

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst682001>

Труды III конференции с международным участием «Проблемы безопасности и эффективности технических систем», посвященной 205-й годовщине начала научно-педагогической деятельности Бенуа Поля Эмиля Клапейрона в Институте Корпуса инженеров путей сообщения

© А.А. Ткачук

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ТРЕХФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР СО СТАБИЛИЗИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ ПРИ ТОКОВЫХ ПЕРЕГРУЗКАХ

Цель. Определение условий проявления стабилизирующих свойств трехфазного трансформатора принципиально новой конструкции и определение величины отклонения выходного напряжения трансформатора при токовых перегрузках.

Материалы и методы. Выполнен электромагнитный расчет трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами в программе ELCUT, проведен анализ процессов в трансформаторе с помощью схемы замещения его магнитной цепи.

Результаты. При изменении номинального значения тока вторичной обмотки на 20% выходное напряжение изменилось только на 0,14%.

Заключение. Назрела необходимость в комплексной оценке электродинамической и термической стойкости трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами в переходных процессах.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор; стабилизирующие свойства; электромагнитный расчет; магнитный поток; магнитное насыщение; магнитная проницаемость; секционированные обмотки; токовые перегрузки.

Как цитировать:

Ткачук А.А. Трехфазный трансформатор со стабилизирующими свойствами при токовых перегрузках // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 273–290. doi: 10.17816/transsyst682001

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© **A.A. Tkachuk**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

THREE-PHASE TRANSFORMER WITH STABILIZING PROPERTIES AT OVERLOAD CURRENTS

AIM. To determine the conditions when a three-phase transformer of a fundamentally new design has stabilizing properties and the deviation of the transformer output voltage at overload currents.

MATERIALS AND METHODS. We developed an electromagnetic design of a three-phase transformer with stabilizing properties using ELCUT software and analyzed the processes occurring in the transformer using an equivalent magnetic circuit.

RESULTS. When the rated secondary current changed by 20%, the output voltage only changed by 0.14%.

CONCLUSION. There is a need for a comprehensive assessment of the electrodynamic stability and thermal resistance of a three-phase transformer with stabilizing properties in transient processes.

Keywords: three-phase transformer; stabilizing properties; electromagnetic design; magnetic flux; magnetic saturation; magnetic permeability; winding sections; overload currents.

To cite this paper:

Tkachuk AA. Three-Phase Transformer With Stabilizing Properties at Overload Currents. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):273–290. doi: 10.17816/transsyst682001

ВВЕДЕНИЕ

Стабилизация выходного напряжения силового трансформатора позволяет обеспечить требуемое значение выпрямленного напряжения подстанции, в состав которой он входит и является одним из ключевых элементов инфраструктуры тягового электроснабжения [1–3].

Среди существующих способов регулирования выходного напряжения трансформатора, к которым можно отнести изменение числа витков его первичной обмотки, использование различных вольтодобавочных устройств в цепи вторичной обмотки, особое место занимает стабилизация напряжения с помощью управления магнитными потоками, протекающими в расщепленных стержнях трансформатора. Трехфазный трансформатор, работа которого основана на таком принципе регулирования напряжения вторичной обмотки, обладает особыми стабилизирующими свойствами, которые проявляются при определенных условиях, и выполняет функцию источника питания трансформаторно-выпрямительного агрегата тяговой подстанции не только в номинальном режиме ее работы, но также при резком увеличении выпрямленного тока.

Целью работы является определение условий проявления стабилизирующих свойств трансформатора, а также влияние токовых перегрузок на уровень напряжения вторичной обмотки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ магнитной цепи трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами.
2. Численный расчет трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами.

В качестве инструментов исследования процессов, протекающих в трехфазном трансформаторе со стабилизирующими свойствами, использовались методы анализа магнитных и электрических цепей переменного тока. При расчете токов, напряжений и магнитных потоков трансформатора [4] также использовались элементы теории комплексного переменного и теории дифференциальных уравнений, а также численные методы расчета электромагнитного поля.

Средой для моделирования электромагнитных процессов, протекающих в основных элементах конструкции трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами, был выбран отечественный программный пакет ELCUT.

РАЗРАБОТКА ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА СО СТАБИЛИЗИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ

Конструкция трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами [5] также представлена на Рис. 1, где 1 – ярмо, 2 – расщепленный стержень, 3 и 4 – подстержни, 5 и 6 – секции первичной обмотки, 7 и 8 – секции вторичной обмотки, 9 – короткозамкнутая обмотка. Материалом магнитопровода трансформатора выбрана электротехническая сталь марки 1514.

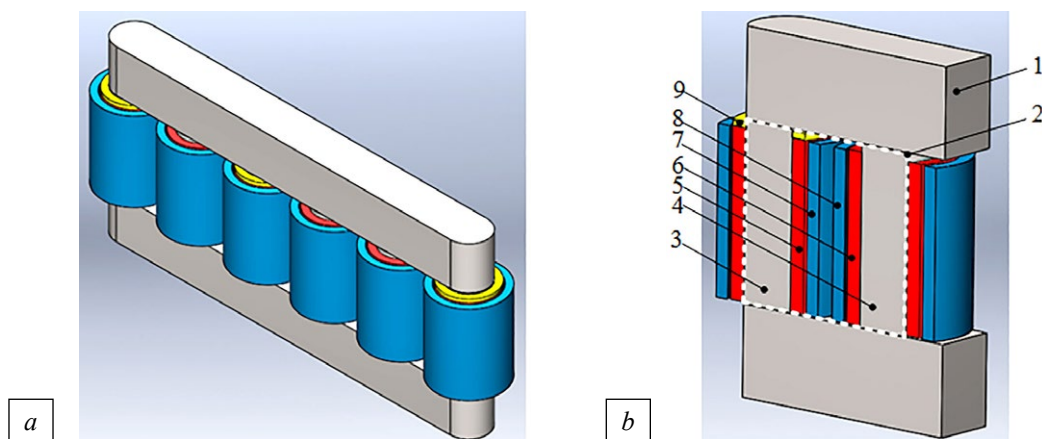


Рис. 1. Трехфазный трансформатор со стабилизирующими свойствами:
а – общий вид, б – конструкция фазы «А» трансформатора

Fig. 1. Three-phase transformer with stabilizing properties:
а – general view, б – design of phase «A» of the transformer

На Рис. 2 представлены основные величины и элементы схемы замещения электрической цепи трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами:

u_{AB}, u_{BC}, u_{CA} – мгновенные значения линейных напряжений первичных обмоток трансформатора;

u_{ab}, u_{bc}, u_{ca} – мгновенные значения линейных напряжений вторичных обмоток трансформатора;

i_A, i_B, i_C – мгновенные значения токов первичных обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

i_a, i_b, i_c – мгновенные значения токов вторичных обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

i_{ak}, i_{bk}, i_{ck} – мгновенные значения токов короткозамкнутых обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

R_{A1} и R_{A2} , R_{B1} и R_{B2} , R_{C1} и R_{C2} – активные сопротивления первых и вторых секций первичных обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

L_{A1} и L_{A2} , L_{B1} и L_{B2} , L_{C1} и L_{C2} – собственные индуктивности первых и вторых секций первичных обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

R_{a1} и R_{a2} , R_{b1} и R_{b2} , R_{c1} и R_{c2} – активные сопротивления первых и вторых секций вторичных обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

L_{a1} и L_{a2} , L_{b1} и L_{b2} , L_{c1} и L_{c2} – собственные индуктивности первых и вторых секций вторичных обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

R_{ak} , R_{bk} , R_{ck} – активные сопротивления короткозамкнутых обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

L_{ak} , L_{bk} , L_{ck} – собственные индуктивности короткозамкнутых обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно.

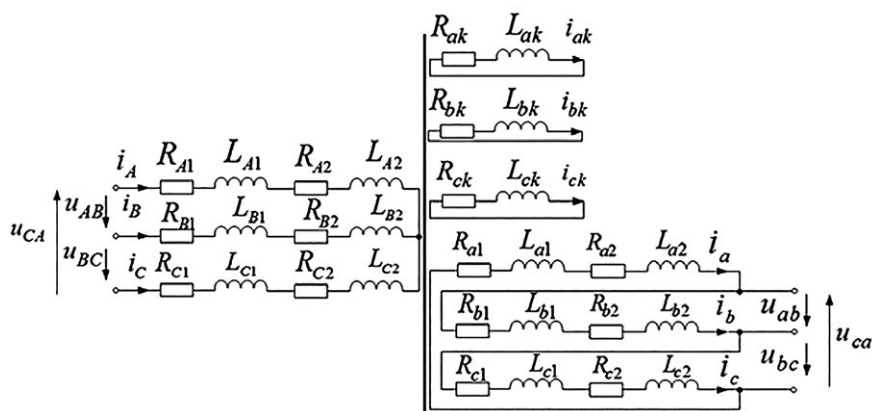


Рис. 2. Схема замещения электрической цепи трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами

Fig. 2. Equivalent circuit diagram of a three-phase transformer with stabilizing properties

При подключении к первичным обмоткам трансформатора переменных синусоидальных напряжений u_{AB} , u_{BC} , u_{CA} , по линейным проводам первичных обмоток будет протекать синусоидальные токи i_A , i_B , i_C . Поскольку характеристика намагничивания $B(H)$ материала магнитопровода нелинейная [6], то магнитные потоки, протекающие по стержням, в своем составе помимо 1-ой гармонической составляющей будут содержать четные гармоники (3, 5, 7, 9, 11). В данном случае 5-й,

7-й, 9-й и 11-й составляющими можно пренебречь ввиду их малости. Гармонические составляющие магнитных потоков, кратные трем, будут наводить во вторичных обмотках трансформатора переменные электродвижущие силы, изменяющиеся с циклической частотой 3ω . Тогда в «треугольнике» вторичных обмоток гармонические составляющие токов i_a, i_b, i_c с циклической частотой 3ω будут создавать магнитные потоки этой же частоты и компенсировать магнитные потоки первичных обмоток.

Таким образом, основной магнитный поток каждой фазы трансформатора будет содержать в своем составе только первую гармоническую составляющую, следовательно, результирующие напряжения вторичных обмоток будут синусоидальными.

Дальнейшие исследования процессов в обмотках и магнитопроводе трансформатора проведем с использованием схемы замещения его магнитной цепи. Для ее расчета воспользуемся комплексным методом [7, 8]. Для этого несинусоидальные магнитодвижущие силы первичных и вторичных обмоток заменим их эквивалентными синусоидами, участки магнитопровода на схеме представим полными комплексными магнитными сопротивлениями.

АНАЛИЗ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА СО СТАБИЛИЗИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ

В соответствии с конструктивной схемой трансформатора на Рис. 1 и его электрической цепью на Рис. 2 составлена схема замещения его магнитной цепи на Рис. 3. На рисунке использованы следующие обозначения:

$\dot{F}_{mA1}, \dot{F}_{mA2}, \dot{F}_{mB1}, \dot{F}_{mB2}, \dot{F}_{mC1}, \dot{F}_{mC2}$ – комплексные амплитудные значения магнитодвижущих сил первых и вторых секций первичных обмоток фаз «А», «В» и «С» соответственно;

$\dot{F}_{ma1}, \dot{F}_{ma2}, \dot{F}_{mb1}, \dot{F}_{mb2}, \dot{F}_{mc1}, \dot{F}_{mc2}$ – комплексные амплитудные значения магнитодвижущих сил первых и вторых секций вторичных обмоток фаз «А», «В», «С» соответственно;

$\dot{F}_{mak}, \dot{F}_{mbk}, \dot{F}_{mck}$ – комплексные амплитудные значения переменных магнитодвижущих сил, создаваемых короткозамкнутыми обмотками фаз «А», «В» и «С» соответственно;

$\dot{\Phi}_{0mA}, \dot{\Phi}_{0mB}, \dot{\Phi}_{0mC}$ – комплексные амплитудные значения основных результирующих магнитных потоков, протекающих в расщепленных стержнях фаз «А», «В», «С» соответственно;

$\dot{\Phi}_{0ma1}, \dot{\Phi}_{0ma2}, \dot{\Phi}_{0mb1}, \dot{\Phi}_{0mb2}, \dot{\Phi}_{0mc1}, \dot{\Phi}_{0mc2}$ – комплексные амплитудные значения основных результирующих магнитных потоков, протекающих в первых и вторых подстержнях расщепленных стержней фаз «А», «В» и «С» соответственно;

$\underline{Z}_{MAB}, \underline{Z}_{MBC}$ – полные комплексные магнитные сопротивления участков ярем между расщепленными стержнями фаз «А» и «В», «В» и «С» соответственно;

$\underline{Z}_{Ma1}, \underline{Z}_{Ma2}, \underline{Z}_{Mb1}, \underline{Z}_{Mb2}, \underline{Z}_{Mc1}, \underline{Z}_{Mc2}$ – полные комплексные магнитные сопротивления первых и вторых подстержней фаз «А», «В», «С» соответственно.

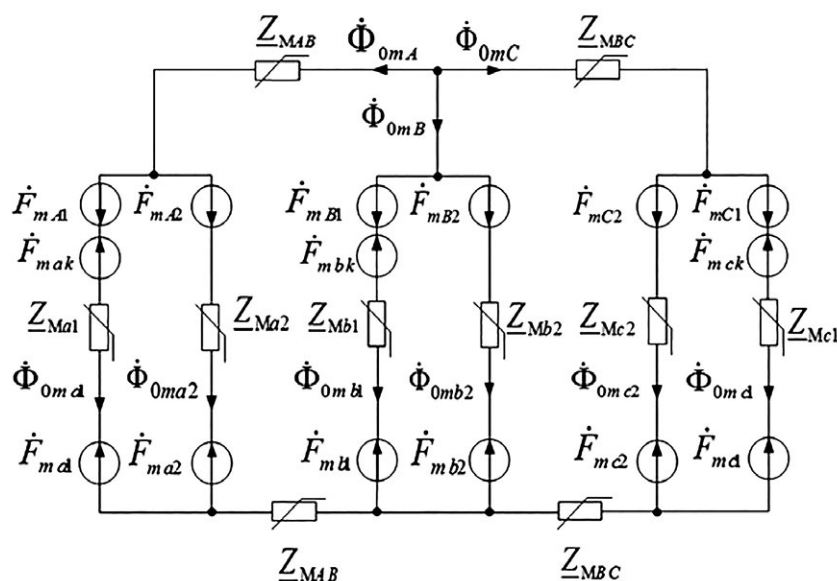


Рис. 3. Схема замещения магнитной цепи трансформатора с расщепленными стержнями, секционированными обмотками и короткозамкнутыми обмотками

Fig. 3. Equivalent circuit diagram of a transformer magnetic circuit with split rods, sectioned windings and short-circuited windings

Полные комплексные магнитные сопротивления [9] участков магнитопровода трансформатора в общем виде определяются как:

$$\underline{Z}_M = \frac{\dot{H}_m}{\dot{B}_m} \frac{l}{S} = \frac{l}{\mu S} \quad (1)$$

где $\dot{H}_m$ – комплексное амплитудное значение напряженности магнитного поля материала участка магнитопровода трансформатора, $\dot{B}_m$ – комплексное амплитудное значение индукции магнитного

поля материала участка магнитопровода трансформатора, l – длина участка магнитопровода трансформатора, S – площадь поперечного сечения участка магнитопровода трансформатора, $\dot{\mu}$ – комплексная магнитная проницаемость материала участка магнитопровода трансформатора.

Для магнитной цепи на Рис. 3 составим систему уравнений по I и II законам Кирхгофа [10–13] в комплексной форме для амплитудных значений без учета потоков рассеяния:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\Phi}_{0mA} = \dot{\Phi}_{0ma1} + \dot{\Phi}_{0ma2}, \\ \dot{\Phi}_{0mB} = \dot{\Phi}_{0mb1} + \dot{\Phi}_{0mb2}, \\ \dot{\Phi}_{0mC} = \dot{\Phi}_{0mc1} + \dot{\Phi}_{0mc2}, \\ \dot{\Phi}_{0ma2} \underline{Z}_{Ma2} - \dot{\Phi}_{0ma1} \underline{Z}_{Ma1} = \dot{F}_{mA2} - \dot{F}_{ma2} + \dot{F}_{ma1} + \dot{F}_{mak} - \dot{F}_{mA1}, \\ \dot{\Phi}_{0mb2} \underline{Z}_{Mb2} - \dot{\Phi}_{0mb1} \underline{Z}_{Mb1} = \dot{F}_{mB2} - \dot{F}_{mb2} + \dot{F}_{mb1} + \dot{F}_{mbk} - \dot{F}_{mB1}, \\ \dot{\Phi}_{0mc1} \underline{Z}_{Mc1} - \dot{\Phi}_{0mc2} \underline{Z}_{Mc2} = \dot{F}_{mC1} - \dot{F}_{mck} - \dot{F}_{mc1} + \dot{F}_{mc2} - \dot{F}_{mC2}, \\ -2\dot{\Phi}_{0mA} \underline{Z}_{MAB} + \dot{\Phi}_{0mb1} \underline{Z}_{Mb1} - \dot{\Phi}_{0ma2} \underline{Z}_{Ma2} = \dot{F}_{mB1} - \dot{F}_{mbk} - \dot{F}_{mb1} + \dot{F}_{ma2} - \dot{F}_{mA2}, \\ 2\dot{\Phi}_{0mC} \underline{Z}_{MBC} + \dot{\Phi}_{0mc2} \underline{Z}_{Mc2} - \dot{\Phi}_{0mb2} \underline{Z}_{Mb2} = \dot{F}_{mC2} - \dot{F}_{mc2} + \dot{F}_{mb2} - \dot{F}_{mB2}, \end{array} \right. \quad (2)$$

Выражения для напряжений секций вторичных обмоток можно записать в комплексной форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_{ma1} = j\omega w_{21} \dot{\Phi}_{0ma1} - R_{a1} \dot{I}_{ma}, \\ \dot{U}_{ma2} = j\omega w_{22} \dot{\Phi}_{0ma2} - R_{a2} \dot{I}_{ma}, \\ \dot{U}_{mb1} = j\omega w_{21} \dot{\Phi}_{0mb1} - R_{b1} \dot{I}_{mb}, \\ \dot{U}_{mb2} = j\omega w_{22} \dot{\Phi}_{0mb2} - R_{b2} \dot{I}_{mb}, \\ \dot{U}_{mc1} = j\omega w_{21} \dot{\Phi}_{0mc1} - R_{c1} \dot{I}_{mc}, \\ \dot{U}_{mc2} = j\omega w_{22} \dot{\Phi}_{0mc2} - R_{c2} \dot{I}_{mc}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где $\dot{U}_{ma1}, \dot{U}_{ma2}, \dot{U}_{mb1}, \dot{U}_{mb2}, \dot{U}_{mc1}, \dot{U}_{mc2}$ – комплексные амплитудные значения напряжений первых и вторых секций вторичных обмоток фаз «А», «В», «С» соответственно; $\dot{I}_{ma}, \dot{I}_{mb}, \dot{I}_{mc}$ – комплексные амплитудные значения токов, протекающих в проводах вторичных обмоток фаз «А», «В», «С» соответственно; w_{21} и w_{22} – число витков первой

и второй секций вторичных обмоток фаз трансформатора соответственно ($w_{21} > w_{22}$).

Комплексные амплитудные значения результирующих напряжений вторичных обмоток трансформатора определяются как:

$$\begin{cases} \dot{U}_{ma} = \dot{U}_{ma1} + \dot{U}_{ma2}, \\ \dot{U}_{mb} = \dot{U}_{mb1} + \dot{U}_{mb2}, \\ \dot{U}_{mc} = \dot{U}_{mc1} + \dot{U}_{mc2}, \end{cases} \quad (4)$$

С другой стороны, рассматривая, например, фазу «А» трансформатора, напряжение вторичной обмотки можно записать как:

$$\dot{U}_{ma} = \dot{I}_{ma} (\underline{Z}_{a1} + \underline{Z}_{a2}) = \dot{I}_{ma} \left(\frac{j\omega w_{21}^2}{\underline{Z}_{Ma1}} + \frac{j\omega w_{22}^2}{\underline{Z}_{Ma2}} \right), \quad (5)$$

где $\underline{Z}_{a1}$, $\underline{Z}_{a2}$ – полные комплексные электрические сопротивления секций вторичной обмотки фазы «А» трансформатора; $\underline{Z}_{Ma1}$, $\underline{Z}_{Ma2}$ – полные комплексные магнитные сопротивления подстержней фазы «А» трансформатора.

Следует учесть, что при протекании магнитного потока $\dot{\Phi}_{0ma1}$ по первому подстержню в первой секции вторичной обмотки наводится электродвижущая сила $\dot{E}_{0ma1} = j\omega w_{21} \dot{\Phi}_{0ma1}$, а в обмотке с короткозамкнутыми витка w_k наводится электродвижущая сила $\dot{E}_{0mk}$. Под действием $\dot{E}_{0mk}$ в проводах короткозамкнутой обмотки протекает ток $\dot{I}_{mak}$, создающий магнитный поток $\dot{\Phi}_{0mak}$.

Магнитный поток $\dot{\Phi}_{0mak}$ частично компенсирует поток $\dot{\Phi}_{0ma1}$, в результате магнитная проницаемость материала первого подстержня уменьшается, материал подстержня размагничивается.

Таким образом, можно записать выражение для $\dot{\Phi}_{0ma1}$:

$$\dot{\Phi}_{0ma1} = \frac{\dot{F}_{mak}}{\underline{Z}_{Ma1}} = \frac{w_k \dot{I}_{mak} \underline{Z}_{a1}}{j\omega w_{21}^2}, \quad (6)$$

Тогда напряжение вторичной обмотки определяется как:

$$\dot{U}_{ma} = \frac{w_k}{w_{21}} \dot{I}_{mak} \underline{Z}_{a1} (\dot{I}_{ma}) + \dot{I}_{ma} \underline{Z}_{a2} (\dot{I}_{ma}), \quad (7)$$

где $\underline{Z}_{a1}(\dot{I}_{ma}) = \frac{\dot{U}_{ma1}(\dot{I}_{ma})}{\dot{I}_{ma}}$, $\underline{Z}_{a2}(\dot{I}_{ma}) = \frac{\dot{U}_{ma2}(\dot{I}_{ma})}{\dot{I}_{ma}}$.

Экстремум функции $\dot{U}_{ma}(I_{ma})$ определим из уравнения:

$$\frac{d\dot{U}_{ma}(I_{ma})}{dI_{ma}} = 0. \quad (8)$$

Так из выражения (8) с учетом (6) и (7) можно получить нелинейное [14] дифференциальное уравнение:

$$\frac{w_k}{w_{21}} \left(\frac{dI_{mak}}{dI_{ma}} \frac{\dot{U}_{ma1}}{I_{ma}} + \frac{I_{mak}}{I_{ma}} \frac{d\dot{U}_{ma1}}{dI_{ma}} - \frac{\dot{U}_{ma1} I_{mak}}{I_{ma}^2} \right) + \frac{d\dot{U}_{ma2}}{dI_{ma}} = 0. \quad (9)$$

В уравнение (9) входят компоненты $\frac{d\dot{U}_{ma1}}{dI_{ma}}$ и $\frac{d\dot{U}_{ma2}}{dI_{ma}}$, отвечающие за скорость изменения напряжений $\dot{U}_{ma1}$ и $\dot{U}_{ma2}$ секций вторичной обмотки и магнитных поток подстержней, так как $\dot{\Phi}_{0ma1} = \frac{\dot{U}_{ma1}}{j\omega w_{21}}$ и $\dot{\Phi}_{0ma2} = \frac{\dot{U}_{ma2}}{j\omega w_{22}}$.

В уравнение (9) также входит выражение $\frac{dI_{mak}}{dI_{ma}}$, отвечающее за скорость нарастания тока в витках короткозамкнутой обмотки.

Отсюда следует, что стабилизирующие свойства трехфазного трансформатора будут определяться не только магнитной «разбалансировкой» материалов подстержней, но и характером изменения амплитудного значения тока в короткозамкнутых витках.

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА СО СТАБИЛИЗИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ

Решение уравнения (9) для модулей напряжений $\dot{U}_{ma1}$ и $\dot{U}_{ma2}$ приведено на Рис. 4, для начальных фаз напряжений секций вторичной обмотки – на Рис. 5.

На Рис. 4 при $I_{ma} = 0$ разница между напряжениями секций вторичной обмотки составляет $\Delta U_{ma12} = 3064$ В, ток короткозамкнутой обмотки размагничивает материал первого подстержня. Следовательно, индуктивность первой секции вторичной обмотки больше, чем первой, и $|\Psi_{U_{ma1}}| > |\Psi_{U_{ma2}}|$ (Рис. 5).

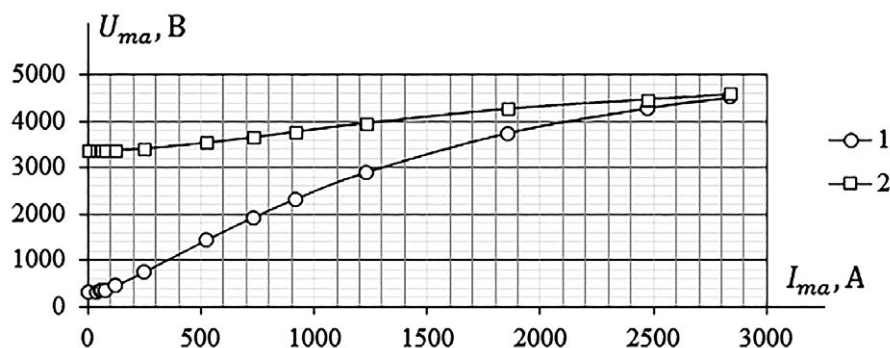


Рис. 4. Токовые зависимости напряжений секций вторичной обмотки
(кривая 1 – $U_{ma1}(I_{ma})$, кривая 2 – $U_{ma2}(I_{ma})$)

Fig. 4. Current dependences of voltages of secondary winding sections
(curve 1 – $U_{ma1}(I_{ma})$, curve 2 – $U_{ma2}(I_{ma})$)

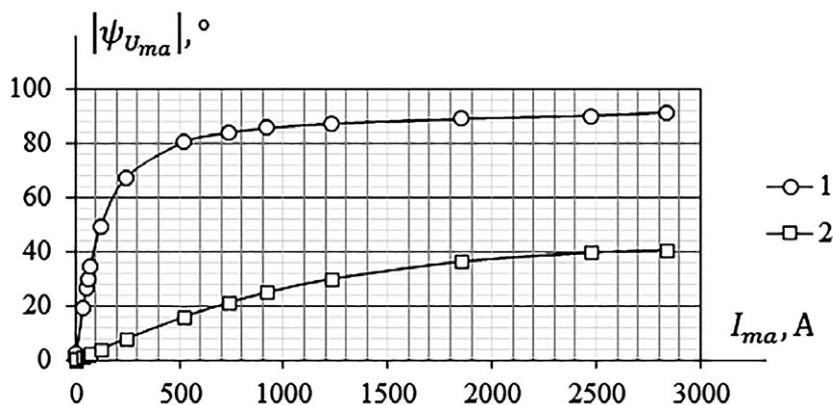


Рис. 5. Токовые зависимости начальных фаз напряжений секций вторичной обмотки
(кривая 1 – $|\psi_{U_{ma1}}|(I_{ma})$, кривая 2 – $|\psi_{U_{ma2}}|(I_{ma})$)

Fig. 5. Current dependencies of the initial phases of the voltages of the secondary winding sections (curve 1 – $|\psi_{U_{ma1}}|(I_{ma})$, curve 2 – $|\psi_{U_{ma2}}|(I_{ma})$)

При $I_{ma} = 2000$ А и $I_{ma} = 2400$ А разница между напряжениями секций ΔU_{ma12} составит 514 В и 186 В соответственно. При дальнейшем увеличении тока, когда $I_{ma} > 2800$ А, $\Delta U_{ma12} \rightarrow 0$, ток I_{mak} короткозамкнутой обмотки не оказывает размагничивающего действия на материал первого подстержня, трансформатор теряет свои стабилизирующие свойства.

На Рис. 6 приведены графики изменения амплитудного значения и начальной фазы тока короткозамкнутой обмотки. Увеличение модуля тока $\dot{I}_{mak}$ обусловлено увеличением магнитного потока $\dot{\Phi}_{0ma1}$, а значит и $\dot{\Psi}_{0mak} = L_{ak} \dot{I}_{mak}$ (L_{ak} – индуктивность короткозамкнутой обмотки,

$\dot{\Psi}_{0mak}$ – комплексное амплитудное значение потокоцепления короткозамкнутой обмотки). Так как индуктивность L_{ak} будет уменьшаться, то и начальная фаза $\psi_{I_{mak}}$ будет резко уменьшаться [15] на Рис. 6 б).

Из графика на Рис. 6 следует, что при $I_{ma} = 2000$ А и $I_{mak} = 2000$ А, $|\psi_{I_{mak}}| = 2^\circ$, при $I_{ma} > 2800$ А $|\psi_{I_{mak}}| = 0^\circ$, то есть материал первого подстержня насыщен и стабилизирующие свойства не проявляются.

Кроме того, если в выражении (9) считать $\frac{d\dot{I}_{mak}}{d\dot{I}_{ma}} = 1$, тогда получаем уравнение:

$$\frac{w_k}{w_{21}} \frac{d\dot{U}_{ma1}}{d\dot{I}_{ma}} + \frac{d\dot{U}_{ma2}}{d\dot{I}_{ma}} = 0. \quad (10)$$

В соответствии с конструкцией обмоток трансформатора $\frac{w_k}{w_{21}} < 1$.

Из уравнения (10) определяется значение I_{ma} , при котором функция $U_{ma}(I_{ma})$ достигает экстремума в соответствии с выражением (8). На Рис. 7 показаны зависимости изменения напряжений секций вторичной обмотки от тока вторичной обмотки.

Из графиков на Рис. 7 следует, что при $I_{ma} = 2000$ А $\frac{w_k}{w_{21}} \frac{dU_{ma1}}{dI_{ma}} = \frac{dU_{ma2}}{dI_{ma}}$ или для потоков $k \frac{d\Phi_{0ma1}}{dI_{ma}} = \frac{d\Phi_{0ma2}}{dI_{ma}}$, где $k < 1$. На Рис. 8 представлены

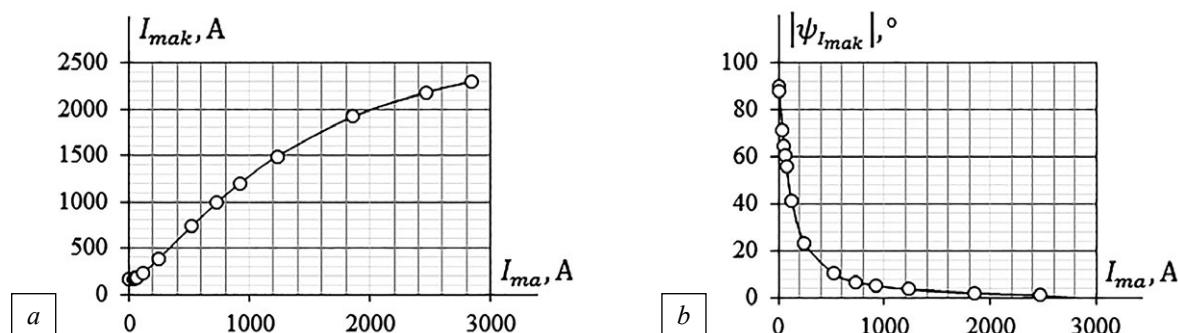


Рис. 6. Зависимость тока короткозамкнутой обмотки а) и его начальной фазы б) от тока вторичной обмотки трансформатора

Fig. 6. Dependence of the short-circuited winding current а) and its initial phase б) on the secondary winding current of the transformer

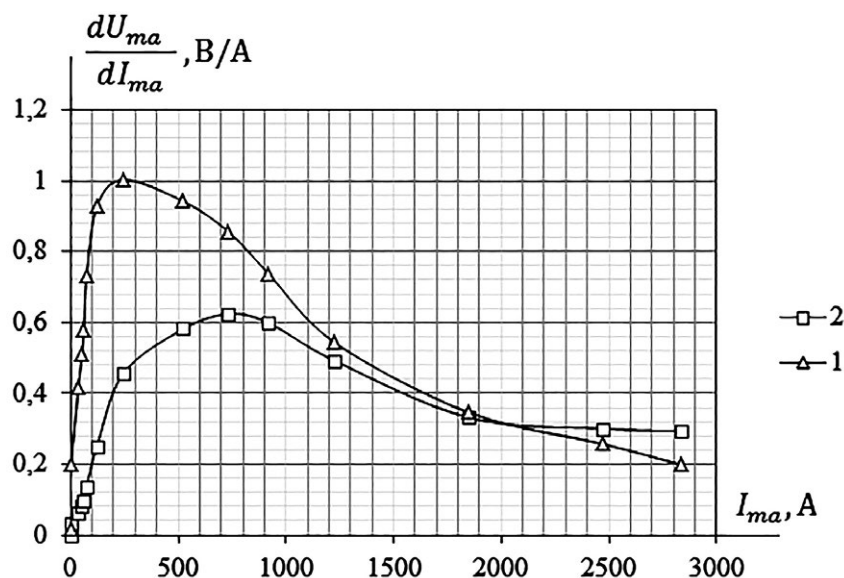


Рис. 7. Токовые зависимости изменения напряжений секций вторичной обмотки

$$\left(\text{кривая 1} - \frac{w_k}{w_{21}} \frac{dU_{ma1}}{dI_{ma}}(I_{ma}), \text{ кривая 2} - \frac{dU_{ma2}}{dI_{ma}}(I_{ma}) \right)$$

Fig. 7. Current dependences of voltage changes in secondary winding sections (curve 1 –

$$\frac{w_k}{w_{21}} \frac{dU_{ma1}}{dI_{ma}}(I_{ma}), \text{ curve 2} - \frac{dU_{ma2}}{dI_{ma}}(I_{ma}))$$

кривые относительных магнитных проницаемостей материала подстержней фазы «А» трансформатора. При $I_{ma} = 2000$ А $\mu_{ra1} \gg \mu_{ra2}$.

В ходе предварительного расчета трансформатора [5] было установлено, что номинальное значение тока вторичной обмотки трансформатора составляет $I_{ma} = 2000$ А, этому значению соответствует номинальное значение тока первичной обмотки трансформатора $I_{mA} = 300$ А.

В соответствии с [16], максимальное значение коэффициента допустимой длительной перегрузки трансформатора (без ограничения длительности в режиме без повышенного износа изоляции) составляет 1,2, минимальное значение – 0,82. Коэффициент $K_{\text{доп}}$ определяется как:

$$K_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{доп}}}{I_{\text{ном}}}, \quad (12)$$

где $I_{\text{доп}}$ – допустимый ток трансформатора, $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток трансформатора.

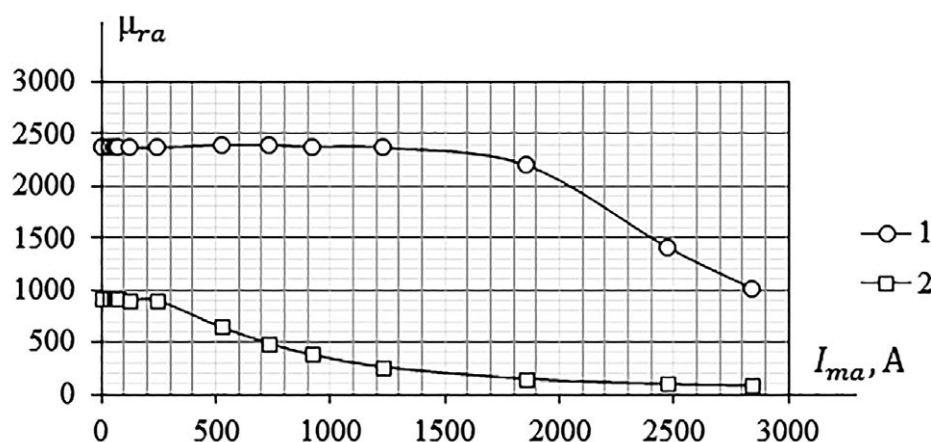


Рис. 8. Относительные магнитные проницаемости материала подстержней
(кривая 1 - $\mu_{ra1}(I_{ma})$, кривая 2 - $\mu_{ra2}(I_{ma})$)

Fig. 8. Relative magnetic permeabilities of the subrod material
(curve 1 - $\mu_{ra1}(I_{ma})$, curve 2 - $\mu_{ra2}(I_{ma})$)

Тогда при амплитудном значении тока вторичной обмотки 2000 А амплитудное значение тока допустимой длительной перегрузки вторичной обмотки трансформатора составит 2400 А. На Рис. 9 представлена внешняя характеристика трансформатора со стабилизирующими свойствами, полученная в результате решения уравнения (8).

Из Рис. 9 видно, что при номинальном значении тока вторичной обмотки 2000 А, напряжение вторичной обмотки $U_{ma} = 3715$ В (действующее значения $U_a = 2627$ В). При токе допустимой длительной перегрузки 2400 А $U_{ma} = 3710$ В (действующее значения $U_a = 2623$ В), то есть отклонение не более чем 0,14%.

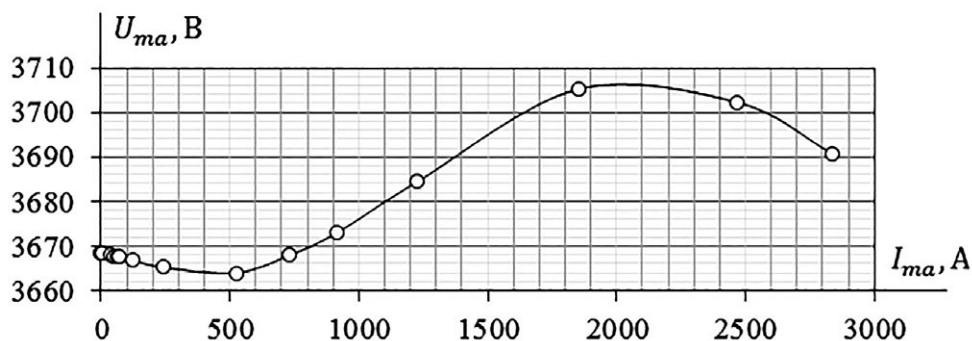


Рис. 9. Внешняя характеристика трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами

Fig. 9. External characteristics of a three-phase transformer with stabilizing properties

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ магнитной цепи разработанного трехфазный трансформатора и численный расчет его электромагнитного поля показали, что в окрестностях точки с $I_{ma} = 2000$ А на кривой внешней характеристики, стабилизирующие свойства проявляются при следующих условиях:

$$1. \ k \frac{d\Phi_{0ma1}}{dI_{ma}} = \frac{d\Phi_{0ma2}}{dI_{ma}}, \text{ где } k < 1.$$

$$2. \ I_{ma} = I_{mak}.$$

$$3. \ \mu_{ra1} \gg \mu_{ra2}.$$

Также установлено, что при протекании по вторичной обмотке трансформатора тока, близкого по значению к току допустимой длительной перегрузки, напряжение вторичной обмотки уменьшится лишь на 0,14% от своего номинального значения.

При токе $I_{ma} \geq 2800$ А превышающем ток допустимой длительной перегрузки более чем на 15%, трансформатор утрачивает свои стабилизирующие свойства. Такие изменения тока отразятся не только на стабилизирующей функции трансформатора, но и на его электродинамической стойкости.

Таким образом, назрела необходимость в комплексной оценке электродинамической и термической стойкости трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами в переходных процессах.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that this article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н., Шалимов М.Г. Тяговые подстанции. М.: Транспорт, 1986.
2. Аржанников Б.А., Фролов Л.А. Автоматическое регулирование напряжения в системе электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ. Екатеринбург: УрГУПС, 2009.

3. Аржанников А.А. Система управляемого тягового электроснабжения постоянного тока для пропуска скоростных и тяжеловесных поездов // Транспорт Урала. 2012. № 1(32). С. 134-137. EDN: OWWUCJ
4. Шакиров М.А. Вектор Пойнтинга и новая теория трансформатора. Ч.11. Трехфазные трехстержневые трансформаторы без нейтрального провода // Электричество. 2021. № 1. С. 23-34. doi: 10.24160/0013-5380-2021-1-23-34
5. Ткачук А.А. Стабилизация напряжения контактной сети трансформаторно-выпрямительным агрегатом тяговой подстанции постоянного тока 3,3 кВ: дис....канд. техн. наук. СПб; 2017.
6. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Учебник для электроэнергет., электротехн. и радиотехн. спец. вузов. Т.2, Ч.3: Теория нелинейных электрических и магнитных цепей; Ч.4: Теория электромагнитного поля. Л.: Энергоиздат, 1981.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Юрайт, 2014.
8. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике: для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986.
9. Христинич А.Р. Теоретические основы электротехники: учебное пособие. Иркутск: ИрГУПС, 2023.
10. Иванов С.Н., Ким К.К., Просолович А.А., Хисматулин М.И. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3(51). С. 29-38. EDN: CLTWBH doi: 10.17084/20764359-2021-51-29
11. Иванов С.Н., Ким К.К., Приходченко О.В., Просолович А.А. Теоретические основы математического моделирования процессов преобразования мощности в совмещенных энергетических устройствах // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. Т. 1. № 1(41). С. 37-44. EDN: AKBSNQ
12. Ким К.К., Колесник М.Б., Иванов С.Н. Моделирование устойчивости электромеханического преобразователя при осевых нагрузках // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2022. Т. 65. № 2. С. 45-50. EDN: DTTUJR doi: 10.17213/0136-3360-2022-2-45-500
13. Ким К.К., Иванов С.Н. Моделирование комбинированного электропривода // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2019. Т. 62. № 3. С. 44-50. EDN: GQNKGU doi: 10.17213/0136-3360-2019-3-44-50
14. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2022.
15. Афанасьев А.Ю. Теоретические основы электротехники: учебное пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2023.
16. Приказ Минэнерго России от 08.02.2019 N 81 (ред. от 03.08.2023) «Об утверждении требований к перегрузочной способности трансформаторов и автотрансформаторов, установленных на объектах электроэнергетики, и ее

поддержанию и о внесении изменений в Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утвержденные приказом Минэнерго России от 19 июня 2003 г. N 229» (Зарегистрировано в Минюсте России 28.03.2019 N 54199). Дата обращения 04.05.2025. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_321351/

REFERENCES

1. Bej YuM, Mamoshin RR, Pupynin VN, SHalimov MG. *Tyagovye podstancii*. Textbook for universities of railway transport. Moscow: Transport; 1986. (In Russ.)
2. Arzhannikov BA, Frolov LA. *Avtomatischeskoe regulirovanie napryazheniya v sisteme elektrosnabzheniya postoyannogo toka 3,0 kV*. Yekaterinburg: UrGUPS; 2009. (In Russ.)
3. Arzhannikov AA. *Sistema upravlyаемого tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka dlya propuska skorostnyh i tyazhelovesnyh poezdov*. *Transport Urala*. 2012;1(32):134-137. (In Russ.)
4. Shakirov MA. The Poynting vector and the new theory of a transformer. Part 11. Three-phase three-core transformers without a neutral wire. *Electrical Technology Russia*. 2021;1:23-34. (In Russ.) doi: 10.24160/0013-5380-2021-1-23-34
5. Tkachuk AA. *Stabilizaciya napryazheniya kontaktnoj seti transformatorno-vypriamitel'nyim agregatom tyagovoj podstancii postoyannogo toka 3,3 kV* [dissertation]. St. Petersburg; 2017. (In Russ.)
6. Nejman LR, Demirchyan KS. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki*. Vol. 2, Part 3: Theory of nonlinear electric and magnetic circuits; Part 4: *Theory of electromagnetic field*. Leningrad: Energoizdat; 1981.
7. Bessonov LA. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie cepi*. Moscow: Yurait; 2014.
8. Bronshtejn IN, Semendyaev KA. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchihsya vtuzov*. Moscow: Nauka. 1986.
9. Hristinich AR. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: textbook*. Irkutsk: IrGUPS; 2023. 107 p. (In Russ.)). Доступно по: <https://e.lanbook.com/book/407465> Ссылка активна на: 04.05.2025.
10. Ivanov SN, Kim KK, Prosolovich AA, Hismatulin MI. Electromechanical system analysis with simulation methods. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2021;3(51):29-38. (In Russ.) EDN: CLTWBH doi: 10.17084/20764359-2021-51-29
11. Ivanov SN, Kim KK, Prihodchenko OV, Prosolovich AA. Theoretical foundations of mathematical modeling of power conversion processes in combined power devices. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020;1(41):37-44. (In Russ.) EDN: AKBSNQ
12. Kim KK, Kolesnik MB, Ivanov SN. Modeling the stability of an electromechanical converter with axial loads. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*. 2022;65(2):45-50. (In Russ.) EDN: DTTUJR doi: 10.17213/0136-3360-2022-2-45-500

13. Kim KK, Ivanov SN. Modeling of the combined electric drive. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*. 2019;62(3):44-50. (In Russ.) EDN: GQNKGU doi: 10.17213/0136-3360-2019-3-44-50
14. Demidovich BP, Maron IA, Shuvalova EZ. *Chislennye metody analiza. Priblizhenie funkcij, differencial'nye i integral'nye uravneniya*: textbook. 5th ed. St.Petersburg: Lan'; 2022. 400 p. (In Russ.)
15. Afanas'ev AYu. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki*: textbook. Vologda: Infra-Inzheneriya; 2023. 208 p. (In Russ.)
16. Prikaz Minenergo Rossii ot 08.02.2019 N 81 (red. ot 03.08.2023) «Ob utverzhdenii trebovanij k peregruzochnoj sposobnosti transformatorov i avtotransformatorov, ustanovlennyh na ob»ektah elektroenergetiki, i ee podderzhaniyu i o vnesenii izmenenij v Pravila tekhnicheskoy ekspluatacii elektricheskikh stancij i setej Rossijskoj Federacii, utverzhdennye prikazom Minenergo Rossii ot 19 iyunya 2003 g. N 229» (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 28.03.2019 N 54199). Available from: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_321351/ (In Russ.)

Сведения об авторе:

Ткачук Антон Андреевич, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 7335-2340; ORCID: 0000-0002-6141-3568;
E-mail: a.a.tkachuk@mail.ru

Information about the author:

Anton A. Tkachuk, Cand. Sci. (Engineering), associate professor;
eLibrary SPIN: 7335-2340; ORCID: 0000-0002-6141-3568;
E-mail: a.a.tkachuk@mail.ru