


УДК 621.314.26+629.561.5
EDN: NRMSIB

А.В. Байко, Б.А. Скворцов , М.Ю. Хмель
Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

К ВЫБОРУ СИЛОВОГО СОГЛАСУЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ АТОМНОГО ЛЕДОКОЛА ПРОЕКТА 22220

Объект и цель научной работы. Объектом работы является силовой трехфазный трансформатор с воздушно-барьерной изоляцией, используемый для согласования напряжения питания статического преобразователя частоты и асинхронного гребного электродвигателя с судовой сетью в составе системы электродвижения (СЭД) универсально-атомного ледокола (УАЛ) проекта 22220.

Цель состоит в рассмотрении процессов в цепях трансформатора в аварийном режиме внешнего короткого замыкания для оценки его влияния на электродинамическую стойкость обмоток. Настоящая работа проводится в связи с несколькими случаями выхода из строя указанных трансформаторов по причине коротких замыканий в обмотках вторичной цепи, возникших во время штатной эксплуатации на УАЛ «Арктика» и ходовых испытаний на УАЛ «Сибирь».

Материалы и методы. Исходным материалом является научно-техническая информация о силовых трансформаторах с воздушно-барьерной изоляцией обмоток. Особенностью рассматриваемого трансформатора является наличие в его первичной цепи комбинированной обмотки, состоящей из двух частей, соединенных по схеме «скользящего треугольника», а во вторичной цепи – двух независимых обмоток, соединенных соответственно «треугольник – звезда». В работе использованы уравнения равновесия напряжений в контурах трансформатора в векторной форме, соотношения для расчета параметров схем замещения, а также техническая информация о характере воздействия электродинамических сил на его обмотки.

Основные результаты. Получены результаты расчета токов в цепях трансформатора в процессе возможного внешнего короткого замыкания во вторичной цепи. Сформулировано основное требование к конструкции трансформатора в связи с влиянием указанных токов на их электродинамическую стойкость.

Закключение. Практическая ценность полученных результатов в связи с влиянием короткого замыкания на электродинамическую стойкость трансформатора состоит в обосновании требования высокой монолитности обмоток с использованием литой изоляции и необходимости защиты каждого трансформатора от перегрузки и короткого замыкания.

Ключевые слова: гребной электродвигатель, статический преобразователь частоты, силовой согласующий трансформатор, токи короткого замыкания, электродинамическая стойкость.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 621.314.26+629.561.5
EDN: NRMSIB

A.V. Baiko, B.A. Skvortsov , M.Yu. Khmel
SET Branch of Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

ON SELECTION OF MATCHING POWER TRANSFORMER FOR ELECTRIC PROPULSION SYSTEM OF PROJECT 2222 NUCLEAR ICEBREAKER

Object and purpose of research. This paper discusses a three-phase air-insulated power transformer for matching feed voltage of static frequency converter and asynchronous propulsion motor with the ship's grid, as part of electric propulsion system of Project 22220 multi-role nuclear icebreaker.

Для цитирования: Байко А.В., Скворцов Б.А., Хмель М.Ю. К выбору силового согласующего трансформатора в составе системы электродвижения атомного ледокола проекта 22220. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 1(407): 65–76.

For citations: Baiko A.V., Skvortsov B.A., Khmel M.Yu. On selection of matching power transformer for electric propulsion system of Project 2222 nuclear icebreaker. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 1(407): 65–76 (in Russian).

The purpose of this study was to investigate the processes taking place in transformer circuits in emergency mode (external fault) to estimate its implications for electrodynamic robustness of windings. This is a relevant task because there have been several cases of these transformers going out of order due to the shorts in secondary circuit windings during standard operation of *Arktika* multi-role nuclear icebreaker and sea trials of its sistership *Sibir*'.

Materials and methods. This paper is based on available scientific and technical information about air-insulated power transformers. Design peculiarity of this transformer type is that its primary circuit has a combined winding made up of two parts with sliding-triangle connection, and its secondary circuit consists of two independent windings with triangle-star connection. The study applies voltage equilibrium equations (in the vector form) for transformer circuits, as well as the expressions for equivalent circuit parameters, and technical details about the effect of electrodynamic forces upon transformer windings.

Main results. The study yielded the currents in transformer circuits in case of external fault in the secondary circuit. The authors managed to formulate the main requirement to transformer design to compensate the effect of these currents upon electrodynamic robustness of circuits.

Conclusion. Practical value of this study in terms of fault effect upon electrodynamic robustness of transformer is that the authors managed to demonstrate why the windings must be highly monolithic and their isolation must be molded, as well as to show that every transformer must have protection against overloads and shorts.

Keywords: propulsion motor, static frequency converter, matching power transformer, fault currents, electrodynamic robustness.

The authors declare no conflicts of interest.

При создании судовых систем электродвижения (СЭД) переменного тока средней и большой мощности возникает проблема обоснованного выбора электрооборудования, входящего в их состав. Речь, в частности идет о варианте силового согласующего трансформатора, который устанавливается на входе статического преобразователя частоты (ПЧ)

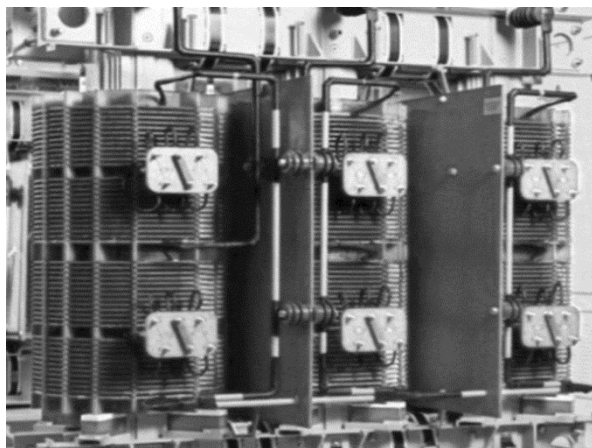


Рис. 1. Внешний вид силового согласующего трансформатора типа ТРСЗП мощностью 6000 кВт с воздушно-барьерной изоляцией обмоток, установленного на входе преобразователя частоты ГЭД и обладающего перегрузочной способностью до 140 % при эксплуатации в диапазоне температур от +45 °С до –60 °С

Fig. 1. TRSZP-type 6000 kW matching power transformer with air insulation of windings at the input of propulsion motor frequency converter. Overload capacity up to 140% at temperatures between +45 and –60 °C

со звеном постоянного тока, предназначенного для питания одной из статорных обмоток регулируемого гребного электродвигателя (ГЭД).

В качестве критериев при выборе силовых трансформаторов обычно рассматривают их технические характеристики на соответствие требованиям, предъявляемым к электрооборудованию в судовых условиях эксплуатации, например, со стороны Российского морского регистра судоходства (РМРС). Одним из таких требований является электродинамическая стойкость обмоток трансформатора при одновременном воздействии токов перегрузки или короткого замыкания (к.з.) и параметров внешней среды [1, 2].

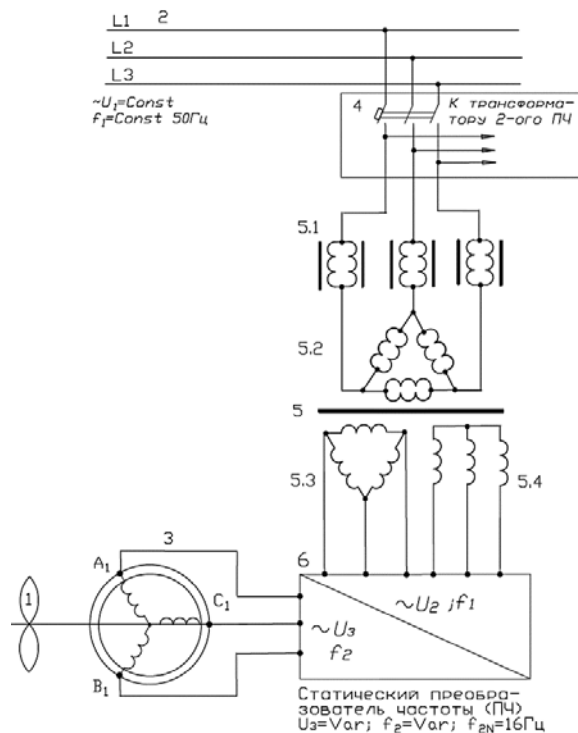
В настоящее время в составе СЭД универсального атомного ледокола (УАЛ) проекта 22220 в качестве регулируемых ГЭД установлены три двухкорпусных асинхронных двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью по 20 МВт, в каждом корпусе которого на статоре размещены по две трехфазные обмотки. Питание каждой из четырех трехфазных обмоток на обоих корпусах ГЭД осуществляется от статического ПЧ, в составе которого на входе к двум трехфазным выпрямительным мостам подключен силовой согласующий трансформатор ТРСЗП 6000/10-ОМ4 мощностью 6,0 МВт с обмотками катушечного типа с воздушно-барьерной изоляцией (рис. 1) [3].

Первичная обмотка высокого напряжения (ВН) согласующего трансформатора 5, изображенного на структурной схеме соединения элементов СЭД (рис. 2), состоит из двух частей 5.1 и 5.2, соединенных последовательно, и попарно посредством комплектного распределительного устройства (КРУ) 4 подключена к трехфазной судовой сети 2 с напря-

Рис. 2. Структурная схема соединения элементов СЭД и судовой сети с использованием силового согласующего трансформатора:

1 – гребной винт; 2 – судовой сеть с неизменными параметрами; 3 – одна из трехфазных обмоток статора ГЭД; 4 – выключатель комплектного распределительного устройства; 5 – согласующий силовой трансформатор (5.1, 5.2 – две части комбинированной первичной обмотки, соединенные по схеме «скользящего треугольника»; 5.3 – вторичная обмотка, соединенная по схеме Δ ; 5.4 – вторичная обмотка, соединенная по схеме Y); 6 – статический преобразователь частоты

Fig. 2. Schematic diagram of interfacing propulsion motor elements with ship grid via matching power transformer:
1 – propeller; 2 – ship grid with constant parameters;
3 – one of stator windings (three-phased) of propulsion motor; 4 – breaker of packaged switchgear;
5 – matching power transformer (5.1, 5.2 – two parts of combined primary winding, sliding-triangle connection, 5.3 – secondary winding, delta connection; 5.4 – secondary winding, wye connection);
6 – static frequency converter



жением $U_1 = 10,5 \text{ кВ}$, $f_1 = 50 \text{ Гц}$. Две вторичные независимые обмотки 5.3 и 5.4 низкого напряжения (НН) $U_2 = 1,95 \text{ кВ}$, соединенные по схемам Δ и Y , подключены к выпрямительным мостам на входе ПЧ 6, выход которого в свою очередь подключен к одной из трехфазных обмоток ГЭД 3.

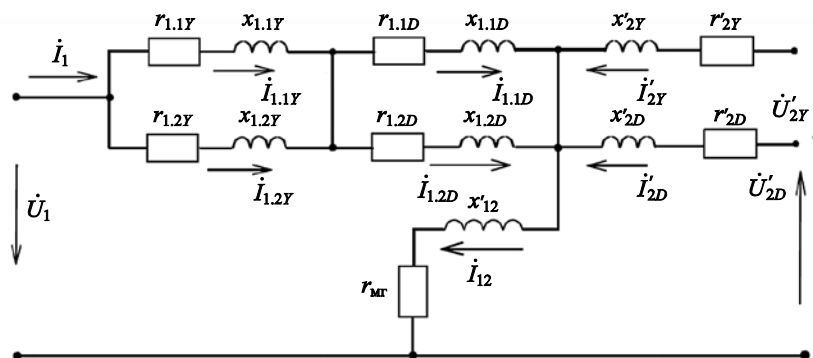
Следует отметить, что попарное подключение согласующих трансформаторов к одному КРУ является неправильным вариантом их соединения с судовой сетью. По требованию РМРС для каждого согласующего трансформатора, установленного на входе ПЧ СЭД, должна быть предусмотрена защита со стороны первичной и вторичной цепи, от

токов перегрузки и к.з., которая обычно осуществляется при помощи индивидуального КРУ [1].

В соответствии со структурной схемой, изображенной на рис. 2, схема замещения согласующего трансформатора имеет вид, представленный на рис. 3, в которой параметры вторичных обмоток приведены к параметрам первичной цепи. При этом магнитные потери, обусловленные наличием гистерезиса в стали магнитопровода и обозначаемые в виде активного сопротивления $r'_{\text{мг}}$ в цепи намагничивания, в дальнейшем при расчете токов к.з. в рассматриваемом трансформаторе мощностью 6000 кВт не учитываются [3].

Рис. 3. Схема замещения силового согласующего трансформатора с приведенными параметрами вторичных обмоток к первичной цепи

Fig. 3. Equivalent circuit for matching power transformer with secondary winding parameters corresponding to the primary circuit



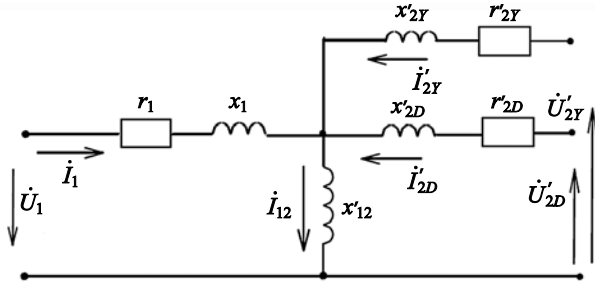


Рис. 4. Схема замещения силового согласующего трансформатора с эквивалентными параметрами первичной цепи и с приведенными параметрами вторичных обмоток к первичной цепи

Fig. 4. Equivalent circuit for matching power transformer with equivalent parameters of primary circuit and secondary winding parameters corresponding to the primary circuit

Особенностью рассматриваемого трансформатора является наличие в его первичной цепи комбинированной обмотки, которая состоит из двух частей, соединенных последовательно по схеме «скользящего треугольника» для обеспечения фазового сдвига между обмотками первичной и вторичной цепей, равного 15° (24-пульсной схемы выпрямления) [3]. Причем каждая из двух частей первичной обмотки, согласно схеме замещения на рис. 3, состоит из двух параллельных ветвей.

Параметры каждой из ветвей, используя комплексную форму записи, могут быть представлены для одной из фаз в виде выражений (1):

$$\left. \begin{aligned} z_{1.1Y} &= r_{1.1Y} + jx_{1.1Y}; \\ z_{1.2Y} &= r_{1.2Y} + jx_{1.2Y}; \\ z_{1.1D} &= r_{1.1D} / \sqrt{3} + jx_{1.1D} / \sqrt{3}; \\ z_{1.2D} &= r_{1.2D} / \sqrt{3} + jx_{1.2D} / \sqrt{3}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Нетрудно видеть, что схему замещения (рис. 3) можно упростить, заменяя реальные части и ветви первичной обмотки на обмотку по схеме Y (рис. 4) с эквивалентными параметрами каждой фазы в виде выражений (2):

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{r_{1.1Y} \cdot r_{1.2Y}}{r_{1.1Y} + r_{1.2Y}} + \frac{r_{1.1D} \cdot r_{1.2D}}{\sqrt{3}(r_{1.1D} + r_{1.2D})}; \\ x_1 &= \frac{x_{1.1Y} \cdot x_{1.2Y}}{x_{1.1Y} + x_{1.2Y}} + \frac{x_{1.1D} \cdot x_{1.2D}}{\sqrt{3}(x_{1.1D} + x_{1.2D})}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для отображения процессов изменения токов в контурах трансформатора в случае к.з. в обмотках вторичной цепи при общепринятых допущениях

и с учетом только основных гармоник напряжений и токов можно воспользоваться классическими уравнениями равновесия напряжений в векторной форме, представленными в системе комплексных координат [4].

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 r_1 + jx_1 \cdot \dot{I}_1 + jx'_{12}(\dot{I}_1 + \dot{I}'_{2Y} + \dot{I}'_{2D}); \\ -\dot{U}'_{2Y} &= \dot{I}'_{2Y} r'_{2Y} + jx'_{2Y} \dot{I}'_{2Y} + jx'_{12}(\dot{I}'_{2Y} + \dot{I}_1 + \dot{I}'_{2D}); \\ -\dot{U}'_{2D} &= \dot{I}'_{2D} r'_{2D} + jx'_{2D} \dot{I}'_{2D} + jx'_{12}(\dot{I}'_{2D} + \dot{I}_1 + \dot{I}'_{2Y}). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Представляя напряжения и токи в уравнениях (3) в системе комплексных координат (вещественной – d и мнимой – q) и совмещая вектор напряжения судовой сети \dot{U}_1 с направлением вещественной оси, можно получить выражения для указанных величин в виде системы комплексных функций (4).

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= u_{d1}; \quad \dot{I}_1 = i_{d1} + j\dot{i}_{q1}; \\ \dot{U}'_{2Y} &= u_{d2Y} + ju_{q2Y}; \quad \dot{I}'_{2Y} = i'_{d2Y} + j\dot{i}'_{q2Y}; \\ \dot{U}'_{2D} &= u_{d2D} + ju_{q2D}; \quad \dot{I}'_{2D} = i'_{d2D} + j\dot{i}'_{q2D}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Исключая векторы токов в цепи намагничивания вместе с параметрами, образованными взаимными индуктивностями обмоток, в каждом из уравнений (3) методом их попарного вычитания можно получить выражения для векторов напряжений на зажимах обмоток первичной и вторичной цепей в функции векторов соответствующих токов и параметров трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{U}'_{2Y} &= \dot{I}_1(r_1 + jx_1) - \dot{I}'_{2Y}(r'_{2Y} + jx'_{2Y}); \\ \dot{U}'_{2D} - \dot{U}'_{2Y} &= \dot{I}'_{2Y}(r'_{2Y} + jx'_{2Y}) - \dot{I}'_{2D}(r'_{2D} + jx'_{2D}); \\ \dot{U}_1 + \dot{U}'_{2D} &= \dot{I}_1(r_1 + jx_1) - \dot{I}'_{2D}(r'_{2D} + jx'_{2D}). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Полученная система уравнений (5), а также система (3) действительны при любых закономерностях изменения напряжения и токов во времени, в т.ч. в случае переходных процессов при возникновении внешнего к.з. в одной или обеих вторичных обмотках трансформатора [4]. При этом модули и аргументы векторов напряжений и токов в уравнениях (3) и (5) по определению комплексных чисел вычисляются по формулам, представленным в табл. 1.

Как известно, порядок расчета установившихся токов при к.з. в обмотках или в ответвлениях обмотки силовых трансформаторов определен требованиями нормативных документов [5]. Согласно ГОСТ Р 55188-2012 (МЭК 60076-5:2006) установившийся ток к.з. (действующее значение)

определяется с учетом сопротивления питающей сети по формуле:

$$I_{к.отв} = \frac{U_{ном.отв}}{\sqrt{3}(z_{т.отв} + z_c)}, \quad (6)$$

где $I_{к.отв}$ – наибольший установившийся линейный ток к.з. ответвления, кА; $U_{ном.отв}$ – номинальная линейное напряжение ответвления, кВ;

$$z_{т.отв} = \frac{U_{к.отв} \cdot U_{ном.отв}^2}{S_{ном.}} - \text{фазное сопротивление к.з.,}$$

отнесенное к рассматриваемому ответвлению (обмотке), Ом; $U_{к.отв}$ – значение напряжения к.з. ответвления (обмотки), приведенное к номинальной мощности трансформатора, %; $S_{ном.}$ – номинальная

мощность трансформатора, МВА; $z_c = \frac{U_{с.ном}^2}{S_c}$ –

фазное сопротивление к.з. сети, Ом; $U_{с.ном}$ – номинальное линейное напряжение сети, кВ; S_c – мощность трехфазного к.з. сети, МВА.

В случае если $z_{т.отв} \gg z_c$, то можно принять $z_c = 0$, тогда действующее значение наибольшего установившегося тока короткого замыкания определяется по упрощенной формуле:

$$I_{к.отв.} = U_{ном.отв.} / \sqrt{3} \cdot z_{т.отв.}. \quad (7)$$

Однако в начальный момент ток к.з. вследствие наличия аperiodической составляющей может значительно превысить установившийся ток и вызвать механические силы между витками и обмотками в целом, превышающие в несколько раз силы при установившемся токе к.з.

Поэтому возникает необходимость по уравнениям системы (3) или (5) произвести расчет переходного процесса изменения ударных токов при внезапном внешнем к.з. в одной или обеих обмотках вторичной цепи. В реальных условиях эксплуатации указанный аварийный процесс может произойти при выходе из строя (к.з.) двух и более вентилях в одном или обоих выпрямительных мостах,

Таблица 1. Формулы для расчета модулей и аргументов векторов напряжений и токов в обмотках трансформатора

Table 1. Calculation expressions for moduli and arguments of voltage and current vectors in transformer windings

№ п/п	Параметры векторов	Формула
1	Модуль вектора напряжения (основной гармоники) питания первичной обмотки при совмещении вектора напряжения судовой сети с направлением вещественной оси (координаты d)	$ \dot{U}_1 = U_1$ $u_{d1} = U_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \psi); \omega_1 = 2\pi f_1$
2	Модуль вектора (амплитуда гармоники) тока первичной обмотки и его фаза относительно напряжения U_1	$ \dot{I}_1 = I_1 = \sqrt{i_{d1}^2 + i_{q1}^2}$ $\varphi_1 = \arccos i_{d1} / \sqrt{i_{d1}^2 + i_{q1}^2}$
3	Модуль вектора (амплитуда гармоники) напряжения вторичной обмотки по схеме Y и его фаза относительно оси d	$ \dot{U}_{2Y} = U_{2Y} = \sqrt{u_{d2Y}^2 + u_{q2Y}^2}$ $\theta_1 = (\theta_{10} + \arccos u_{d2Y}) / \sqrt{u_{d2Y}^2 + u_{q2Y}^2}$
4	Модуль вектора (амплитуда гармоники) напряжения вторичной обмотки по схеме Δ и его фаза относительно оси d	$ \dot{U}_{2D} = U_{2D} = \sqrt{u_{d2D}^2 + u_{q2D}^2}$ $\theta_2 = (\theta_{20} + \arccos u_{d2D}) / \sqrt{u_{d2D}^2 + u_{q2D}^2}$
5	Модуль вектора (амплитуда гармоники) тока вторичной обмотки по схеме Y и его фаза относительно оси d	$ \dot{I}_{2Y} = I_{2Y} = \sqrt{i_{d2Y}^2 + i_{q2Y}^2}$ $\varphi_{2Y} = \varphi_{2Y0} + \arccos i_{d2Y} / \sqrt{i_{d2Y}^2 + i_{q2Y}^2}$
6	Модуль вектора (амплитуда гармоники) тока вторичной обмотки по схеме Δ и его фаза относительно оси d	$ \dot{I}_{2D} = I_{2D} = \sqrt{i_{d2D}^2 + i_{q2D}^2}$ $\varphi_{2D} = \varphi_{2D0} + \arccos i_{d2D} / \sqrt{i_{d2D}^2 + i_{q2D}^2}$

подключенных к вторичным обмоткам трансформатора.

Для выполнения указанного расчета необходимо иметь информацию о параметрах схемы замещения трансформатора ТРСЗП 6000/10-ОМ4, численные значения которых можно определить исходя из его паспортных данных, представленных в табл. 2 [3].

Для определения численных значений параметров схемы замещения предварительно по формулам, представленным в табл. 3, следует выполнить расчет характеристик и параметров трансформатора, полученных из опытов холостого хода и короткого замыкания, имея в виду, что последний осуществлялся при замкнутых накоротко обеих вторичных обмотках.

В этом случае без учета параметров цепи намагничивания сопротивления к.з. ($r_k; x_k$) могут

быть выражены через параметры схемы замещения (рис. 4) следующим образом:

$$r_k \cong r_1 + \frac{r'_{2Y} \cdot r'_{2D}}{r'_{2Y} + r'_{2D}}; \quad x_k \cong x_1 + \frac{x'_{2Y} \cdot x'_{2D}}{x'_{2Y} + x'_{2D}}. \quad (8)$$

В результате соответствующих преобразований и решения уравнений (5) относительно тока I_1 получено выражение (9) для расчета вынужденной и свободной составляющих тока в первичной цепи при внезапном внешнем к.з. трансформатора в наиболее неблагоприятном режиме его работы на холостом ходу [3]:

$$i_{1k} = I_{1m} \sin(\omega t + \psi - \varphi_{1k}) - I_{1m} \sin(\psi - \varphi_{1k}) \cdot e^{-R_k \cdot t / L_k}, \quad (9)$$

где $I_{1m} = \sqrt{2} \cdot I_{k.отв} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}}$ – амплитуда основной гармоники установившегося тока к.з.; $L_k = x_k / \omega_1$ –

Таблица 2. Паспортные данные трансформатора ТРСЗП 6000/10-ОМ4

Table 2. Specifications of transformer TRSZP ТРСЗП 6000/10-ОМ4

№ п/п	Наименование параметра	Величина
1	Полная мощность, кВА	$S = 6300$
2	Номинальная (активная) мощность (из расчетов 1ЭФО.003.268-01РР), кВт	$P = 6000$
3	Напряжение линейное обмотки ВН (первичное), В	$U_1 = 10\,500$
4	Напряжение линейное обмотки НН (первичное), В	$U_2 = U_3 = 1945$
5	Число фаз	3
6	Схема соединения обмотки ВН	$\Delta_{автo}$
7	Схемы соединения обмоток НН	$\Delta-Y$
8	Потери холостого хода, Вт	$P_0 = 7654$
9	Ток холостого хода, %	$I_0 = 0,21$
10	Потери короткого замыкания для двух обмоток, Вт	$P_{кз} = 40\,000$
11	Напряжение короткого замыкания сквозное (двух обмоток на фазе), %	$u_{кз} = 7,7$
12	Особенности обмотки ВН (10,5 кВ)	Обмотка расщепленная
13	Количество обмоток ВО на фазу, $N_{во}$	$N_{во} = 2$
14	Количество витков обмотки ВО1-Δ	45
15	Количество витков обмотки ВО2-Y	26
16	Количество витков обмотки СО-Δ	197
17	Количество витков обмотки СО-Y «продолженной»	37
18	Напряжение вольт/виток, В	44,5

индуктивность цепи короткого замыкания; $\varphi_{1к} = \arctg x_k/r_k$ – фаза установившегося тока к.з.; ψ – фаза первоначального сдвига питающего напряжения.

Нетрудно видеть, что величина свободной составляющей в выражении (9) приобретает наиболь-

шее значение при $(\psi - \varphi_{1к}) = -\pi/2$, а значение тока $i_{1к}$ достигает максимального значения при $t = \pi/\omega_1$, определяемого по формуле (10):

$$i_{1км} = I_{1м}(1 + e^{-\pi r_k/x_k}). \quad (10)$$

Таблица 3. Расчет характеристик и параметров трансформатора

Table 3. Calculation of transformer characteristics and parameters

№ п/п	Наименование характеристики, параметра	Формула	Результат расчета
1	Линейный (фазный) ток холостого хода, А	$I_{0л} = I_{0ф} = \frac{I_0 \cdot S \cdot 10^3}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot U_1}$	0,73
2	Параметры холостого хода:		
2.1	Полное сопротивление, Ом	$z_0 = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot I_{0ф}}$	8314,2
2.2	Активное сопротивление, Ом	$r_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_{0ф}^2}$	4787,6
2.3	Реактивное сопротивление, Ом	$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}$	6797,4
2.4	Реактивное сопротивление цепи намагничивания, Ом	$x_{12} = x_0 - x_1 \cong x_0$	6797
3	Линейный ток первичной обмотки ВН, А	$I_{1л} = I_{1ф} = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_1}$	346,8
4	Параметры, определяемые из опыта короткого замыкания обеих обмоток НН:		
4.1	Полное сопротивление к.з. на фазу, Ом	$z_k = \frac{U_1 \cdot u_{кз}}{100 \sqrt{3} \cdot I_{1ф}}$	1,347
4.2	Активное сопротивление к.з. на фазу, Ом	$r_k = \frac{P_{кз}}{3 \cdot I_{1ф}^2}$	0,111
4.3	Реактивное сопротивление к.з. на фазу, Ом	$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$	1,3424
5	Активные сопротивления схемы замещения, Ом	$r_1 = r'_{2Y} = r'_{2D} = \frac{2R_K}{3}$	0,074
6	Реактивные сопротивления схемы замещения, Ом	$x_1 = x'_{2Y} = x'_{2D} = \frac{2X_K}{3}$	0,895
7	Коэффициенты трансформации обмоток НН:		
7.1	Обмотка, соединенная Y	$K_{1Y} = \frac{U_1}{U_2}$	5,4
7.2	Обмотка, соединенная Δ	$K_{1D} = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot U_3}$	3,12

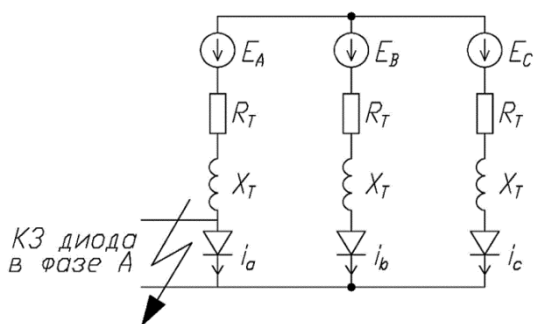


Рис. 5. Эквивалентная схема трехфазного мостового выпрямителя для расчета случая выхода из строя одного вентиля (внутреннее короткое замыкание выпрямителя)

Fig. 5. Equivalent circuit for three-phase bridge rectifier used in calculation of single-valve failure (internal fault of rectifier)

Как показали результаты расчета по формуле (10), процесс внезапного внешнего к.з. трансформатора сопровождается многократным (~ в 24 раза) увеличением тока в первичной цепи.

В другом случае, при выходе из строя только одного вентиля в одном из двух трехфазных мостовых выпрямителей (внутреннее к.з. выпрямителя), расчет процесса внезапного к.з. трансформатора производил-

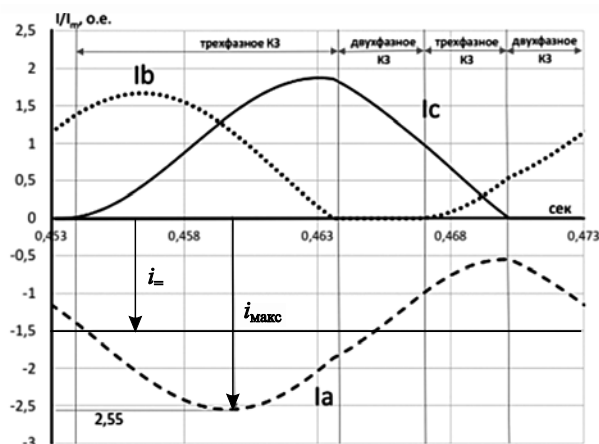


Рис. 6. Графики изменения ударных токов трансформатора по результатам математического моделирования режима внутреннего короткого замыкания в трехфазном выпрямителе:

$i_{\text{с}}$ – постоянная составляющая ударного тока;
 $i_{\text{макс}}$ – максимальная величина ударного тока

Fig. 6. Shock current diagrams for the transformer as per mathematical simulation results for internal fault in three-phase rectifier:

$i_{\text{с}}$ – constant component of shock current;
 i_{max} – maximum shock current

ся с использованием математического моделирования в соответствии с эквивалентной схемой (рис. 5) [6].

В указанном случае параметры к.з. R_T ; $X_T = 2\pi f_1 \cdot L_T$ (рис. 5) были получены на основании данных протоколов приемо-сдаточных испытаний трансформатора ТРСЗП 6000/10-ОМ4 и после приведения к напряжению вторичной цепи составляли следующие значения: $R_T = 3,6 \cdot 10^{-3}$ Ом; $X_T = 83,2 \cdot 10^{-3}$ Ом.

На рис. 6 представлены графики изменения ударных токов трансформатора по результатам математического моделирования режима внутреннего к.з. выпрямителя, выполненного в программе PSIM по схеме рис. 5. На представленных графиках величины ударных токов в каждой фазе трансформатора, отнесенные к амплитуде установившегося тока внешнего к.з., полученного в предыдущем случае, являются функциями времени и зависят от момента начала внутреннего к.з. выпрямителя.

Как видно из графика изменения ударного тока I_a в поврежденной фазе (рис. 6), его максимальное значение может достигать $I_a = 2,55 \cdot I_{\text{ам}}$ амплитуды установившегося тока к.з. в формуле (9), а по отношению к ударному току при внезапном внешнем к.з., рассчитанному по формуле (10), превышение составляет $I_a = 1,4 \cdot i_{\text{км}}$, что, несомненно, необходимо учитывать при расчете электродинамической стойкости обмоток трансформатора.

Очевидно, что полученные в обоих случаях ударные токи к.з. в проводниках обмотки, взаимодействуя с суммарным магнитным полем рассеяния обмотки, создают электродинамические силы, воздействующие на элементы ее конструкции.

Известно, что конструкция многослойной обмотки катушечного типа с воздушно-барьерной изоляцией состоит из проводников (медных шин), которые разделены витковой изоляцией в виде прокладок (барьеров), изготовленных из прессованного текстолита или стеклопластика [7]. Между катушками размещены изолирующие прокладки в виде реек из тех же материалов, одновременно создающие вертикальные каналы воздушного охлаждения.

Механические силы, действующие на проводники обмотки при внезапном к.з., зависят от взаимного расположения обмоток, направления токов в них, распределяются между витками неравномерно и ориентировочно соответствуют картине распределения индукции магнитного поля рассеяния (рис. 7) [7]. Суммируясь, они передают усилия на изолирующие прокладки или рейки между катушками. При отсутствии монолитной структуры катушек эти силы могут привести к их деформации или разрушению с образованием внутреннего к.з.

части витков обмотки и, как следствие, к аварийной ситуации с локальным выделением большого количества тепла (рис. 8б).

Подробный анализ полей рассеяния и их взаимодействие оками к.з. в многослойных обмотках представляет собой достаточно сложную задачу и подробно изложен в ряде работ по расчету и проектированию трансформаторов [7, 8], в т.ч. с применением компьютерных программ (ELCUT и др.) [8], в настоящей статье не рассматривается.

Для противодействия электромагнитным силам в многослойных обмотках с воздушно-барьерной изоляцией обычно используют средства, повышающие уровень монолитности их структуры. В частности, в радиальном направлении это достигается путем усиленного натяжения медной шины при намотке, в осевом – путем опрессовки ее после намотки, а также повторной пропиткой обмотки терморезистивными смолами или лаками [7].

Другим средством, повышающим монолитность, является изготовление обмоток из специальной медной шины с полиамидно-фторопластовой изоляцией, усиленной стекловолокном. Затем после многократной пропитки кремне-органическим компаундом каждого слоя обмотки можно создать монолитную структуру (рис. 9), которая получила название «воздушно-барьерный монолит» [9].

Для достижения более высокой монолитности обмоток широко используется технология изготовления обмоток из медной ленты или фольги с нормированными параметрами по толщине и ширине. В таких обмотках межслоевая изоляция равномерно в процессе намотки укладывается высокоточным оборудованием и заливается эпоксидным компаундом в вакууме с образованием герметичной литой

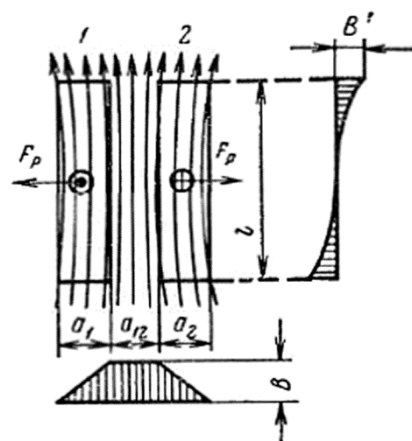


Рис. 7. Примерная картина распределения магнитного поля рассеяния в продольном и поперечном направлениях в многослойной обмотке катушечного типа: B – индукция магнитного поля между обмотками 1 и 2 в радиальном направлении; B' – индукция магнитного поля внутри обмотки в продольном направлении; F_p – механические силы, действующие на проводники обмотки в радиальном направлении

Fig. 7. Approximate distribution of magnetic field scattering in longitudinal and transverse directions for a multi-layered winding coil: B – magnetic induction between windings 1 and 2 in radial direction; B' – magnetic induction inside winding, longitudinal direction; F_p – mechanical forces acting on winding conductors in radial direction

изоляции с высоким уровнем электрической и механической прочности, а также теплопроводности.

Как отечественные, так и зарубежные производители обладают уже более чем 20-летним опытом изготовления силовых трансформаторов с использованием подобной технологии [8, 10–12].

Рис. 8. Наружная часть первичной обмотки трансформатора ТРСЗП 6000/10-ОМ4 с воздушно-барьерной изоляцией: а) схема ее расположения (F_p , F_{oc} – механические силы, действующие на проводники обмотки соответственно в радиальном и осевом направлениях); б) ее изображение после повреждения в результате внезапного короткого замыкания во вторичной цепи

Fig. 8. Outer part of the primary winding for transformer TRSZP 6000/10-OM4 with air insulation: а) diagram of its arrangement (F_p , F_{oc} – mechanical forces acting on winding conductor in radial and axial directions respectively); б) same winding after damage due to sudden fault in secondary circuit

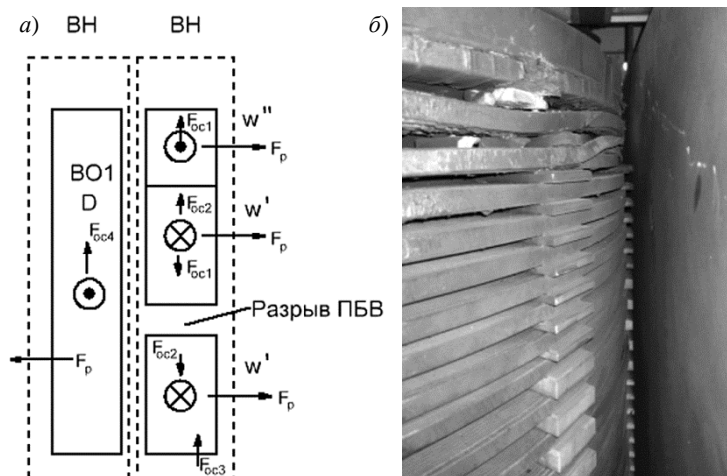




Рис. 9. Изображение преобразовательного трансформатора ТСП-2000/6-УЗ мощностью 2,0 МВА с многослойными катушечными обмотками и изоляцией (воздушно-барьерного монолита), обладающего перегрузочной способностью до 200 % в диапазоне температур от +40 до -60 °С и более высокой стойкостью к динамическим усилиям при токах короткого замыкания

Fig. 9. Converter transformer TSP-2000/6-UZ, 2.0 MVA, with multi-layered winding coils and isolation (air insulation, monolith), overload capacity up to 200 % at temperatures between +40 and -60 °C, enhanced resistance to dynamic forces due to short-circuit currents

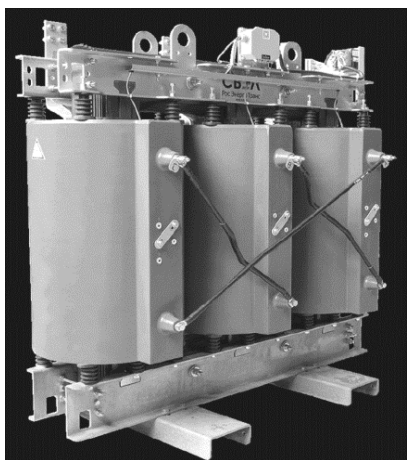


Рис. 10. Внешний вид силового трансформатора типа ТСЛ мощного ряда от 16 до 6300 кВА с литой изоляцией, который обладает высокой динамической стойкостью обмоток при токах короткого замыкания, высокой устойчивостью к ударам и вибрациям, а также выдерживает высокие показатели влажности до 100 % при эксплуатации в диапазоне температур от +40 до -60 °С

Fig. 10. TSL power transformer, 16–6300 kVA, featuring cast-resin insulation, high dynamic resistance of windings to short-circuit currents, high robustness against shocks and vibrations, and capability to work at humidity up to 100 % and temperatures between +40 and -60 °C

На рис. 10 представлен внешний вид силового трансформатора с литой изоляцией обмоток, изготовление которых осуществляет ряд российских предприятий (например, в Екатеринбурге это «СВЭЛ-РосЭнергоТранс», ООО «ЭНСОНС», ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока»).

За рубежом многие известные фирмы при строительстве судов различного назначения, решая вопросы выбора типа силового трансформатора, обычно заказывают трансформаторы с изоляцией обмоток по литой технологии. В частности, компания ABB для круизного судна ледового класса Le Commandant Charcot (2021 г. постройки), оснащенного двумя движителями типа Azipod® (носовым и кормовым), а также для ряда других судов более ранней постройки использует в составе СЭД согласующие силовые трехфазные трансформаторы с литой изоляцией типов DTE и RESIBLOC® [12].

Заключение

Conclusion

1. Уровень необходимого обоснования при выборе силовых согласующих трансформаторов, установленных на входе каждого статического преобразователя частоты в составе системы электродвижения УАЛ проекта 22220, в качестве которых использованы трансформаторы с воздушно-барьерной изоляцией обмоток, следует считать недостаточным.
2. Основное требование к конструкции силовых согласующих трансформаторов в составе системы электродвижения рассматриваемого типа судов и в связи с влиянием возможного короткого замыкания со стороны вторичной цепи состоит в обеспечении высокой монолитности обмоток, которое может быть достигнуто применением обмоток с литой изоляцией.
3. Каждый силовой согласующий трансформатор указанной мощности 6000 кВт в составе системы электродвижения при подключении к судовой сети должен обладать индивидуальной защитой со стороны первичной и вторичной цепей от перегрузки и короткого замыкания.

Список использованной литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI. Электрическое оборудование : НД 2-020101-174. Санкт-Петербург : Российский морской регистр судоходства, 2023. 422 с.

2. ГОСТ 52719-2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2007. 45 с.
3. Трансформаторы силовые сухие трехфазные общего назначения и преобразовательные, ООО «Электрофизика» : Свидетельство о типовом одобрении Российского морского регистра судоходства № 10.01966.011. Выдано 13.07.2010. URL: <https://clck.ru/38UWts> (дата обращения: 02.02.2024).
4. *Вольдек А.И.* Электрические машины. 3-е изд., перераб. Ленинград : Энергия, 1978. 832 с.
5. ГОСТ Р 55188-2012. Трансформаторы силовые. Стойкость к коротким замыканиям. Москва : Стандартинформ, 2014. IV, 27 с.
6. *Глух Е.М., Зеленов В.Е.* Защита полупроводниковых преобразователей. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергоиздат, 1982. 152 с.
7. *Тихомиров П.М.* Расчет трансформаторов : [учеб. пособие]. 5-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 526, [1] с.
8. Трансформатор трехфазный сухой с литой изоляцией // СВЭЛ. Комплексные решения в энергетике: общий каталог выпускаемой продукции. Екатеринбург, 2023. С. 22. URL: <https://clck.ru/38SmiL> (дата обращения: 02.02.2024).
9. Преобразовательные трансформаторы для выпрямительных и инверторных установок // КППМ : [официальный сайт]. Санкт-Петербург, 2023. URL: <https://complectprom.ru/transformers/preobrazovatelnye-transformatory/> (дата обращения: 10.01.2024).
10. Сухие трансформаторы ТЛС(З) // Энсонс : [официальный сайт]. Екатеринбург, 2023. URL: https://ensons.ru/products/tlsz_6-10 (дата обращения: 10.01.2024).
11. Трансформаторы силовые трехфазные литые // Свердловский завод трансформаторов тока : [официальный сайт]. Екатеринбург, 2023. URL: <https://www.cztz.ru/catalog/silovye-transformatory/transformatory-trekhfaznye-litye> (дата обращения: 10.01.2024).
12. Manual_VCC DRY transformers_rus.pdf // library.e.abb.com : [сайт] (дата обращения: 20.02.2024). URL: <https://clck.ru/38UWts> (Accessed: 02.02.2024) (in Russian).
4. *Voldek A.* Electric machines. Moscow : Energyia, 1978. 840 p. (in Russian).
5. GOST R 55188-2012. Power transformers. Ability to withstand short circuit. Moscow : Standartinform, 2014. IV, 27 p. (in Russian).
6. *Glukh Ye., Zelenov V.* Protection of semi-conductor converters. 2nd ed., rev. and enl. Moscow : Energoizdat, 1982. 152 p. (in Russian).
7. *Tikhomirov P.* Calculation of transformers. Student's guide. 5th ed., rev. and enl. Moscow : Energoatomizdat, 1986. 526[1] p. (in Russian).
8. Cast-resin dry-type transformer, three-phase // SVEL Group. Turnkey Solutions in Power Engineering : Product Catalogue. URL: https://svel.ru/upload/SVEL_Product_Catalogue.pdf (Accessed: 02.02.2024).
9. Converter transformers for rectifiers and inverters : Official website of KPM company. URL: <https://complectprom.ru/en/transformers/preobrazovatelnye-transformatory/> (Accessed: 10.01.2024).
10. Dry-type transformers TLS(Z) : Official website of ENSONS. URL: https://ensons.ru/products/tlsz_6-10 (Accessed: 10.01.2024) (in Russian).
11. Power transformers, three-phase, cast-resin. Sverdlovsk Factory of Current Transformers : Official website. URL: <https://www.cztz.ru/catalog/silovye-transformatory/transformatory-trekhfaznye-litye> (Accessed: 10.01.2024) (in Russian).
12. Manual_VCC DRY transformers_rus.pdf // library.e.abb.com : [site]. (Accessed: 20.02.2024) (in Russian).

References

1. RS Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships (2023 edition). Part XI. Electric equipment.
2. Standard GOST 52719-2007. Power transformers. General requirements. Moscow : Standartinform, 2007. 45 p. (in Russian).
3. Power transformers, dry, three-phase, converter-type and general-purpose, JSC Elektrofizika. Type Approval Certificate of Russian Maritime Register of Shipping No.10.01966.011, issued on July 13, 2010.

Сведения об авторах

Байко Алексей Валерианович, начальник сектора НИО-11 филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., 6. Тел.: +7 (812) 748-52-40.

Скворцов Борис Алексеевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник НИО-11 филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., 6. Тел.: +7 (812) 748-52-40. E-mail: boris-skvorcov@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7351-4211>.

Хмель Михаил Юрьевич, инженер по наладке и испытаниям отдела сервисного обеспечения проектов филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., 6. E-mail: t89095838912@yandex.ru.

About the authors

Alexey V. Baiko, Head of Sector, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-40.

Boris A. Skvortsov, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. E-mail: boris-skvorcov@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7351-4211>.

Mikhail Yu. Khmel, STW & Testing Engineer, Service Support Department, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. E-mail: t89095838912@yandex.ru.

Поступила / Received: 15.12.23

Принята в печать / Accepted: 01.03.24

© Байко А.В., Скворцов Б.А., Хмель М.Ю., 2024