **ГОСТ Р 58651.X** (проект национального стандарта ПНС1.15.016-1.287.24). Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Информационная модель электроэнергетики. Профиль информационного обмена и требования к цифровым информационным моделям электроэнергетических систем. – М.: Росстандарт, 2025. – 210 с.

20. **Лейтес Л.В., Пинцов А.М.** Схемы замещения многообмоточных трансформаторов. – М.: Энергия, 1974. – 192 с.

21. **Полевой В.А.** Схемы замещения трансформаторов с расщепленными обмотками. – М.: Электричество, 1949. – 96 с.

22. **Залышкин М.Д.** Выбор трансформаторов в энергетических системах. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 96 с.

23. **DigSilent PowerFactory: knowledge base** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.digsilent.de/en/faq-powerfactory.html> [Дата обращения 22.04.2026].

24. **Методические** указания по расчету и выбору параметров настройки дистанционных защит линий электропередачи 110 кВ и выше. Утв. распоряжением АО «СО ЕЭС» от 17.08.2021 № 89р. – М.: АО «СО ЕЭС», 2021. – 295 с.

References

1. Yusupov, I.Kh. AO «Kontsern Rosenergoatom»: opyt vnedreniya obshchey informatsionnoy modeli [JSC Rosenergoatom Concern: experience in implementing a common information model]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2023, no. 6(81), pp. 16–17.

2. Bogomolov, R.A. Sozdanie CIM-modeli v AO «SO EES» [Creating a CIM model at JSC SO UPS]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2021, no. 2(65), pp. 26–31.

3. Volkova, T. Perspektiva obmena dannymi informatsionnykh modeley v elektroenergetike mezhdub sub"ektami elektroenergetiki v AO «Rosseti Tyumen'» v sootvetstviy so standartom CIM [Prospect of data exchange of information models in the electric power industry between electric power entities at Rosseti Tyumen JSC in accordance with the CIM standard]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2023, no. S3(30), pp. 10–12.

4. Golovinskiy, I.A. Ob osnovakh natsional'nykh standartov tsifrovoy transformatsii v elektroenergetike [On the basis of national standards for digital transformation in the electric power industry]. *Energoekspert*, 2022, no. 1(81), pp. 68–72.

5. *Prikaz Ministerstva energetiki Rossiyskoy Federatsii ot 20.12.2022 № 1340 «Ob utverzhdenii Pravil predostavleniya informatsii, neobkhodimoy dlya osushchestvleniya operativno-dispatcherskogo upravleniya v elektroenergetike» (Zareg. 16.03.2023 № 72599)* [Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated December 20, 2022 No. 1340 "On Approval of the Rules for Providing Information Necessary for Operational Dispatch Management in the Electric Power Industry" (Registered on March 16, 2023 No. 72599)].

6. Shishkov, E.M. Primenenie CIM-modeli dlya rascheta ustanovivshikhsya rezhimov mnogotsepykh vozdukhnykh liniy elektroperedachi [Application of the CIM model for calculating steady-state conditions of multi-circuit overhead power transmission lines]. *Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Put' k novomu ponimaniyu: integratsiya mezhdistsiplinarnykh issledovaniy v sovremennuyu nauku i praktiku»*, Irkutsk, 25 oktyabrya 2024 goda [Proceedings of international scientific and practical conference "The Way to a New Understanding: Integration of Interdisciplinary Research into Modern Science and Practice", Irkutsk, October 25, 2024]. Ufa: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «Aeterna», 2024, pp. 31–33.

7. Khitrich, D.O. Voprosy integratsii formata CIMXML v protsessy formirovaniya perspektivnykh raschetnykh modeley [Issues of integrating the CIMXML format into the processes of forming prospective calculation models]. *Novaya nauka: ot idei k rezul'tatu*, 2025, no. 5, pp. 234–243.

8. *Sistemnyy operator: v energetike obespechen skvoznoy protsess modelirovaniya na baze CIM* [System

Operator: end-to-end CIM-based modeling process is provided in the power industry]. Available at: <https://eepir.ru/new/sistemnyj-operator-v-nbsp-energetike-obespechen-skvoznoj-process-modelirovaniya-na-nbsp-baze-cim/>

9. *Metodicheskie ukazaniya po sostavleniyu raschetnykh modeley elektroenergeticheskikh sistem dlya provedeniya raschetov elektricheskikh rezhimov* [Guidelines for compiling calculation models of electric power systems for calculating electrical operating conditions]. Moscow: AO «SO EES», 2011. 295 p.

10. *Trebovaniya k formirovaniyu i aktualizatsii matematicheskikh modeley elektricheskoy seti dlya rascheta parametrov avariynogo rezhima. Uтверждено распоряжением № 68r AO «SO EES» от 19.06.2020 g.* [Requirements for the formation and updating of mathematical models of the electrical network for calculating emergency mode parameters. Approved by Order No. 68r of JSC «SO UPS» dated June 19, 2020]. Moscow: AO «SO EES», 2020. 18 p.

11. *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite. Vypusk 11. Raschety tokov korotkogo замыкания dlya releynoy zashchity i sistemnoy avtomatiki v setyakh 110–750 kV* [Guidelines for Relay Protection. Short-circuit current calculations for relay protection and system automation in 110–750 kV networks]. Moscow: Izdatel'stvo «Energiya», 1979. 152 p.

12. Neklepaev, B.N. (ed.) *Rukovodyashchie ukazaniya po raschetu tokov korotkogo замыкания i vyboru elektrooborudovaniya* [Guidelines for short-circuit current calculation and selection of electrical equipment]. Moscow: Izdatel'stvo NTs ENAS, 2002. 148 p.

13. *GOST R 52735-2007 Korotkie замыкания v elektroustanovkakh. Metody rascheta v elektroustanovkakh peremennogo toka napryazheniem svyshe 1 kV* [Short circuits in electrical installations. Calculation methods in AC electrical installations with voltage above 1 kV]. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293837/4293837777.pdf>.

14. *GOST R 58669-2019 Releynaya zashchita. Transformatory toka izmeritel'nye induktivnye s zamknutym magnitoprovodom dlya zashchity. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu vremeni do nasyshcheniya pri korotkikh замыканиyakh* [Relay protection. Measuring inductive current transformers with closed magnetic core for protection. Guidelines for determining time to saturation during short circuits]. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data/738/73857.pdf?ysclid=moale3esnk482082003>.

15. Zasyppin, A.S. *Releynaya zashchita transformatorov* [Relay protection of transformers]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 240 p.

16. *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite. Vypusk 09. Differentsial'no-faznaya vysokochastotnaya zashchita liniy 110–330 kV* [Guidelines for Relay Protection. Issue 09. Differential-phase high-frequency protection of 110–330 kV lines]. Moscow: Energiya, 1972. 115 p.

17. Kutumov, Yu.D., Tsvetkov, M.I. *Issledovanie vliyaniya broskov namagnichivayushchego toka transformatorov na ustoychivost' funktsionirovaniya izmeritel'nykh organov releynoy zashchity v tselyakh sovershenstvovaniya metodik vybora ikh ustavok* [Study of the influence of transformer inrush currents on the operational stability of relay protection measuring elements to improve the methods for setting their setpoints]. *Vestnik IGEU*, 2025, issue 4, pp. 28–37.

18. *GOST R 58651.3-2020. Edinaya energeticheskaya sistema i izolirovanno rabotayushchie energosistemy. Informatsionnaya model' elektroenergetiki. Profil' informatsionnoy modeli liniy elektroperedachi i elektrosetevogo oborudovaniya napryazheniem 110–750 kV* [United power system and isolated power systems. Information model of the electric power industry. Information model profile for power transmission lines and grid equipment with voltage of 110–750 kV]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573115945>.

19. *GOST R 58651.Kh (proekt natsional'nogo standarta PNS1.15.016-1.287.24). Edinaya energeticheskaya sistema i izolirovanno rabotayushchie energosistemy. Informatsionnaya model' elektroenergetiki. Profil' informatsionnogo obmena i trebovaniya k tsifrovym informatsionnym modelyam elektroenergeticheskikh sistem* [United power system and isolated power systems. Information model of the electric power industry. Information exchange profile and requirements for digital information models of electric power systems]. Moscow: Rosstandart, 2025. 210 p.

20. Leytes, L.V., Pintsov, A.M. *Skhemy zameshcheniya mnogoobmotochnykh transformatorov* [Equivalent circuits of multi-winding transformers]. Moscow: Energiya, 1974. 192 p.

21. Polevoy, V.A. *Skhemy zameshcheniya transformatorov s rasshcheplennymi obmotkami* [Equivalent circuits of transformers with split windings]. Moscow: Elektrichestvo, 1949. 96 p.

22. Zalyshkin, M.D. *Vybor transformatorov v energeticheskikh sistemakh* [Selection of transformers in power systems]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. 96 p.

23. DlgSilent PowerFactory: knowledge base. Available at: <https://www.digsilent.de/en/faq-powerfactory.html>.

24. *Metodicheskie ukazaniya po raschetu i vyboru parametrov nastroyki distantsionnykh zashchit liniy elektroperedachi 110 kV i vyshe. Uтверждено распоряжением AO «SO EES» от 17.08.2021 № 89r* [Guidelines for calculation and selection of setting parameters for distance protection of 110 kV and above power transmission lines. Approved by the order of JSC «SO UPS» dated 17.08.2021 № 89-r]. Moscow: JSC «SO UPS», 2021. 295 p.