

УДК 621.3.04+629.5.035.5  
EDN: POFNNH

А.А. Мартынов<sup>1, 2</sup> , И.А. Горюшкин<sup>1</sup>, С.К. Ляпидов<sup>1</sup>, Д.В. Соколов<sup>1</sup>, В.И. Симухин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ПРОБОЕ ДИОДОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГРЕБНОГО ВИНТА

**Объект и цель научной работы.** Объектом является трансформатор преобразователя частоты электропривода гребного винта. Цель заключается в исследовании переходных процессов трансформатора, возникающих при пробое диодов преобразователя частоты электропривода гребного винта.

**Материалы и методы.** Исследование проводилось с использованием программной среды Matlab-Simulink.

**Основные результаты.** Определены основные параметры переходных процессов короткого замыкания трансформатора при пробое диодов преобразователя частоты электропривода гребного винта. Сформулированы рекомендации по повышению электродинамической и термической стойкости трансформатора.

**Заключение.** Результаты выполненного исследования должны способствовать повышению надежности системы электродвижения корабля.

**Ключевые слова:** трансформатор, выпрямитель, диоды, короткое замыкание, ток, напряжение, время переходного процесса.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

UDC 621.3.04+629.5.035.5  
EDN: POFNNH

A.A. Martynov<sup>1, 2</sup> , I.A. Goryushkin<sup>1</sup>, S.K. Lyapidov<sup>1</sup>, D.V. Sokolov<sup>1</sup>, V.I. Simukhin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TsNII SET branch of Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

## SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN A TRANSFORMER DURING BREAKDOWN OF DIODES IN THE FREQUENCY CONVERTER OF THE ELECTRIC PROPELLER DRIVE

**Object and purpose of research.** The object is the frequency converter transformer of propulsion electric drive. The purpose is to investigate transient processes occurring in the transformer when the frequency converter diodes of the propeller electric drive are broken.

**Materials and methods.** The study was carried out using the Matlab-Simulink software environment.

**Main results.** The main parameters of short-circuit transients are determined in case of diode breakdown in the frequency converter of the propeller electric drive. Recommendations for improving the electrodynamic and thermal resistance of a power transformer are formulated.

**Conclusion.** The results of the study should contribute to improving the reliability of the ship's electric propulsion system.

**Keywords:** transformer, rectifier, diodes, short circuit, current, voltage, transient time.

*The authors declare no conflicts of interest.*

*Для цитирования:* Мартынов А.А., Горюшкин И.А., Ляпидов С.К., Соколов Д.В., Симухин В.И. Моделирование электромагнитных процессов трансформатора при пробое диодов преобразователя частоты электропривода гребного винта. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 2(408): 87–98.

*For citations:* Martynov A.A., Goryushkin I.A., Lyapidov S.K., Sokolov D.V., Simukhin V.I. Simulation of electromagnetic processes in a transformer during breakdown of diodes in the frequency converter of the electric propeller drive. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 2(408): 87–98 (in Russian).

## Введение

### Introduction

Важнейшим показателем, определяющим надежность и безотказность работы судового электропривода, является электродинамическая и термическая стойкость к коротким замыканиям трансформатора преобразователя частоты со звеном постоянного тока.

Требования к электродинамической и термической стойкости трансформатора определены стандартами [1–3]. Учитывая, что в стандарте нельзя учесть специфику коротких замыканий трансформаторов во всех возможных областях их применения, в стандарте [1] указано на то, что «стойкость трансформатора к частым сверхтокам по причине специфики применения или при работе в тяжелых условиях должна быть предметом специального соглашения между изготовителем и заказчиком. Заказчик должен заблаговременно известить изготовителя о любых возможных ненормированных условиях, ожидаемых в сети (сетях)». Следовательно, при разработке технического задания на расчет и изготовление трансформатора для преобразователя частоты заказчик должен обладать достоверной информацией по параметрам наиболее опасных видов коротких замыканий с учетом специфики его применения.

Исследования электромагнитных процессов короткого замыкания трансформаторов проводятся практически с момента их изобретения [4–6]. Среди работ, посвященных этой теме, можно отметить сборник статей сотрудников ВЭИ [7] по исследованию электродинамической и термической стойкости трансформаторов при коротких замыканиях. Завод – изготовитель трансформаторов, как правило, ограничивается данными по трехфазным, двухфазным, двухфазным на землю и однофазным внешним коротким замыканиям [2, 3]. Однако при работе трансформатора в составе преобразователя частоты судового электропривода возможны короткие замыкания, вызванные пробоем силовых полупроводниковых вентилях преобразователя. Характер переходных процессов при этом может существенно отличаться от переходных процессов коротких замыканий, перечисленных выше.

Ни один из действующих стандартов на трансформаторы не рассматривает короткие замыкания, вызванные пробоем силовых полупроводниковых вентилях преобразователя. Получение достоверной информации по параметрам коротких замыканий трансформатора при пробое силовых полупроводниковых вентилях преобразователя возможно с помощью компьютерного моделирования в про-

граммной среде Matlab – Simulink [8–10]. Основной задачей моделирования электромагнитных процессов трансформатора, возникающих при пробое полупроводниковых вентилях преобразователя частоты, является расчет параметров, определяющих электродинамическую и термическую стойкость трансформатора при коротких замыканиях.

Рассмотрим основные параметры трансформатора, которые необходимо учитывать при оценке его электродинамической и термической стойкости. Различают установившийся и переходный режимы короткого замыкания трансформатора. Установившееся значение тока короткого замыкания  $I_{к.уст}$  определяется по формуле (1):

$$I_{к.уст} = U_{фN} / (Z_{к.т} + Z_c), \quad (1)$$

где  $Z_{к.т}$  – сопротивление короткого замыкания трансформатора;  $Z_c$  – сопротивление короткого замыкания сети.

Из (1) видно, что величина установившегося значения тока короткого замыкания определяется не только параметрами самого трансформатора, но и параметрами сети переменного тока, питающей трансформатор. С учетом этого, для повышения достоверности результатов моделирования коротких замыканий трансформатора необходимо учитывать параметры сети, питающей трансформатор.

Переходный процесс короткого замыкания характеризуется амплитудой броска тока  $I_{к.уд.м}$ , амплитудой установившегося значения тока короткого замыкания  $I_{к.уст.м}$  и значением ударного коэффициента короткого замыкания  $k_{уд}$ , а также продолжительностью переходного процесса  $t_{п.п.}$ . Максимальное из возможных значений бросков тока называется ударным током короткого замыкания и обозначается  $I_{к.уд.м.макс}$ . Именно для этого значения тока рассчитывается стойкость трансформатора при коротких замыканиях. Если определены значения токов  $I_{к.уд.м.макс}$  и  $I_{к.уст.м}$ , то по формуле (2) можно определить величину ударного коэффициента короткого замыкания  $k_{уд}$ :

$$k_{уд} = I_{к.уд.м.макс} / I_{к.уст.м}. \quad (2)$$

Известно, что электромагнитная сила, действующая на проводник с током, пропорциональна силе тока и магнитному потоку, в котором находится проводник. Поскольку магнитный поток при коротком замыкании трансформатора создается самим током, то электродинамическая сила, действующая на проводник с током, пропорциональна квадрату тока [7].

Следовательно, даже небольшое увеличение тока короткого замыкания приводит к существенному увеличению электродинамической силы, дей-

ствующей на обмотку трансформатора при коротком замыкании. С учетом этого оценку степени влияния токов короткого замыкания, возникающих при пробое полупроводниковых приборов, на электродинамическую и термическую стойкость трансформатора можно выполнить путем сравнения токов короткого замыкания, вызванных пробоем полупроводниковых вентилях, с токами двухфазного короткого замыкания трансформатора.

## Моделирование электромагнитных процессов короткого замыкания трансформатора

Simulation of electromagnetic processes caused by transformer fault

На рис. 1 приведена структурная схема силовой части преобразователя частоты электропривода

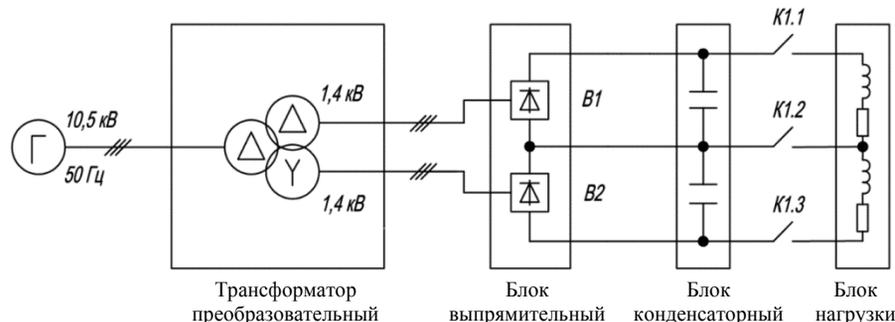
гребного винта, содержащая трансформатор преобразовательный, блок выпрямительный, блок конденсаторный и блок нагрузки. Инвертор представлен блоком статической нагрузки. Трансформатор выполнен с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединена в звезду, а вторая – в треугольник.

Вторичные обмотки подключены к двум трехфазным мостовым неуправляемым выпрямителям – выпрямителю 1 (B1) и выпрямителю 2 (B2). В соответствии с [2] первичную обмотку принято называть сетевой, а вторичные обмотки – вентиляльными. Выпрямители по цепи постоянного тока соединены последовательно. В цепь постоянного тока выпрямителей включен блок конденсаторного фильтра.

Параметры модели в среде Matlab – Simulink трансформатора и сети переменного тока приведены на рис. 2а и 2б соответственно.

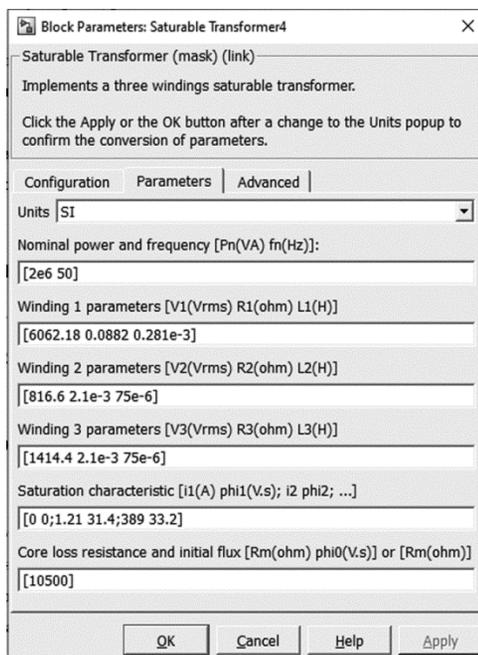
**Рис. 1.** Структурная схема преобразователя частоты со звеном постоянного тока электропривода гребного винта

**Fig. 1.** Block diagram of frequency converter with a DC link of electric propeller drive

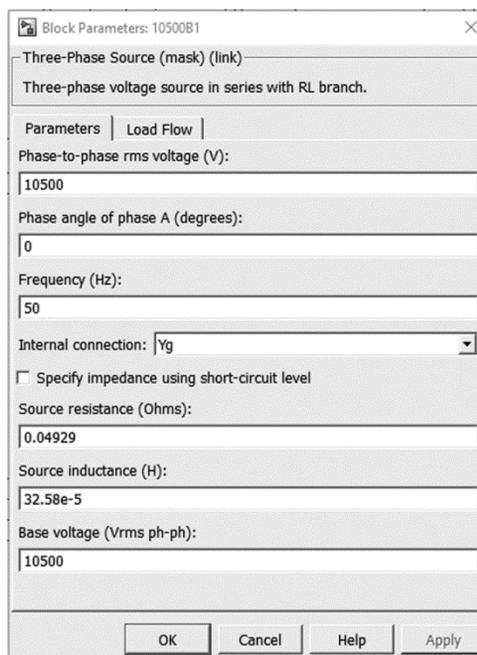


**Рис. 2.** Параметры модели трансформатора (а) и сети переменного тока (б)

**Fig. 2.** Parameters of transformer model (a) and AC network (b)



а)



б)

Авторы выполнили моделирование электромагнитных процессов пяти режимов коротких замыканий трансформатора (табл. 1).

На рис. 3 приведены схемы исследованных режимов короткого замыкания трансформатора.

Результаты моделирования электромагнитных процессов всех пяти режимов короткого замыкания трансформатора сведены в табл. 2.

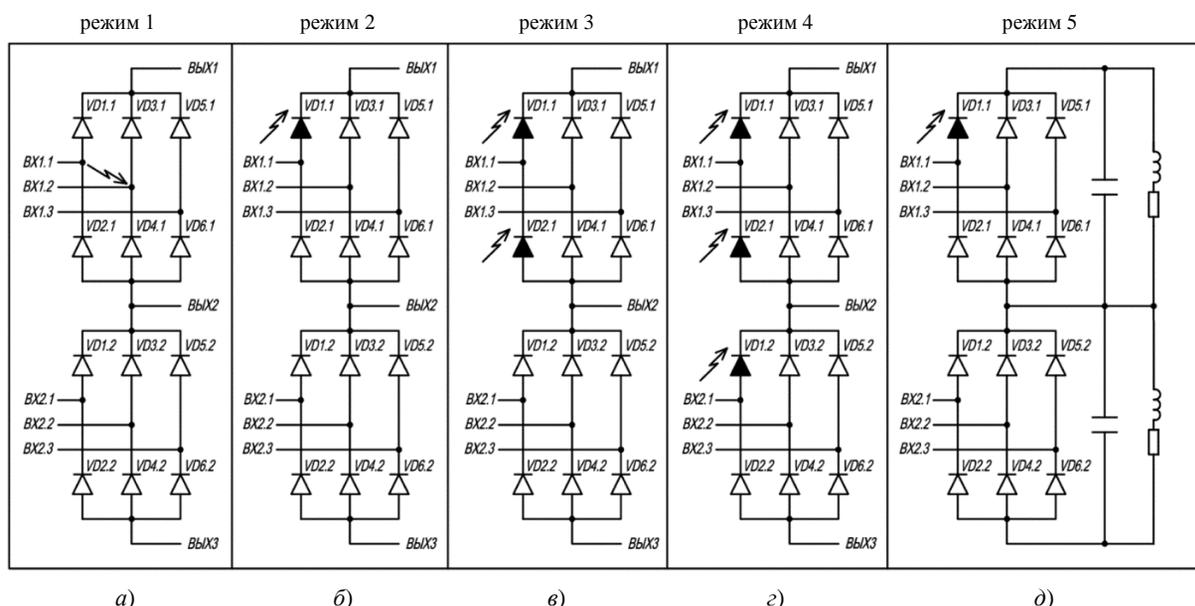
## Электромагнитные процессы короткого замыкания двух фаз вторичной обмотки трансформатора (режим 1)

Electromagnetic processes caused by double-phase fault of transformer secondary winding (mode 1)

Результаты моделирования этого режима приведены на осциллограммах рис. 4, 5. Поскольку в модели

**Таблица 1.** Перечень исследованных режимов короткого замыкания трансформатора  
**Table 1.** List of transformer fault modes

Название режима	Описание	Схема	Осциллограммы токов и напряжений	Примечание
Режим 1	Внешнее двухфазное короткое замыкание вторичной обмотки	Рис. 3а	Рис. 4, 5	Преобразователь работает без подключения нагрузки: контактор К1 разомкнут, инвертор преобразователя не включен
Режим 2	Короткое замыкание при пробое одного диода выпрямителя 1	Рис. 3б	Рис. 6, 7	
Режим 3	Короткое замыкание при пробое двух диодов одного плеча выпрямителя 1	Рис. 3в	Рис. 8, 9	
Режим 4	Короткое замыкание при пробое двух диодов одного плеча выпрямителя 1 и одного диода выпрямителя 2	Рис. 3г	Рис. 10, 11	
Режим 5	Короткое замыкание при пробое одного диода выпрямителя 1 при работе преобразователя на нагрузку	Рис. 3д	Рис. 12–14	Преобразователь работает на нагрузку: контактор К1 замкнут, инвертор преобразователя включен



**Рис. 3.** Схемы режимов короткого замыкания трансформатора  
**Fig. 3.** Schematics of transformer fault modes

учтены параметры короткого замыкания источника электрической энергии, от которого запитан преобразовательный трансформатор, в режиме короткого замыкания вторичной обмотки напряжение первич-

ной обмотки трансформатора снижается на 10–12 % (рис. 4). Этот факт в определенной мере отражается на величине амплитуды как броска, так и установившегося значения тока короткого замыкания.

**Таблица 2.** Результаты моделирования коротких замыканий трансформатора

**Table 2.** Results of simulated of transformer faults

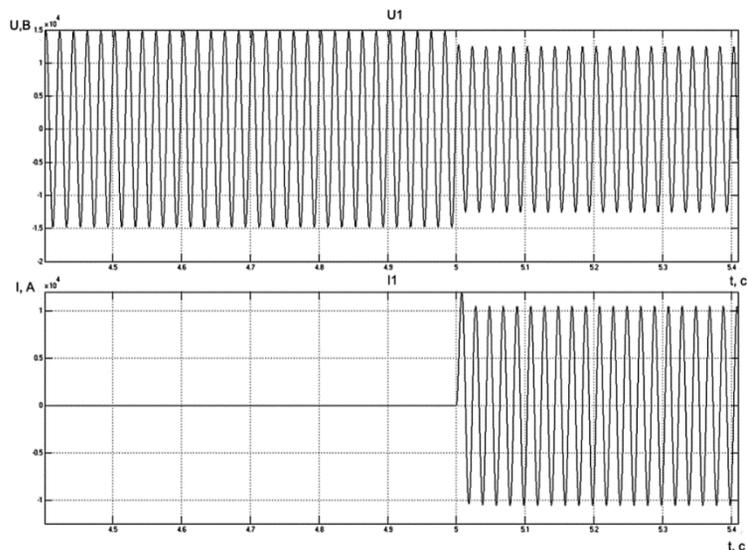
№ п/п	Наименование параметра	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4	Режим 5
1	$I_{к.уст.1 м}$ , А	10 500	8700	5600	14 900	8300
2	$I_{к.уст.2 м}$ , А	64 800	75 000	40 000	29 000	75 000
3	$I_{к.уст.2}$ , А	46 000	53 100	28 300	20 500	53 100
4	$I_{к.уд.1 м}$ , А	11 900	9200	8200	15 100	9400
5	$I_{к.уд.2 м \max}$ , А	66 000	76 000	61 000	63 000	75 000
6	$I_{к.уст.2 п.с.}$ , А	–	40 000	–	–	40 000
7	$k_{уд.2}$	1,02	1,0	1,52	2,17	1,0
8	$k_{уд.1}$	1,13	1,05	1,46	1,01	1,13
9	$t_{п.п.}$ , число периодов питающей сети	1	12	4	17	11
10	$I_{с м}$ , А					4200

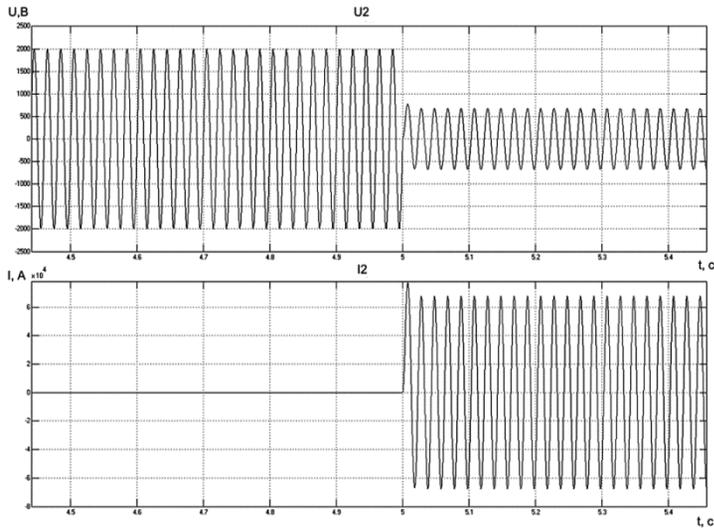
Принятые в табл. 2 обозначения параметров:

$I_{к.уст.1 м}$  – амплитудное значение установившегося тока короткого замыкания первичной обмотки трансформатора, А;  $I_{к.уст.2 м}$  – амплитудное значение установившегося тока короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора, А;  $I_{к.уст.2 п.с.}$  – постоянная составляющая установившегося тока короткого замыкания вторичной обмотки, А;  $I_{к.уст.2}$  – действующее значение установившегося тока короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора, А;  $I_{к.уд.1 м \max}$  – максимальное амплитудное значение импульса броска тока короткого замыкания первичной обмотки трансформатора, А;  $I_{к.уд.2 м \max}$  – максимальное амплитудное значение импульса броска тока короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора, А;  $k_{уд.2}$  – ударный коэффициент короткого замыкания для цепи вторичной обмотки;  $k_{уд.1}$  – ударный коэффициент короткого замыкания для цепи первичной обмотки;  $t_{п.п.}$  – время переходного процесса, число периодов питающей сети;  $I_{с м}$  – амплитуда броска тока конденсатора в момент пробоя диода, А.

**Рис. 4.** Осциллограммы напряжения и тока фазы первичной обмотки трансформатора при двухфазовом коротком замыкании одной вторичной обмотки

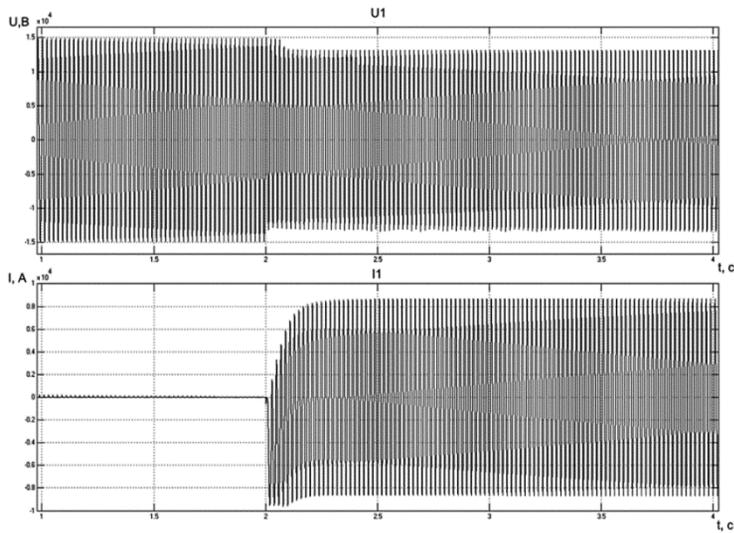
**Fig. 4.** Oscillograms of voltage and current in transformer primary winding at double-phase fault of one secondary winding





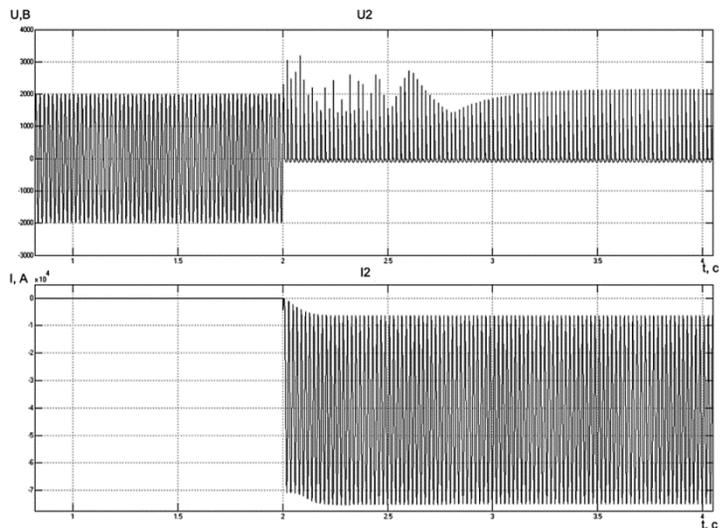
**Рис. 5.** Осциллограммы напряжения и тока фазы вторичной обмотки трансформатора при двухфазовом коротком замыкании одной вторичной обмотки

**Fig. 5.** Oscillograms of voltage and current in transformer secondary winding at double-phase fault of one secondary winding



**Рис. 6.** Осциллограммы напряжения и тока фазы первичной обмотки трансформатора при пробое одного диода выпрямителя 1

**Fig. 6.** Oscillograms of voltage and current in transformer primary winding at one diode breakdown of rectifier 1



**Рис. 7.** Осциллограммы напряжения и тока фазы вторичной обмотки трансформатора при пробое одного диода выпрямителя 1

**Fig. 7.** Oscillograms of voltage and current in transformer secondary winding at one diode breakdown of rectifier 1

## Электромагнитные процессы короткого замыкания при пробое одного диода выпрямителя 1 (режим 2)

Electromagnetic processes caused by fault at one diode breakdown of rectifier 1 (mode 2)

Результаты моделирования этого режима приведены на осциллограммах на рис. 6, 7.

Отметим особенности короткого замыкания при пробое одного диода: напряжение вторичной обмотки имеет форму однополярных импульсов, а ток вторичной обмотки имеет постоянную и переменную со-

ставляющие. Время переходного процесса по сравнению с режимом 1 увеличилось примерно в 8 раз.

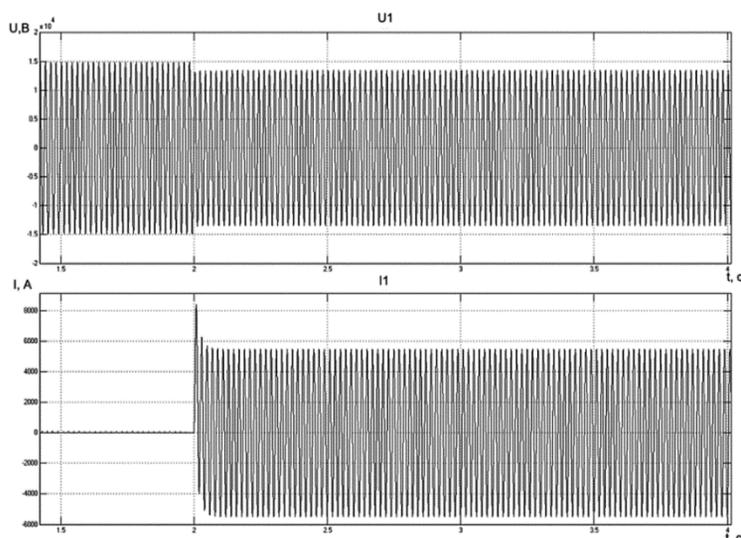
## Электромагнитные процессы короткого замыкания при пробое двух диодов одного плеча выпрямителя 1 (режим 3)

Electromagnetic processes caused by fault at breakdown of two diodes of one rectifier 1 arm (mode 3)

Результаты моделирования этого режима приведены на осциллограммах на рис. 8, 9.

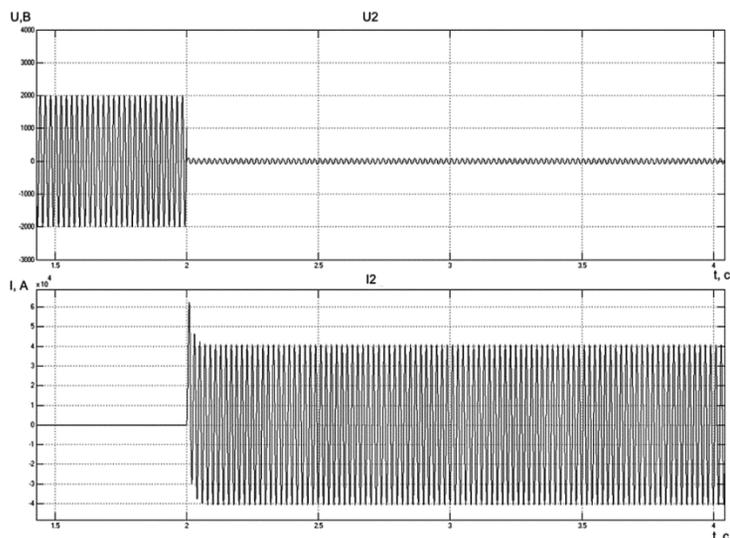
**Рис. 8.** Осциллограммы напряжения и тока фазы первичной обмотки трансформатора при пробое двух диодов одного плеча выпрямителя 1

**Fig. 8.** Oscillograms of voltage and current in transformer primary winding at breakdown two diodes of one rectifier 1 arm



**Рис. 9.** Осциллограммы напряжения и тока фазы вторичной обмотки трансформатора при пробое двух диодов одного плеча выпрямителя 1

**Fig. 9.** Oscillograms of voltage and current in transformer secondary winding at breakdown two diodes of one rectifier 1 arm



## Электромагнитные процессы короткого замыкания при пробое двух диодов одного плеча выпрямителя 1 и одного диода выпрямителя 2 (режим 4)

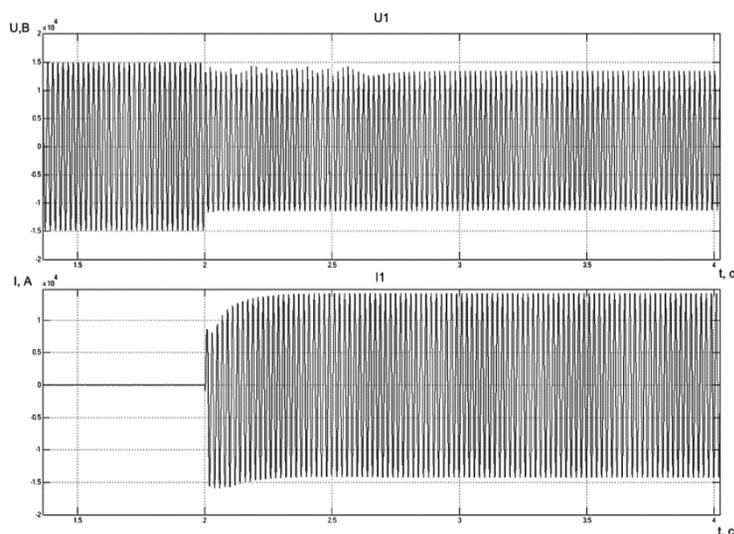
Electromagnetic processes caused by fault at breakdown of two diodes of one rectifier 1 arm and one diode breakdown of rectifier 2 (mode 4)

Результаты моделирования этого режима приведены на осциллограммах на рис. 10, 11.

## Электромагнитные процессы короткого замыкания при работе преобразователя частоты на нагрузку и пробое одного диода выпрямителя 1 (режим 5)

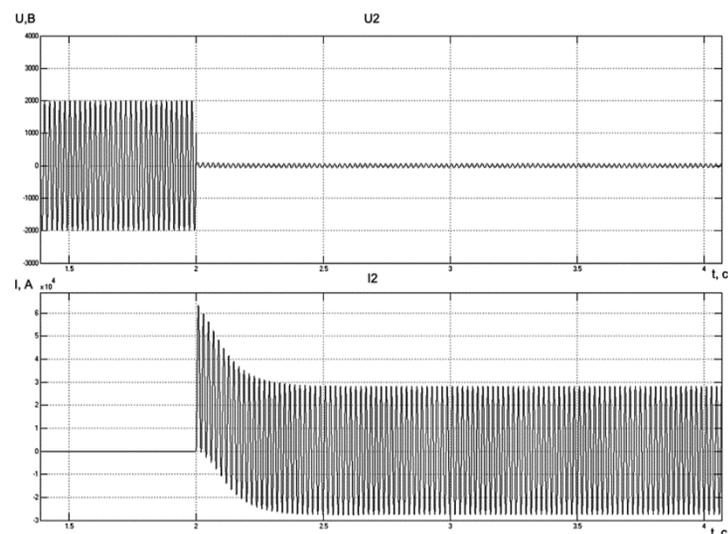
Electromagnetic processes caused by fault at frequency converter in load mode and one diode breakdown of rectifier 1 (mode 5)

Результаты моделирования этого режима приведены на рис. 12–14. На рис. 12, 13 – осциллограммы



**Рис. 10.** Осциллограммы напряжения и тока фазы первичной обмотки трансформатора при пробое двух диодов одного плеча выпрямителя 1 и одного диода выпрямителя 2

**Fig. 10.** Oscillograms of voltage and current in transformer primary winding at breakdown two diodes of one rectifier 1 arm and one diode breakdown of rectifier 2

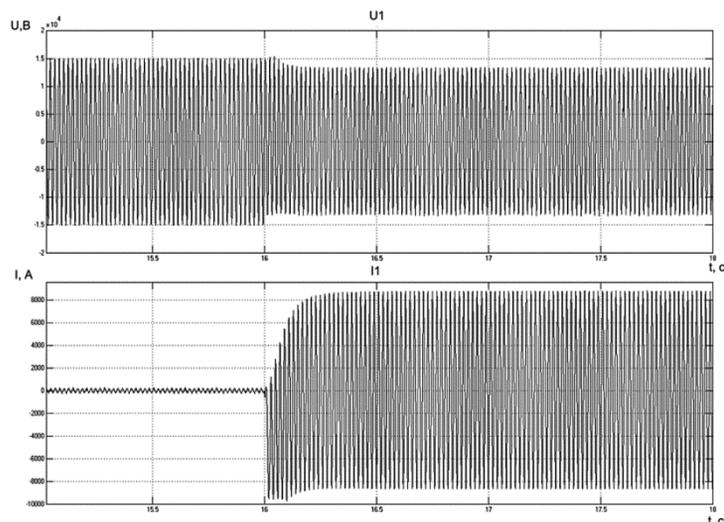


**Рис. 11.** Осциллограммы напряжения и тока фазы вторичной обмотки трансформатора при пробое двух диодов одного плеча выпрямителя 1 и одного диода выпрямителя 2

**Fig. 11.** Oscillograms of voltage and current in transformer secondary winding at breakdown two diodes of one rectifier 1 arm and one diode breakdown of rectifier 2

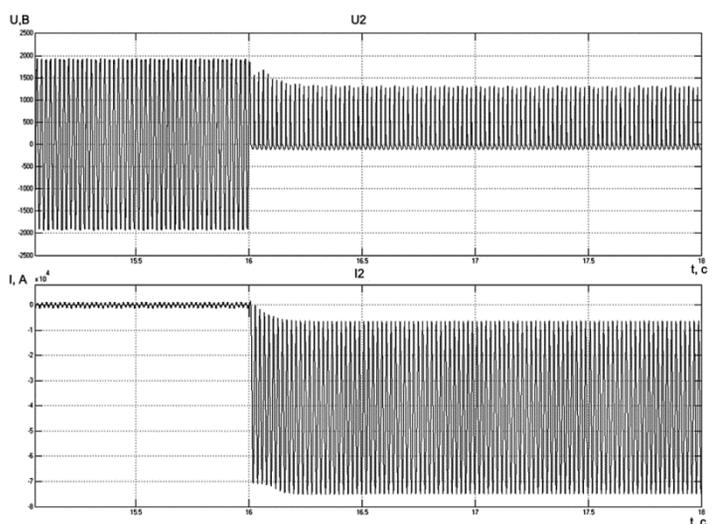
**Рис. 12.** Осциллограммы напряжения и тока фазы первичной обмотки трансформатора при пробое одного диода и работе преобразователя частоты на нагрузку

**Fig. 12.** Oscillograms of voltage and current in transformer primary winding at one diode breakdown and frequency converter in load mode



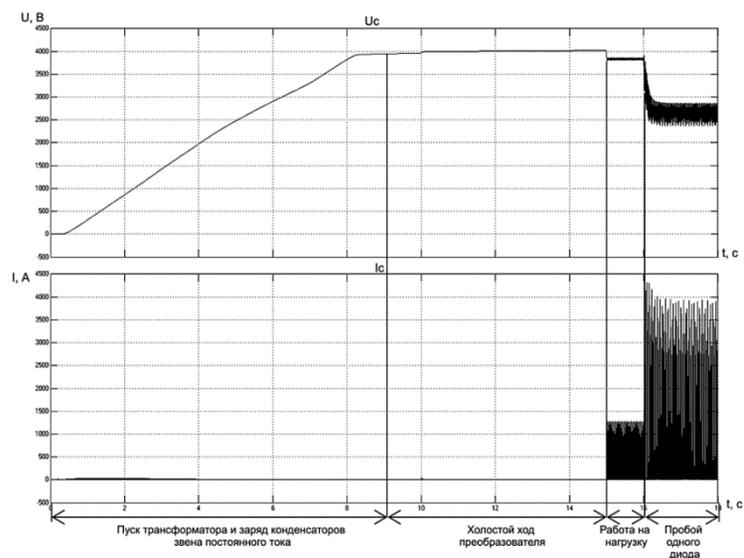
**Рис. 13.** Осциллограммы напряжения и тока фазы вторичной обмотки трансформатора при пробое одного диода и работе преобразователя частоты на нагрузку

**Fig. 13.** Oscillograms of voltage and current in transformer secondary winding at one diode breakdown and frequency converter in load mode



**Рис. 14.** Осциллограммы напряжения и тока конденсатора емкостного фильтра при пробое одного диода и работе преобразователя частоты на нагрузку

**Fig. 14.** Oscillograms of voltage and current of capacitive filter condenser at one diode breakdown and frequency converter in load mode



напряжения и токов первичной обмотки и вторичной обмотки соответственно. На рис. 14 – осциллограмма напряжения и тока конденсатора емкостного фильтра на интервалах времени:

- $0 < t < 9$  с: пуск трансформатора и заряд конденсатора;
- $9 < t < 15$  с: холостой ход преобразователя;
- $t = 15$  с: подключение нагрузки к преобразователю;
- $15 < t < 16$  с: работа преобразователя частоты на нагрузку;
- $t = 16$  с: пробой одного диода выпрямителя  $I$ .

Пробой одного диода выпрямителя при работе преобразователя частоты на нагрузку вызывает увеличение тока конденсатора фильтра  $I_{cm}$  почти в 3 раза (рис. 14).

## Заключение

### Conclusion

Выполненные исследования электромагнитных процессов коротких замыканий трансформатора, вызванных пробоем диодов выпрямителей преобразователя частоты, и сравнение их с результатами исследования двухфазного короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора показывают увеличение токов и длительности переходных процессов короткого замыкания (табл. 2).

Так, при пробое одного диода выпрямителя преобразователя частоты амплитудное значение первого импульса броска тока короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора возрастает по сравнению с двухфазным коротким замыканием в 1,15 раза, в результате этого электродинамическая сила, действующая на витки вторичной обмотки, возрастает в 1,32 раза, что ухудшает электродинамическую стойкость трансформатора.

Установившееся значение тока короткого замыкания вторичной обмотки при этом также возрастает в 1,15 раза, в результате этого потери мощности в обмотке возрастают в 1,32 раза, что ухудшает термическую стойкость трансформатора. Кроме этого, при пробое одного диода выпрямителя преобразователя частоты установившийся ток короткого замыкания вторичной обмотки содержит переменную составляющую и постоянную составляющую, которая подмагничивает магнитопровод трансформатора и способствует увеличению тока намагничивания, увеличению потерь мощности и нагреву трансформатора.

Наибольшее увеличение тока первичной обмотки трансформатора происходит при коротком

замыкании, вызванном пробоем двух диодов одного плеча первого выпрямителя и одного диода второго выпрямителя (режим 4). Установившееся значение тока короткого замыкания первичной обмотки трансформатора в режиме 4 возрастает по сравнению с двухфазным коротким замыканием в 1,42 раза, в результате этого электродинамическая сила, действующая на витки первичной обмотки, и потери мощности в обмотке возрастают в 2 раза, что ухудшает электродинамическую и термическую стойкость трансформатора.

При расчете и изготовлении трансформатора, предназначенного для работы в составе преобразователя частоты со звеном постоянного тока, с целью повышения его электродинамической и термической стойкости необходимо учитывать увеличение амплитуды и действующего значения токов короткого замыкания обмоток трансформатора, а также увеличение времени переходного процесса при пробое диодов выпрямителей преобразователя частоты со звеном постоянного тока по сравнению с токами двухфазного короткого замыкания трансформатора.

Для ограничения негативного влияния токов короткого замыкания, вызванных пробоем диодов выпрямителя преобразователя частоты, на электродинамическую и термическую стойкость трансформатора целесообразно в цепях вентиляльных обмоток трансформатора устанавливать быстродействующие предохранители.

## Список использованной литературы

1. ГОСТ Р 55188-2012 (МЭК 60076-5:2006). Трансформаторы силовые. Стойкость к коротким замыканиям. Москва : Стандартинформ, 2014. IV, 27 с.
2. ГОСТ Р 58115-2018. Трансформаторы преобразовательные с высшим напряжением от 6 до 110 кВ для железнодорожных тяговых подстанций. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2018. IV, 41 с.
3. ГОСТ 20243-74. Трансформаторы силовые. Методы испытаний на стойкость при коротком замыкании. Москва : Изд-во стандартов, 1986. 10 с.
4. Петров Г.Н. Электрические машины : в 3 ч. Ч. 1 : Введение. Трансформаторы. 2-е изд., перераб. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1956. 224 с.
5. Рихтер Р. Электрические машины : [в 5 т.]. Т. 3 : Трансформаторы. Москва ; Ленинград : Онти, 1935. 292 с.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Москва : Энергия, 1980. 928 с.
7. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях : сборник

- статей / Науч. ред. *А.И. Лурье*. Москва : Знак, 2005. 512 с.
8. *Денисов В.А., Третьякова М.Н.* Теория и переходные процессы электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей энергии : электронное учеб. пособие. Тольятти : ТГУ, 2014. 1 CD-ROM.
  9. *Черных И.В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. Москва [и др.] : ДМК Пресс : Питер, 2008. 288 с.
  10. Моделирование электромагнитных процессов пуска трансформатора в составе преобразователя частоты электропривода гребного винта / *А.А. Мартынов, И.А. Горюшкин, С.К. Ляпидов* [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. Вып. 3(405). С. 99–115. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-99-115.

## References

1. GOST R 55188-2012 (IEEC 60076-5:2006). Power transformers. Ability to withstand short circuit. Moscow : Standartinform, 2014. IV, 27 p. (in Russian).
2. GOST R 58115-2018. Converter transformers for voltages from 6 to 110 kV for railway traction substations. General specifications. Moscow : Standartinform, 2018. IV, 41 p. (in Russian).
3. GOST 20243-74. Power transformers. Methods of short-circuit tests. Moscow : Izd-vo standartov, 1986. 10 p. (in Russian).
4. *Petrov G.N.* Electrical machines : in 3 parts. Part 1 : Introduction. Transformers. 2<sup>nd</sup> revision, updated. Moscow ; Leningrad : Gosenergoizdat, 1956. 224 p. (in Russian).
5. *Richter R.* Electric machines: [5 v]. Vol. 3 : Transformers. Moscow ; Leningrad : Onti, 1935. 292 p. (Translated from German).
6. *Ivanov-Smolensky A.V.* Electric machines. Moscow : Energia, 1980. 928 p. (in Russian).
7. Electrodynamics stability of transformers and reactors at short-circuiting / Science ed. *A.I. Lurie*. Moscow : Знак, 2005. 512 p. (in Russian).
8. *Denisov V.A., Tretiakova M.N.* Theory and transient processes in electromagnetic devices and electromechanical power converters : electronic education guidance. Togliatti : TGU, 2014. 1 CD-ROM. (in Russian).
9. *Chernykh I.V.* Simulation of electrotechnical devices in MATLAB, SimPowerSystems & Simulink. Moscow [et al.] : DМК Press, Piter, 2008. 288 p. (in Russian).
10. Simulation of electromagnetic processes of starting a transformer as part of a frequency converter of propeller electric drive / *A.A. Martynov, I.A. Goryushkin, S.K. Lyapidov* [et al.] // Transactions of

Krylov State Research Centre. 2023. Vol. 3(405). P. 99–115. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-99-115 (in Russian).

---

## Сведения об авторах

*Мартынов Александр Александрович*, к.т.н., старший научный сотрудник отдела филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», доцент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского университета аэрокосмического приборостроения. Адрес: 190000, Россия, Санкт-Петербург, Большая Морская ул., д. 67. Тел.: +7 (812) 494-70-34. E-mail: Martynov41@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7464-1236>.

*Горюшкин Иван Александрович*, начальник отдела филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Тел.: +7 (812) 748-52-46. E-mail: I\_Goryushkin@ksrc.ru.

*Ляпидов Станислав Константинович*, старший инженер 1-й категории филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. E-mail: S\_Lyapidov@ksrc.ru.

*Соколов Дмитрий Владимирович*, ведущий инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. E-mail: D\_Sokolov@ksrc.ru.

*Симухин Владимир Игоревич*, инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. E-mail: V\_Simuhin@ksrc.ru.

## About the authors

*Alexandr A. Martynov*, Cand. Sci. (Eng.), Senior scientist, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre, Associate Professor, Electromechanics and Robotics Department, St. Petersburg University of Aerospace Engineering. Address: 67, Bolshaya Morskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190000. Tel.: +7 (812) 494-70-34. E-mail: Martynov41@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7464-1236>.

*Ivan A. Goryushkin*, Head of Department, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatkaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-43. E-mail: I\_Goryushkin@ksrc.ru.

*Stanislav K. Lyapidov*, 1<sup>st</sup> Category Engineer TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatkaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. E-mail: S\_Lyapidov@ksrc.ru.

*Dmitry V. Sokolov*, Lead Engineer, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-48. E-mail: D\_Sokolov@ksrc.ru.

*Vladimir I. Simukhin*, Engineer, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-48. E-mail: V\_Simuhin@ksrc.ru.

Поступила / Received: 26.02.24  
Принята в печать / Accepted: 14.05.24  
© Коллектив авторов, 2024