



СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-99-115

УДК 629.5.035.5-837

EDN: PTKQQH

А.А. Мартынов¹ , И.А. Горюшкин², С.К. Ляпидов², В.К. Самсыгин² ,
Д.В. Соколов², В.И. Симухин²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

² Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПУСКА ТРАНСФОРМАТОРА В СОСТАВЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГРЕБНОГО ВИНТА

Объект и цель научной работы. Объектами являются силовой трансформатор и цепь постоянного тока преобразователя частоты электропривода гребного винта (ГВ). Цель заключается в исследовании переходных процессов прямого и плавного пуска силового трансформатора преобразователя частоты электропривода ГВ.

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

Основные результаты. Определены основные параметры переходного процесса прямого и плавного пуска трансформатора и заряда конденсаторов емкостного фильтра. Сформулированы рекомендации по реализации оптимальных режимов подготовки преобразователя частоты к работе.

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

Ключевые слова: трансформатор, выпрямитель, конденсаторы, обмотка намагничивания, ток, напряжение, время переходного процесса.



Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP POWERING AND ELECTRIC GENERATION SYSTEMS

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-99-115

UDC 629.5.035.5-837

EDN: PTKQQH

А.А. Martynov¹ , I.A. Goryushkin², S.K. Lyapidov², V.K. Samsygin² ,
D.V. Sokolov², V.I. Simukhin²

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

² SET Branch of the Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia

SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES OF STARTING A TRANSFORMER AS PART OF A FREQUENCY CONVERTER OF ELECTRIC DRIVE PROPELLER

Object and purpose of research. The object is a power transformer and a DC circuit of the frequency converter of the propeller electric drive, equipped with a soft start device. The aim is to investigate the transient processes of starting the frequency converter of the propeller electric drive.

Для цитирования: Мартынов А.А., Горюшкин И.А., Ляпидов С.К., Самсыгин В.К., Соколов Д.В., Симухин В.И. Моделирование электромагнитных процессов пуска трансформатора в составе преобразователя частоты электропривода гребного винта. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 3(405): 99–115.

For citations: Martynov A.A., Goryushkin I.A., Lyapidov S.K., Samsygin V.K., Sokolov D.V., Simukhin V.I. Simulation of electromagnetic processes of starting a transformer as part of a frequency converter of electric drive propeller. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 3(405): 99–115 (in Russian).

Materials and methods. The study was conducted using the MatLab-Simulink software environment.

Main results. The main parameters of the transient process of smooth start of the transformer and the smooth charge of the capacitors of the capacitive filter have been determined. Recommendations for the implementation of optimal regimes for Recommendations on the implementation of optimal modes of preparation of the frequency converter for operation are formulated.

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

Keywords: transformer, rectifier, capacitors, magnetization winding, current, voltage, transient time.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Подключение трансформатора большой мощности к источнику электрической энергии переменного тока сопровождается электромагнитными и электро-механическими переходными процессами. Наиболее сложные переходные процессы происходят при прямом пуске трансформатора.

Вопросам переходных процессов прямого пуска трансформаторов посвящено много исследований. Среди них можно отметить работы Р. Рихтера [1], Л.М. Пиотровского [2] и Г.Н. Петрова [3], в которых показано, что прямой пуск трансформатора сопровождается резким увеличением тока намагничивания в первичной обмотке. Прежде всего это связано с появлением свободной составляющей потока $\Phi_{св}$, которая увеличивает амплитуду результирующего потока Φ в 2 раза по сравнению с потоком установившегося режима холостого хода, амплитуда которого равна Φ_m . Кроме этого, необходимо учитывать наличие потока остаточного намагничивания магнитопровода трансформатора $\Phi_{ост}$. Величина указанного потока может достигать значения $0,3\Phi_m$ [2] или даже $0,5\Phi_m$ [3].

Из-за нелинейности кривой намагничивания магнитопровода трансформатора увеличение амплитуды магнитного потока сопровождается резким увеличением амплитуды тока намагничивания. Рудольф Рихтер называл этот процесс толчком тока включения, а в настоящее время чаще используется определение «бросок намагничивающего тока».

При рассмотрении электромагнитных процессов включения трансформатора необходимо прежде всего учитывать непостоянство индуктивности обмотки, с помощью которой трансформатор подключают к сети переменного тока. Эта индуктивность зависит от степени насыщения магнитопровода трансформатора, причем ее величина резко падает с увеличением насыщения. Поэтому амплитуда тока в момент включения существенно больше двойного значения амплитуды установившегося

значения тока намагничивания, а включение трансформатора в определенной мере носит характер короткого замыкания [1].

Бросок намагничивающего тока при прямом пуске трансформатора может привести не только к преждевременному выходу трансформатора из строя, но и к недопустимым просадкам напряжения бортовой сети, а также вызвать срабатывание аппаратов защиты и отключение устройств и систем, питающихся от этой сети. Все это чревато сбоями в работе многих корабельных систем.

При пренебрежении активным сопротивлением обмотки, т.е. при $R_1 = 0$, характер изменения потока в сердечнике трансформатора может быть представлен формулой (1):

$$\Phi = \Phi_{ост} + (U_m/W\omega)[\sin\alpha - \sin(\omega t + \alpha)], \quad (1)$$

где U_m – амплитудное значение приложенного к обмотке напряжения; W – число витков обмотки; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота напряжения; α – начальный угол подключения напряжения.

Результирующий поток будет наибольшим при положительном значении остаточного потока $\Phi_{ост}$ и значении угла $\alpha = \pi/2$ и $\sin(\omega t + \alpha) = -1$.

Это означает, что спустя полпериода после включения трансформатора результирующий поток будет равен удвоенному значению амплитуды установившегося потока, $2\Phi_m$, просуммированному с остаточным потоком намагничивания $\Phi_{ост}$. Эта оценка носит приблизительный характер, поскольку при выводе принято допущение: отсутствие активного сопротивления обмотки, т.е. $R_1 = 0$.

Используя формулу (1) и кривую намагничивания материала, из которого выполнен сердечник трансформатора, можно построить зависимости индукции (или потока) во времени $B = f(\omega t)$ и тока намагничивания $I_m = f(\omega t)$ с учетом наличия остаточного потока намагничивания $\Phi_{ост}$. В реальном трансформаторе R_1 не равно нулю и оказывает демпфирующее влияние на амплитуду тока при пуске трансформатора.

Амплитуду тока намагничивания при пуске с учетом активного сопротивления обмотки можно

рассчитать, воспользовавшись формулой (2) и графиками $B = f(\omega t)$ и $I_\mu = f(\omega t)$ [1]:

$$\Phi = \Phi_{\text{ост}} + (U_m/W\omega) \times \\ \times [\sin\alpha - \sin(\omega t + \alpha)] - (R_1/W) \int I_\mu dt. \quad (2)$$

Графоаналитический метод исследования переходных процессов пуска трансформатора характеризуется большими затратами времени и сейчас применяется больше для иллюстрации физических процессов, имеющих место в трансформаторе при прямом пуске, чем для инженерных расчетов. В настоящий момент для исследования переходных процессов пуска трансформатора широкое применение находят компьютерные модели, выполненные с использованием программной среды MatLab-Simulink [4].

Объект и методы исследования

Object and methods of research

Объектом исследования является силовой трансформатор преобразователя частоты электропривода гребного винта. Силовой трансформатор включен

на вход звена постоянного тока преобразователя частоты электропривода ГВ. Параметры силового трансформатора и цепи постоянного тока преобразователя частоты, принятые при моделировании, приведены в табл. 1.

Важнейшими показателями работы электропривода гребного винта являются высокая надежность и безотказность. Достижение этих показателей невозможно без глубокого исследования переходных процессов пуска трансформатора и преобразователя частоты в целом, результаты которого должны способствовать принятию обоснованных мер по устранению недопустимых перегрузок по току и напряжению трансформатора, вентиля и конденсаторов фильтра преобразователя частоты.

На рис. 1 приведена структурная схема объекта исследования – звена постоянного тока преобразователя частоты электропривода гребного винта, дополненная тремя схемами вариантов исполнения и подключения устройств плавного пуска силового трансформатора. Структурная схема выполнена с учетом того, что одновременно от одного устройства плавного пуска (УПП) осуществляется намагничивание магнитопроводов двух силовых транс-

Таблица 1. Параметры силового трансформатора и цепи постоянного тока преобразователя частоты
Table 1. Parameters of feed transformer and DC circuit of frequency converter

№	Параметр	Тип/величина
Трансформатор		
1	Соединение первичной обмотки	Зигзаг
2	Соединение первой вторичной обмотки	Звезда
3	Соединение второй вторичной обмотки	Треугольник
4	Соединение обмотки намагничивания (четвертой обмотки)	Звезда
5	Мощность трансформатора, S_T	6 МВА
6	Номинальный ток фазы первичной обмотки, $I_{\phi N}$	330 А
7	Линейное напряжение первичной обмотки, $U_{\text{л1N}}$	10 500 В
8	Ток холостого хода фазы первичной обмотки, $I_{\text{хх}}$	0,27 %
9	Напряжение короткого замыкания, U_k	8,08 %
10	Линейное напряжение первой вторичной обмотки, $U_{\text{л2,1}}$	1420 В
11	Линейное напряжение второй вторичной обмотки, $U_{\text{л2,2}}$	1420 В
12	Линейное напряжение обмотки намагничивания, $U_{\text{л4}}$	400 В
Звено постоянного тока		
13	Среднее значение выпрямленного напряжения двух последовательно соединенных выпрямительных мостов, U_{d0}	4000 В
14	Среднее значение тока цепи постоянного тока выпрямителей, I_{dN}	1250 А

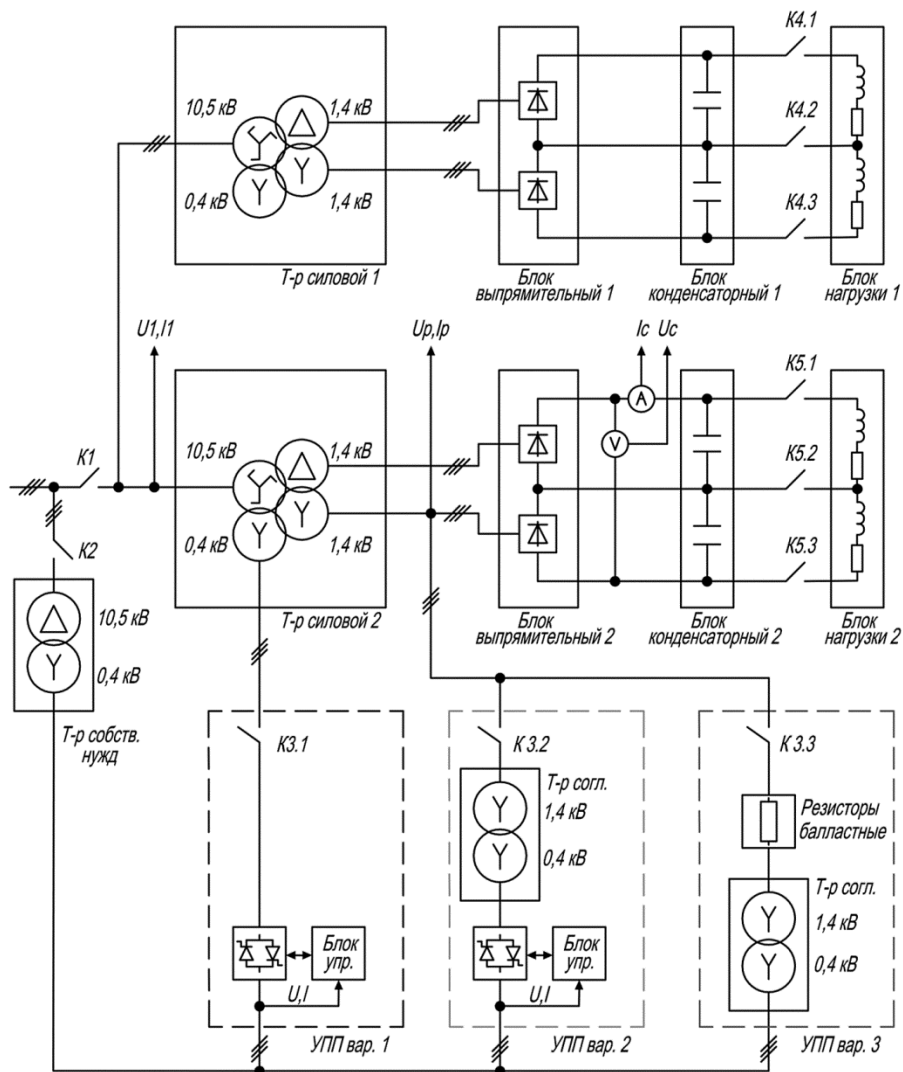


Рис. 1. Структурная схема звена постоянного тока преобразователя частоты электропривода гребного винта, дополненная тремя схемами вариантов исполнения и подключения устройств плавного пуска силового трансформатора

Fig. 1. Structural layout of DC link in the frequency converter of the propulsion motor (with three possible configurations and connection variants of soft starters for feed transformer)

форматоров преобразователей частоты одного асинхронного электропривода.

На структурной схеме приведены следующие блоки:

- трансформаторы силовые (Т-р силовой 1 и Т-р силовой 2);
- блоки выпрямительные (Блок выпрямительный 1 и Блок выпрямительный 2);
- блоки конденсаторные (Блок конденсаторный 1 и Блок конденсаторный 2);
- трансформатор согласующий (Т-р согл.);
- трансформатор собственных нужд (Т-р собств. нужд);
- устройства плавного пуска (УПП вар. 1, УПП вар. 2, УПП вар. 3);
- резисторы балластные.

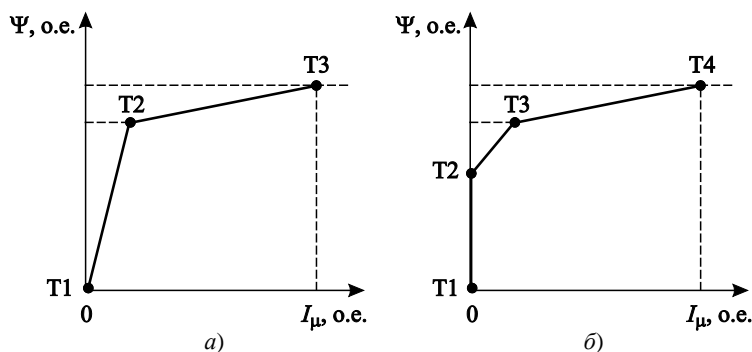
На рис. 1 показаны также сигналы параметров трансформатора и звена постоянного тока для осциллографирования переходных процессов пуска трансформатора и звена постоянного тока:

- U_1, I_1 – напряжение и ток первичной обмотки силового трансформатора;
- U_r, I_r – напряжение и ток обмотки намагничивания;
- U_c, I_c – напряжение и ток конденсаторов емкостного фильтра.

Используя программную среду MatLab-Simulink [4] и схему рис. 1, авторы разработали модель пуска трансформатора в составе преобразователя частоты со звеном постоянного тока электропривода гребного винта.

Рис. 2. Характеристика намагничивания трансформатора: а) без остаточного потока намагничивания; б) с остаточным потоком намагничивания

Fig. 2. Transformer saturation curve: а) without residual flux; б) with residual flux



Модель позволяет выполнить исследование следующих переходных процессов:

- прямого пуска трансформатора без учета и с учетом остаточного потока намагничивания;
- плавного пуска трансформатора с использованием как устройства плавного пуска на основе тиристорного регулятора напряжения (ТРН), так и УПП с балластными резисторами.

При моделировании переходных процессов трансформатора в программной среде MatLab-Simulink характеристика намагничивания трансформатора задается кусочно-линейной зависимостью между потокосцеплением и током намагничивания в относительных единицах, $\Psi = f(I_\mu)$ (рис. 2).

Без учета остаточного потока намагничивания характеристика (рис. 2а) аппроксимируется двумя линиями и имеет три характерные точки:

- Точка 1 (Т1) – точка начала характеристики с координатами $\Psi_{T1} = 0$ и $I_{\mu T1} = 0$.
- Точка 2 (Т2) – точка излома характеристики. Значение потокосцепления в точке Ψ_{T2} принимается в пределах от 1,1 до 1,2 о.е. Значение тока намагничивания $I_{\mu T2}$ рассчитывается по формуле, приведенной в табл. 2.
- Точка 3 (Т3) – точка насыщения характеристики.

Таким образом, характеристика намагничивания (рис. 2а) содержит два участка: от точки Т1 до точки Т2 и от точки Т2 до точки Т3.

В табл. 2 приведены расчетные формулы точек координат кривой намагничивания. В точке Т3 значение потокосцепления Ψ_{T3} рассчитывается по формуле, приведенной в табл. 2, а значение тока намагничивания принимается равным 1, $I_{\mu T3} = 1,0$.

При учете остаточного потока намагничивания характеристика намагничивания (рис. 2б) аппроксимируется тремя линиями и имеет четыре характерные точки:

- Точка 1 (Т1) – точка начала характеристики с координатами $\Psi_{T1} = 0$ и $I_{\mu T1} = 0$.
- Точка 2 (Т2) – точка остаточного потока намагничивания. Размещается на оси ординат с координатами $\Psi_{T2} = \Psi_{ост}$ и $I_{\mu T2} = 0$.
- Точка 3 (Т3) – точка излома характеристики. Значение потокосцепления в точке Ψ_{T3} принимается в пределах от 1,1 до 1,2 о.е. Значение тока намагничивания $I_{\mu T2}$ рассчитывается по формуле, приведенной в табл. 1.
- Точка 4 (Т4) – точка насыщения характеристики.

Максимальная амплитуда импульса тока при включении трансформатора зависит от фазы включения, величины остаточного потока намагничивания, значения потокосцепления в точке излома характеристики намагничивания и наклона характеристики намагничивания в области насыщения. Следует отметить, что ошибка в задании наклона характеристики намагничивания в обла-

Таблица 2. Расчетные значения параметров

Table 2. Design values of parameters

Характерные точки кривой намагничивания	Потокосцепление Ψ , о.е.	Ток намагничивания I_μ , о.е.
Точка 1	$\Psi_{T1} = 0$	$I_{\mu T1} = 0$
Точка 2	$\Psi_{T2} = 1,15$	$I_{\mu T2} = \Psi_{T2} \cdot I_{xx\%}/100 = 0,0031$
Точка 3	$\Psi_{T3} = \Psi_{T2} + 1,5U_{k\%}/100 = 1,271$	$I_{\mu T3} = 1,0$

сти насыщения при моделировании процесса пуска трансформатора приводит к появлению существенных погрешностей в расчете амплитуды броска тока.

Исследование переходных процессов прямого пуска трансформатора

Transitory processes direct transformer startup

Рассмотрим сначала электромагнитные процессы прямого пуска трансформатора, при реализации которого УПП должно быть отключено, а напряжение прикладывается непосредственно к первичной обмотке трансформатора.

На рис. 3 приведены осциллограммы прямого пуска трехфазного трансформатора мощностью 6 МВА при холостом ходе без остаточного потока намагничивания. Из них следует, что амплитуда броска тока первичной обмотки при прямом пуске превышает действующее значение тока первичной обмотки при номинальной нагрузке примерно в 3,8 раза.

Поскольку трансформатор входит в состав преобразователя частоты (ПЧ) электропривода гребного винта, одновременно с намагничиванием магнитопровода трансформатора необходимо осуществлять заряд конденсаторов емкостного фильтра цепи постоянного тока ПЧ. Конденсаторы емкостного фильтра установлены на выходе многофазных выпрямителей, входные цепи которых

подключены к вторичным обмоткам силового трансформатора (рис. 1).

Рассмотрим переходный процесс прямого пуска трансформатора, к вторичным обмоткам которого подключены выпрямители с емкостными фильтрами.

На рис. 4 приведены осциллограммы переходного процесса заряда конденсаторов емкостного фильтра при прямом пуске трансформатора без остаточного потока намагничивания. Как мы видим, заряд конденсатора фильтра происходит практически мгновенно, а бросок тока заряда достигает 4800 А. Совершенно очевидно, что такой бросок тока заряда конденсаторов недопустим, поскольку приведет к выходу из строя как конденсаторов фильтра, так и диодов выпрямителя.

Бросок тока первичной обмотки трансформатора в этом случае существенно выше, чем при пуске трансформатора в режиме холостого хода. Как было указано выше, при исследовании переходных процессов пуска трансформатора необходимо учитывать наличие потока остаточного намагничивания магнитопровода трансформатора $\Phi_{ост}$. Разработанная модель позволяет провести исследование переходных процессов с учетом остаточного потока намагничивания. При оценке влияния остаточного потока на переходный процесс пуска трансформатора необходимо использовать характеристику намагничивания магнитопровода трансформатора, изображенную на рис. 2б, параметры которой рассчитаны выше. Были промоделированы прямые

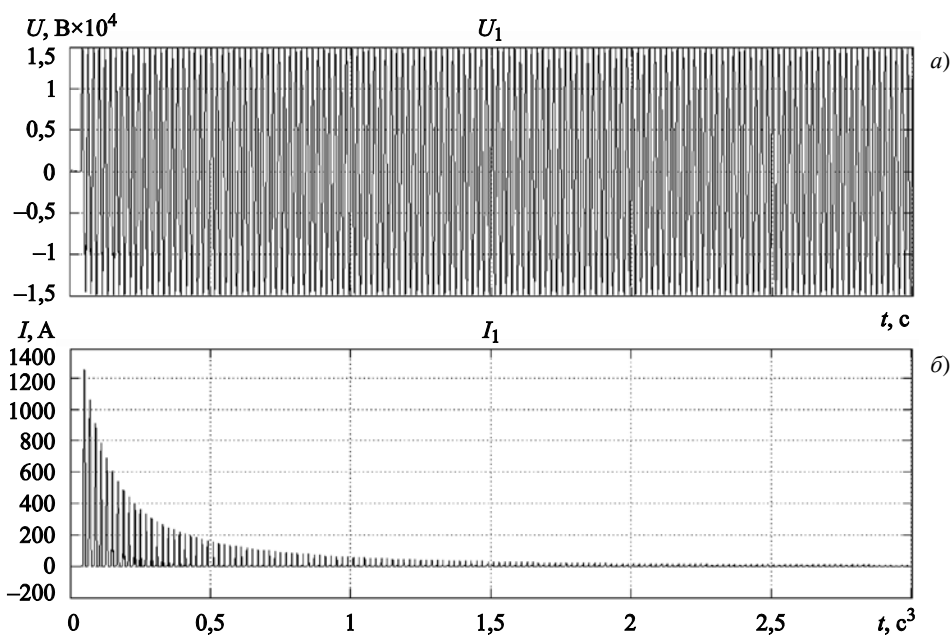


Рис. 3. Осциллограммы прямого пуска трансформатора без остаточного потока намагничивания: напряжение (а) и ток фазы (б) первичной обмотки

Fig. 3. Oscillograms of direct transformer startup without residual flux: voltage (a) and phase winding current (b)

пуски трансформатора с различной величиной остаточного потока намагничивания:

$$\Phi_{ост1} = 0,2\Phi_m; \Phi_{ост2} = 0,4\Phi_m; \Phi_{ост3} = 0,6\Phi_m,$$

где Φ_m – амплитудное значение магнитного потока при номинальном значении напряжения переменного тока.

На рис. 5 приведены осциллограммы прямого пуска трансформатора с остаточным потоком

намагничивания $\Phi_{ост2} = 0,4\Phi_m$. Амплитуда броска тока намагничивания в этом случае достигает 1900 А, что превышает номинальное значение тока первичной обмотки в 5,75 раза и превышает амплитуду импульса тока при прямом пуске без остаточного потока намагничивания в 1,52 раза. Переходный процесс характеризуется большими значениями тока и большей длительностью переходного процесса.

Рис. 4. Осциллограммы напряжения (а) и тока (б) конденсатора емкостного фильтра при прямом пуске трансформатора

Fig. 4. Oscillograms of voltage (a) and current (b) of filtering capacitor for direct transformer startup

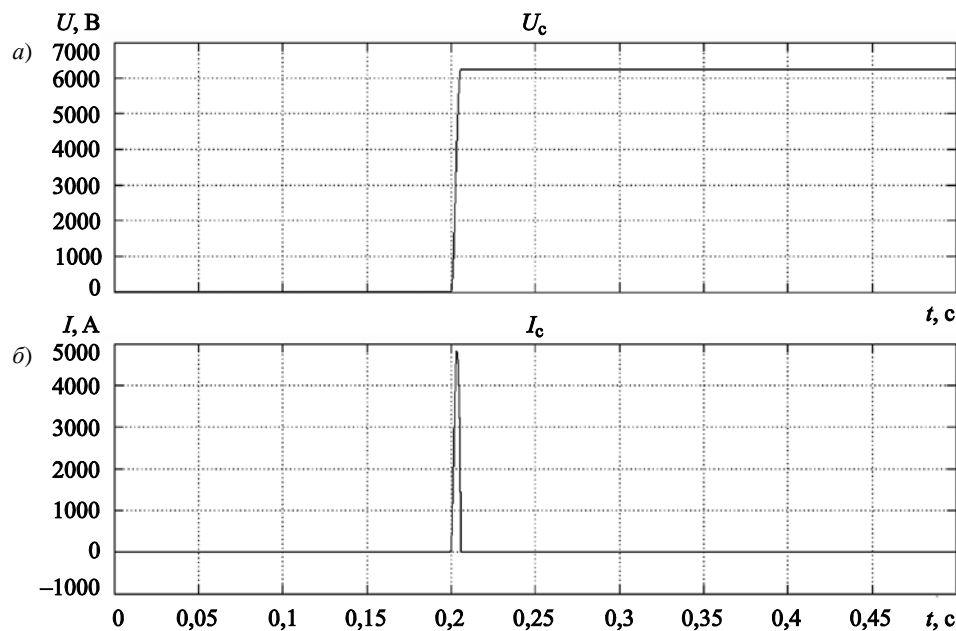
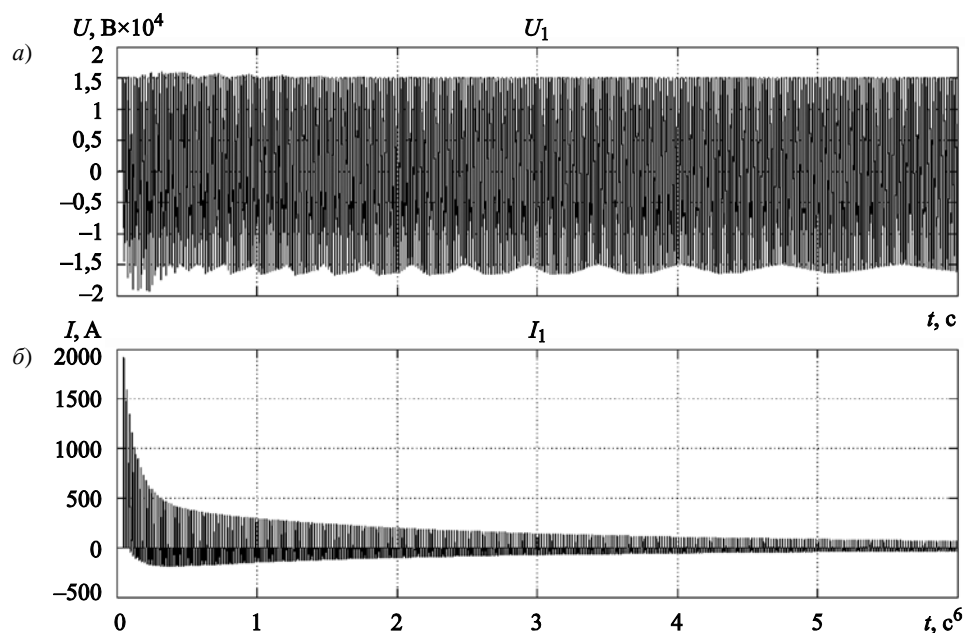


Рис. 5. Осциллограммы прямого пуска трансформатора с остаточным потоком намагничивания $\Phi_{ост2} = 0,4\Phi_m$: напряжение (а) и ток фазы (б)

Fig. 5. Oscillograms of direct transformer startup with residual flux $\Phi_{res2} = 0,4\Phi_m$: voltage (a) and phase current (b)



Также были сняты осциллограммы переходных процессов прямого пуска трансформатора при значениях остаточного потока намагничивания, равных $\Phi_{ост1} = 0,2\Phi_m$ и $\Phi_{ост3} = 0,6\Phi_m$. Амплитуда броска тока намагничивания в этих случаях достигает 1600 А и 2200 А и превышает номинальное значение тока первичной обмотки в 4,85 и 6,66 раза соответственно, а также превышает амплитуду броска тока при прямом пуске без остаточного потока намагничивания в 1,28 и 1,76 раза соответственно.

Результаты моделирования переходного процесса прямого пуска трансформатора при наличии остаточного потока намагничивания показывают, насколько сильно влияет поток остаточного намагничивания на бросок тока при пуске и на величину тока на интервале затухания переходного процесса. Результаты моделирования переходных процессов прямого пуска трансформатора и заряда конденсаторов емкостного фильтра наглядно показывают необходимость включения УПП в состав ПЧ электроприводов гребных винтов судов с электродвижением.

Устройства плавного пуска трансформаторов, разработанные рядом предприятий России, находят широкое применение для пуска трансформаторов различных электроэнергетических систем. В качестве примера можно привести УПП, выпускаемое ООО НПП «ЭКРА», которое предназначено для плавного включения трехфазных трансформаторов мощностью до 100 МВА на стороне 6/10 кВ [5].

Вопросу подключения ПЧ системы электродвижения корабля уделяется также много внимания. Примером может служить статья [6] коллектива авторов Крыловского государственного научного центра. В работе указано на необходимость применения УПП при подключении силового трансформатора преобразователя частоты к бортовой сети корабля.

Поскольку переходные процессы пуска трансформатора и заряда конденсаторов емкостного фильтра могут оказывать существенное влияние на надежность и безотказность работы системы электродвижения корабля, необходимо выполнить углубленное исследование электромагнитных процессов плавного пуска трансформатора и заряда конденсаторов емкостного фильтра при использовании УПП. При этом следует оценить степень влияния остаточного потока намагничивания на характер переходных процессов плавного пуска.

Можно выделить три основных варианта реализации плавного пуска силового трансформатора ПЧ электропривода гребных винтов:

1. Процесс намагничивания силового трансформатора осуществляется УПП с ТРН, подключенным к дополнительной, четвертой, обмотке силового трансформатора, т.н. обмотке намагничивания (рис. 1, УПП вар. 1).
2. Процесс намагничивания силового трансформатора осуществляется УПП с ТРН, подключенным к одной из вторичных обмоток трехобмоточного силового трансформатора, которая на момент пуска выполняет функцию обмотки намагничивания (рис. 1, УПП вар. 2).
3. Процесс намагничивания силового трансформатора осуществляется УПП с балластными резисторами, включенными в линии связи вторичной обмотки согласующего трансформатора и вторичной обмотки трехобмоточного силового трансформатора, выполняющей функцию обмотки намагничивания (рис. 1, УПП вар. 3).

Возможен и четвертый вариант реализации плавного пуска силового трансформатора ПЧ электропривода гребного винта, осуществляемый при подключении УПП к первичной обмотке силового трансформатора. Для электропривода ГВ большой мощности, питающегося от бортовой сети с напряжением $U_{лN} = 10\ 500$ В, требуются тиристорные сборки на напряжение не менее 35 кВ. Изготовление тиристорного УПП на такое высокое напряжение приводит к значительному увеличению стоимости УПП. С учетом этого вариант подключения УПП к первичной обмотке силового трансформатора существенно уступает вариантам 1 и 2 не только по стоимости, но и по надежности, поскольку интенсивность отказов $\lambda(t)$ тиристорной сборки, состоящей из N последовательно соединенных тиристоров, в N раз больше интенсивности отказов одного тиристора. При увеличении интенсивности отказов надежность устройства $P(t)$ снижается:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (3)$$

Варианты 1 и 2 плавного пуска позволяют регулировать темп подъема напряжения, подаваемого на обмотку намагничивания, и тем самым регулировать время заряда конденсаторов фильтра и время пуска в целом. Кроме этого, система плавного пуска вариантов 1 и 2 может быть выполнена замкнутой с отрицательной обратной связью по току заряда конденсаторов фильтра. Заряд конденсаторов фильтра в этом случае будет проходить за

меньшее время и с контролируемой величиной тока тиристорных ТРН.

Вариант 3 плавного пуска лишен возможности регулировать величину тока и время заряда конденсаторов фильтра, но обеспечивает более высокую надежность и безотказность работы УПП. При реализации варианта 3 плавного пуска трансформатора УПП подключается и отключается от обмотки намагничивания силового трансформатора с помощью электромеханического контактора.

При реализации вариантов 1 и 2 плавного пуска трансформатора напряжение, подаваемое на обмотку намагничивания трансформатора, должно плавно изменяться от нуля до номинального значения. На практике часто процесс пуска начинают не с нуля напряжения, а с определенного начального значения $U_{о.п.нач} = (0,10-0,20)U_{о.п.н.}$. Этот прием ускоряет процесс пуска трансформатора, но оказывает влияние на параметры переходного процесса.

Рассмотрим, как происходит процесс плавного пуска трансформатора при наличии или отсутствии остаточного потока намагничивания, а также при наличии или отсутствии начального напряжения $U_{о.п.нач} = 0,10U_{о.п.н.}$.

Исследование переходных процессов плавного пуска трансформатора с использованием устройства плавного пуска с тиристорным регулятором напряжения

Transitory processes: direct transformer startup with soft starters (thyristor voltage controllers)

Исследование переходных процессов плавного пуска трансформатора выполнено для двух вариантов подключения устройств плавного пуска с тиристорным регулятором напряжения: по схеме УПП вар. 1 и по схеме УПП вар. 2 (рис. 1).

Моделирование переходных процессов плавного пуска трансформатора в составе преобразователя частоты проведено для следующих режимов:

1. Плавный пуск трансформатора без обратной связи по току и при линейном характере задания угла регулирования ТРН при отсутствии остаточного потока намагничивания трансформатора и нулевом начальном напряжении.
2. Плавный пуск трансформатора без обратной связи по току и при линейном характере

задания угла регулирования ТРН при наличии остаточного потока намагничивания трансформатора и нулевом начальном напряжении.

3. Плавный пуск трансформатора с обратной связью по току заряда при отсутствии остаточного потока намагничивания трансформатора и при нулевом начальном напряжении.
4. Плавный пуск трансформатора с обратной связью по току заряда при наличии остаточного потока намагничивания трансформатора и при нулевом начальном напряжении.
5. Плавный пуск трансформатора с обратной связью по току заряда при отсутствии остаточного потока намагничивания трансформатора и при начальном напряжении равном $0,1U_{о.п.н.}$.
6. Плавный пуск трансформатора с обратной связью по току заряда при наличии остаточного потока намагничивания трансформатора и при начальном напряжении равном $0,1U_{о.п.н.}$.

Ввиду необходимости учета требования по объему статьи авторы лишены возможности привести в полном объеме осциллограммы переходных процессов и приводят только часть осциллограмм. На рис. 6–9 показаны осциллограммы переходных процессов напряжения и тока обмоток трансформатора при плавном пуске трансформатора с использованием УПП с ТРН. На каждом из этих рисунков верхняя осциллограмма (а) демонстрирует изменение напряжения обмотки намагничивания, нижняя (б) – изменение тока этой обмотки.

На рис. 6 приведены осциллограммы плавного пуска трансформатора без обратной связи по току и при линейном характере задания угла регулирования ТРН при отсутствии остаточного потока намагничивания трансформатора и при нулевом начальном напряжении, прикладываемом к обмотке намагничивания. Угол регулирования тиристорных ТРН изменяется по линейному закону от 120° до нуля на интервале времени, равном 12 с. Обратная связь по току отсутствует.

Из рис. 6 следует, что при включении УПП без обратной связи по току заряда появляются броски напряжения и тока, причем амплитуда броска тока обмотки намагничивания достигает 1100 А.

На рис. 7 приведены осциллограммы плавного пуска замкнутой системы УПП с отрицательной обратной связью по току заряда без остаточного потока намагничивания и при нулевом начальном напряжении. Пуск начинается с напряжения, равного нулю. На рисунке видно, что плавный пуск,

осуществляемый УПП с ТРН и введением отрицательной обратной связи по току заряда, имеет т.н. идеальный характер, без выбросов тока или напряжения на всем интервале времени пуска.

Осциллограммы плавного пуска с обратной связью по току заряда при наличии остаточного потока намагничивания трансформатора $\Phi_{ост2} = 0,4\Phi_m$ по-

казаны на рис. 8. Из рисунка следует, что в момент включения УПП появляется бросок тока обмотки намагничивания, амплитуда которого превышает 600 А, что составляет величину, равную половине номинального значения фазного тока обмотки намагничивания, т.е. $0,5I_{2фN}$. Такой бросок тока не представляет опасности для сило-

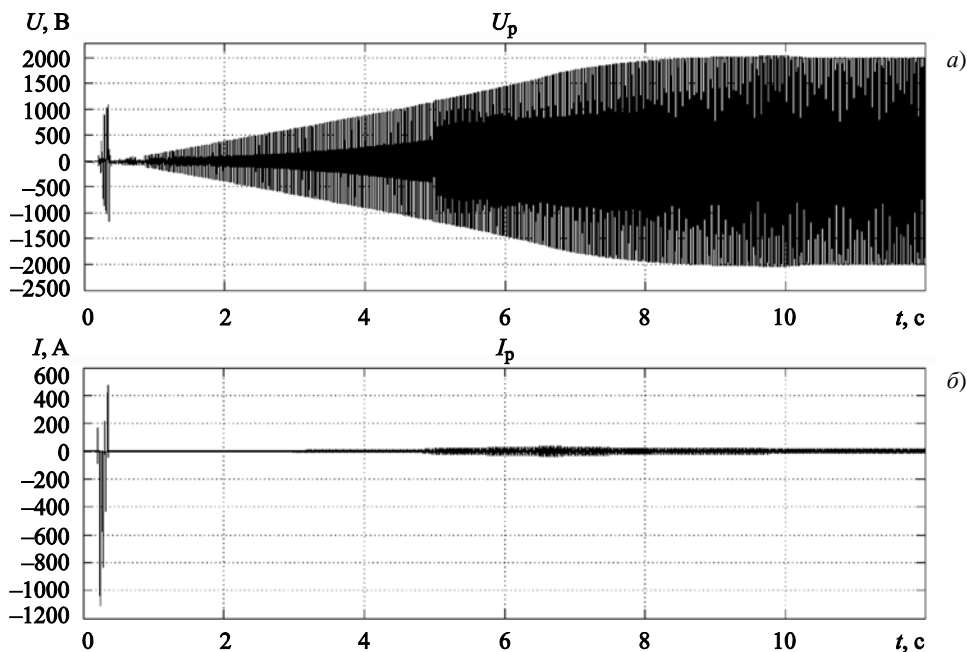


Рис. 6. Осциллограммы плавного пуска без обратной связи по току и при линейном характере задания угла регулирования устройства плавного пуска при отсутствии остаточного потока намагничивания трансформатора и нулевом начальном напряжении

Fig. 6. Soft-start oscillograms without current feedback and with linear setting of soft-starter control angle: no residual flux, zero initial voltage

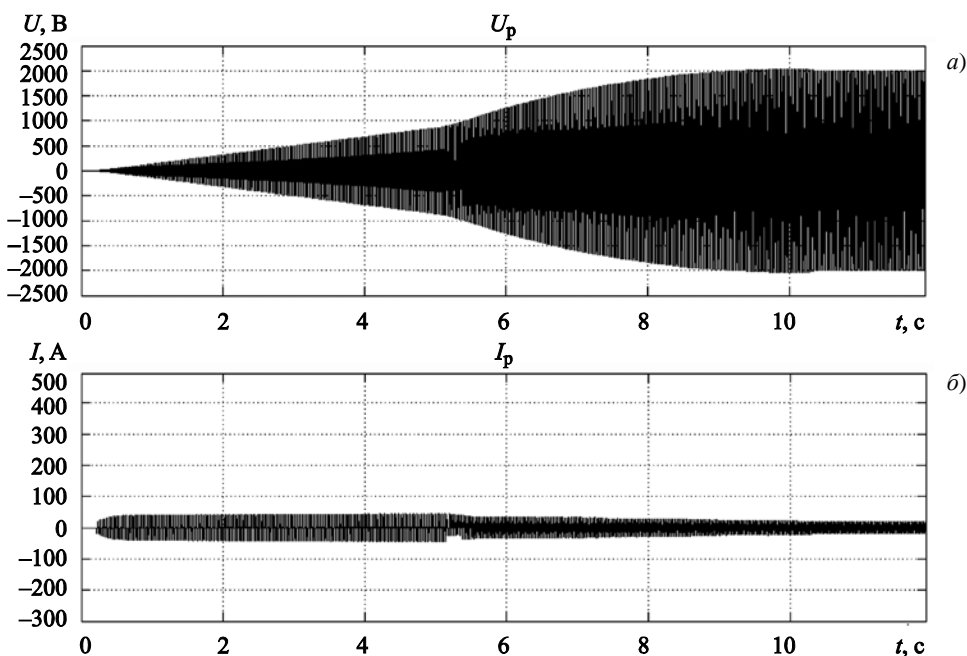


Рис. 7. Осциллограммы плавного пуска с обратной связью по току заряда при отсутствии остаточного потока намагничивания трансформатора и при нулевом начальном напряжении

Fig. 7. Soft-start oscillograms with current feedback: no residual flux, zero initial voltage

вого трансформатора, но может оказаться источником помех, которые при определенных условиях способны привести к появлению нарушений в работе корабельных компьютерных систем управления и защиты.

На рис. 9 приведены осциллограммы плавного пуска трансформатора с обратной связью по току

заряда при отсутствии остаточного потока намагничивания трансформатора и при начальном напряжении, равном $0,1U_{0.п.н.}$. Видно, что время пуска уменьшается. Однако пуск сопровождается броском тока обмотки намагничивания в момент включения УПП. Амплитуда броска тока достигает почти 700 А.

Рис. 8. Осциллограммы плавного пуска с обратной связью по току заряда при наличии остаточного потока намагничивания трансформатора $\Phi_{ост2} = 0,4\Phi_m$
Fig. 8. Soft-start oscillograms with current feedback: residual flux $\Phi_{res2} = 0.4\Phi_m$

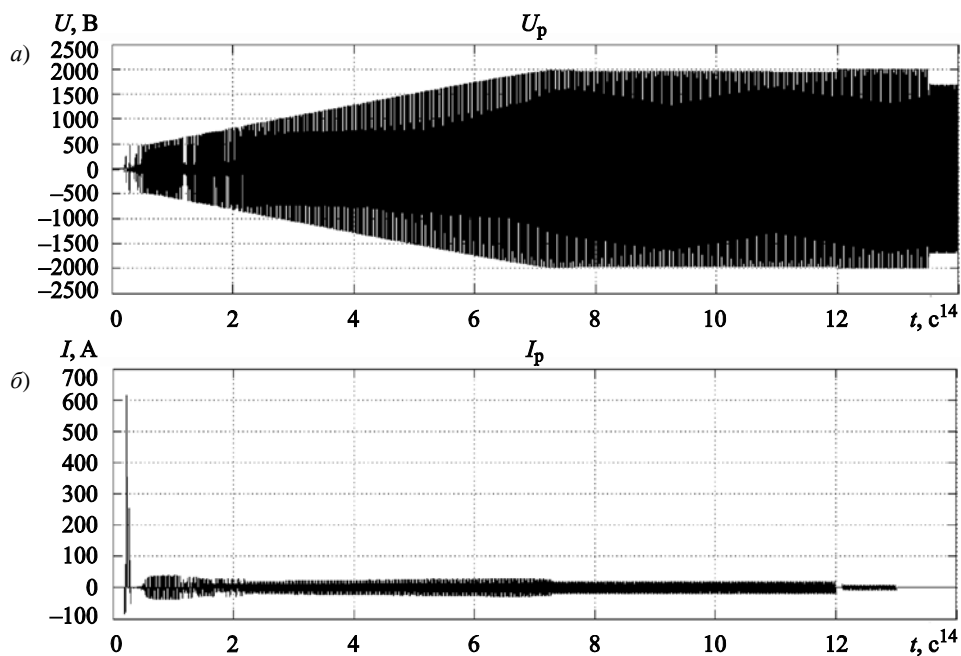
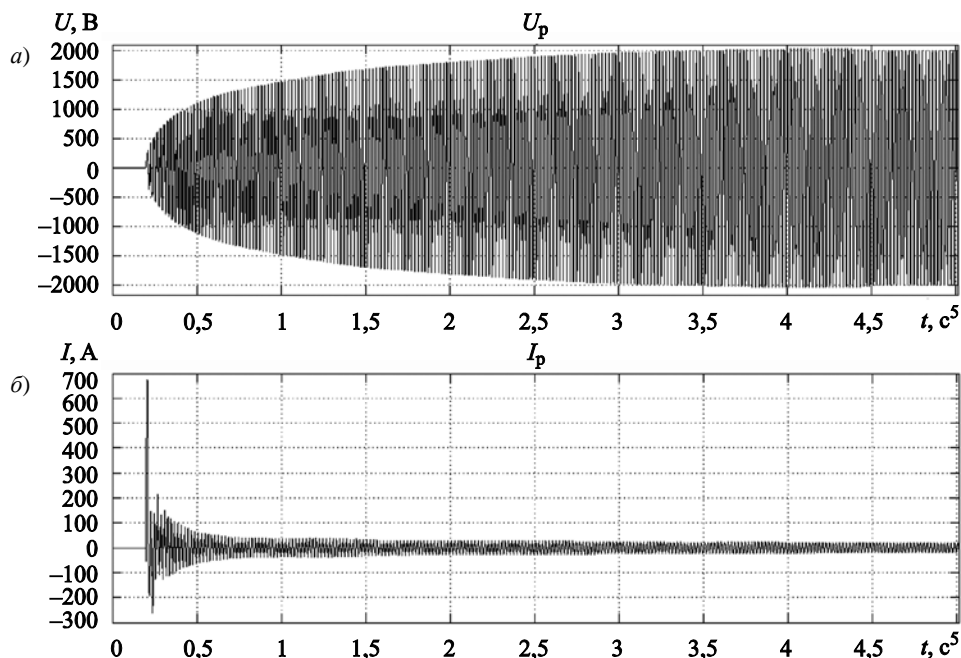


Рис. 9. Осциллограммы плавного пуска с обратной связью по току заряда при отсутствии остаточного потока намагничивания трансформатора и при начальном напряжении равном $0,1U_{0.п.н.}$
Fig. 9 Soft-start oscillograms with current feedback: no residual flux, initial voltage $0.1U_{0.п.н.}$



Исследование переходных процессов плавного пуска трансформатора с использованием устройства плавного пуска с балластными резисторами

Transitory processes: direct transformer startup with soft starters (ballast resistors)

Рассмотрим особенности электромагнитных процессов плавного пуска по третьему варианту, при котором процесс намагничивания трансформатора осуществляется от согласующего трансформатора, вторичная обмотка которого подключена к одной из вторичных обмоток трехобмоточного силового трансформатора через балластные резисторы, ($R_6 = 16 \text{ Ом}$) (рис. 1, УПП вар. 3).

Представляют интерес два варианта плавного пуска трансформатора с использованием УПП с балластными резисторами:

- при отсутствии остаточного потока намагничивания трансформатора;
- при наличии остаточного потока намагничивания трансформатора.

На рис. 10–14 приведены осциллограммы напряжений и токов обмоток трансформатора при использовании УПП с балластными резисторами.

Отличие осциллограмм, размещенных на рис. 10 и рис. 12, заключается в величине напряжения вто-

ричной обмотки согласующего трансформатора $U_{2л}$, подаваемого на обмотку намагничивания силового трансформатора. Осциллограммы на рис. 10 сняты при номинальном значении напряжения $U_{2л} = U_{2лN} = 1420 \text{ В}$, а на рис. 12 – при увеличенном значении напряжения $U_{2л} = 1780 \text{ В}$.

При значении напряжения $U_{2л} = U_{2лN} = 1420 \text{ В}$ электродвижущая сила (ЭДС) первичной обмотки E_{10} после завершения намагничивания магнитопровода трансформатора оказывается меньше номинального значения напряжения первичной обмотки трансформатора U_{1N} . Неравенство величины ЭДС E_{10} и напряжения U_{1N} вызвано наличием падения напряжения на балластных резисторах при протекании по ним тока намагничивания. Неравенство E_{10} и напряжения U_{1N} является причиной возникновения броска тока первичной обмотки (момент времени $t = 3 \text{ с}$). Бросок тока обмотки намагничивания достигает 120 А , а тока заряда конденсаторов фильтра – 900 А .

На рис. 11 приведены осциллограммы напряжения и тока обмотки намагничивания, а на рис. 12 – осциллограммы напряжения и тока первичной обмотки силового трансформатора при плавном пуске при использовании УПП с балластными резисторами и напряжении вторичной обмотки согласующего трансформатора $U_{2л} = 1780 \text{ В}$. При этом значении напряжения вторичной обмотки согласующего трансформатора падение напряжения на балластных резисторах скомпенсировано полностью и мо-

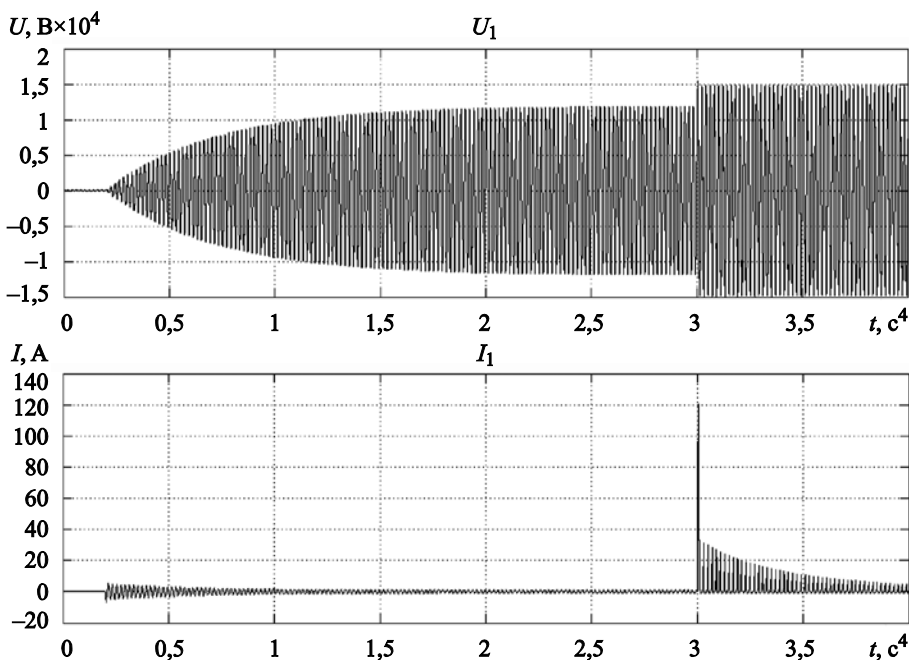


Рис. 10. Осциллограммы плавного пуска трансформатора при использовании устройства плавного пуска с балластными резисторами и напряжении вторичной обмотки согласующего трансформатора $U_{2лN} = 1420 \text{ В}$: напряжение (а) и ток (б) первичной обмотки силового трансформатора

Fig. 10. Soft-start oscillograms for the transformer with ballast resistors, voltage at secondary winding of matching transformer $U_{2лN} = 1420 \text{ V}$: voltage (a) and current (b) at primary winding of feed transformer

дули ЭДС первичной обмотки E_{10} , наведенной потоком намагничивания, и напряжения бортовой сети, подключаемой к первичной обмотке силового трансформатора U_1 , равны по величине.

Подключение первичной обмотки трансформатора к бортовой сети происходит в момент времени $t = 3$ с без броска тока. На интервале времени от 3

до 3,5 с подключены обе обмотки трансформатора: первичная – к бортовой сети, а обмотка намагничивания через балластные резисторы – к вторичной обмотке согласующего трансформатора.

На рис. 13 приведены осциллограммы напряжения и тока конденсаторов емкостного фильтра при пуске с использованием УПП с балластными

Рис. 11. Осциллограммы плавного пуска трансформатора при использовании устройства плавного пуска с балластными резисторами и напряжении вторичной обмотки согласующего трансформатора $U_{2н} = 1700$ В: напряжение (а) и ток (б) ток обмотки намагничивания

Fig. 11. Soft-start oscillograms for the transformer with ballast resistors, voltage at secondary winding of matching transformer $U_{2n} = 1700$ V: voltage (a) and current (b) at magnetization winding

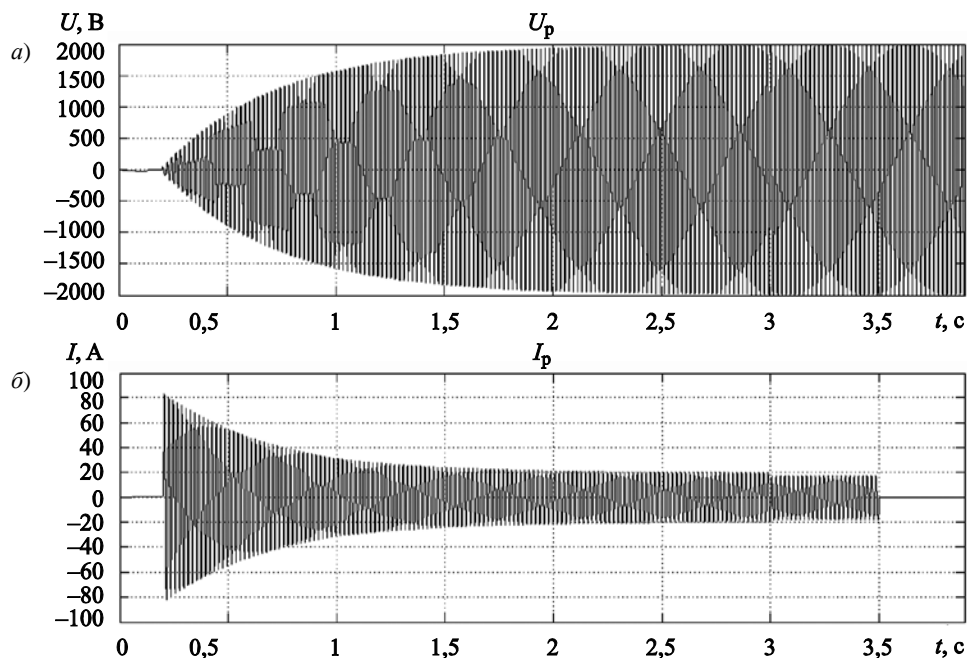
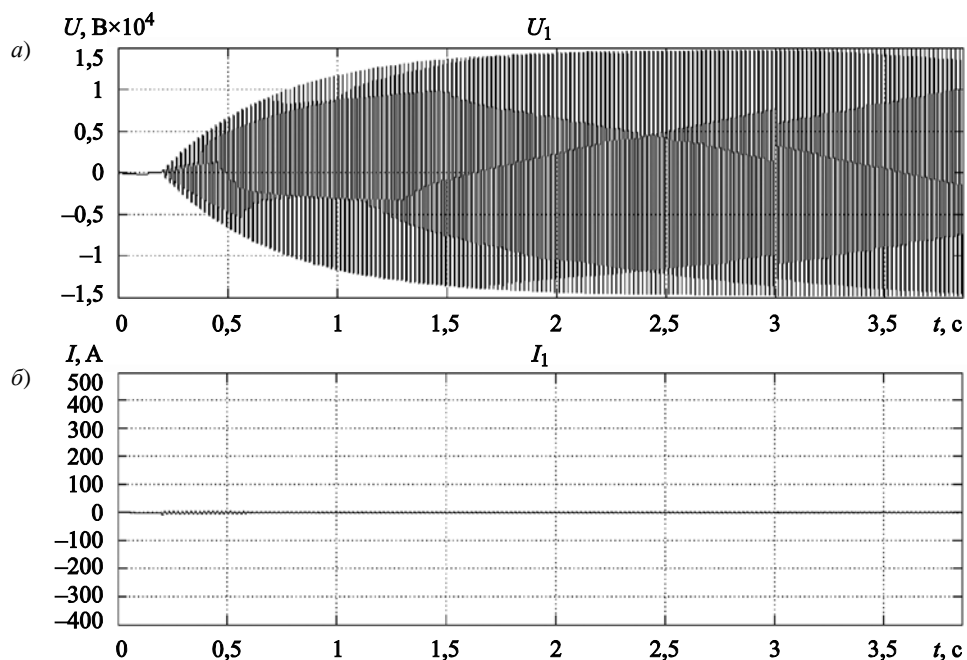


Рис. 12. Осциллограммы плавного пуска трансформатора при использовании устройства плавного пуска с балластными резисторами: напряжение (а) и ток (б) первичной обмотки силового трансформатора

Fig. 12. Soft-start oscillograms for the transformer with ballast resistors: voltage (a) and current (b) at primary winding of feed transformer



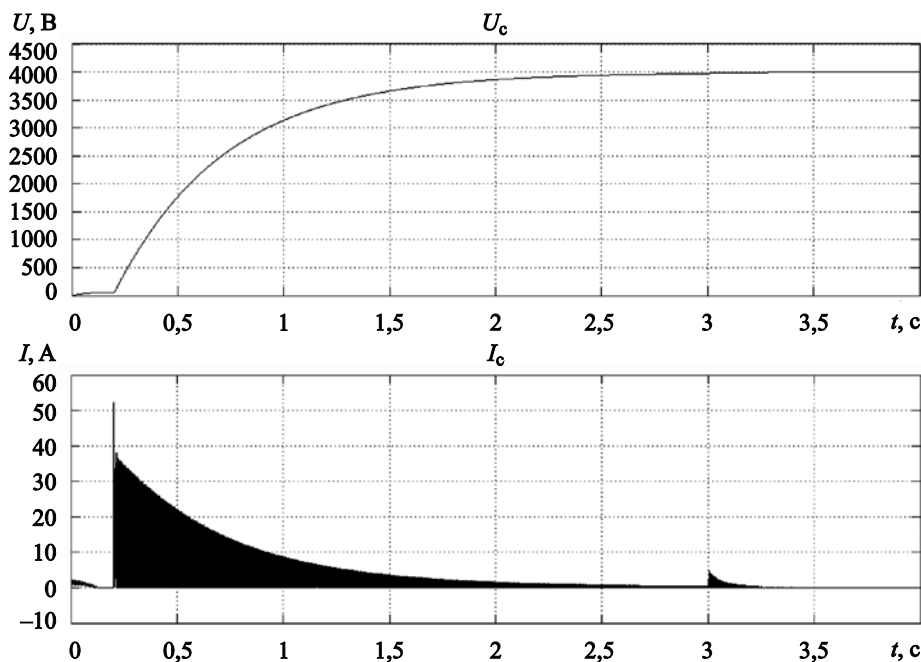


Рис. 13. Осциллограммы плавного пуска трансформатора при использовании устройства плавного пуска с балластными резисторами: напряжение (а) и ток (б) ток конденсатора
Fig. 13. Soft-start oscillograms for the transformer with ballast resistors: voltage (a) and current (b) at capacitor

резисторами. Кривые напряжения и тока конденсаторов носят экспоненциальный характер.

Необходимо отметить, что балластные резисторы существенно уменьшают постоянную времени цепи намагничивания и оказывают демпфирующее влияние на характер переходных процессов трансформатора при плавном пуске. Наличие остаточного потока намагничивания при использовании УПП с балластными резисторами практически не оказывает влияния на характер электромагнитных процессов плавного пуска трансформатора.

Отметим также, что наличие балластных резисторов в цепи обмотки намагничивания трансформатора при использовании УПП с балластными резисторами приводит к появлению фазового сдвига между ЭДС E_{10} и напряжением U_1 .

На рис. 14 приведены осциллограммы ЭДС и напряжения первичной обмотки трансформатора U_1 перед моментом подключения этой обмотки к бортовой сети. Кривая напряжения U_1 выполнена черным цветом. Из осциллограммы можно установить наличие фазового сдвига между ЭДС E_{10} и напряжением U_1 в пределах 8° . Кроме того, на рисунке можно наблюдать момент подключения первичной обмотки трансформатора к бортовой сети, $t = 3$ с.

Осциллограммы напряжения U_1 и ЭДС E_{10} , снятые при отсутствии балластных резисторов (в тексте статьи не приведены), показывают наличие фазового сдвига между ЭДС E_{10} и напряжением U_1 в пределах не более $1,8^\circ$. Величина этого фазового сдвига определяется только собственными параметрами силового трансформатора.

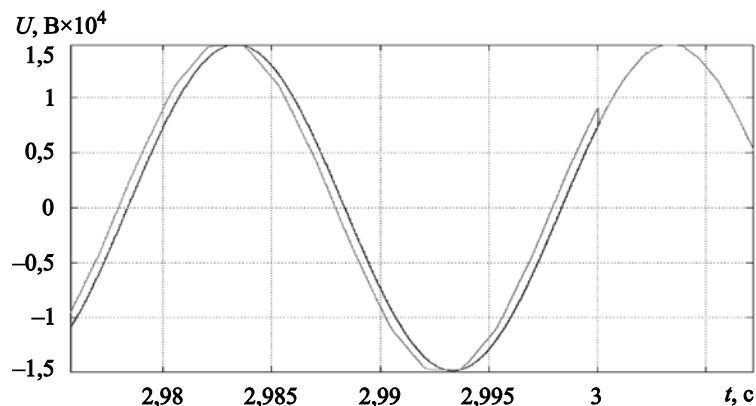


Рис. 14. Осциллограммы напряжения U_1 и ЭДС E_{10} в момент подключения первичной обмотки к бортовой сети

Fig. 14. Oscillograms of voltage U_1 and electromotive force (EMF) E_{10} at the moment of connecting the primary winding to the onboard grid

Осциллограммы рис. 11–13 показывают, что наличие фазового сдвига между ЭДС E_{10} и напряжением U_1 в пределах 8° не оказывает заметного влияния на характер электромагнитных процессов при пуске трансформатора и заряде конденсаторов фильтра. Однако увеличение этого фазового сдвига может привести к появлению выбросов тока в первичной обмотке силового трансформатора в момент подключения ее к бортовой сети.

Напомним, что силовой трансформатор выполнен с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединена в звезду, а вторая – в треугольник. Обмотка, соединенная в звезду, используется в качестве обмотки намагничивания при реализации процесса плавного пуска по варианту 2.

На рис. 15 приведены осциллограммы напряжения и тока первичной обмотки трансформатора, иллюстрирующие бросок тока первичной обмотки трансформатора в момент ее подключения к бортовой сети, $t = 3$ с, при наличии фазового сдвига, равного 30° . Фазовый сдвиг между ЭДС E_{10} и напряжением U_1 такой величины появляется при реализации процесса намагничивания магнитопровода трансформатора посредством вторичной обмотки, соединенной в треугольник.

Из осциллограммы на рис. 15 видно, что амплитуда импульса тока первичной обмотки силового трансформатора в момент подключения достигает 350 А.

Заключение

Conclusion

Выполнено исследование электромагнитных переходных процессов прямого и плавного пуска сетевого трансформатора и заряда конденсаторов емкостного фильтра преобразователя частоты электропривода гребного винта. Результаты позволяют сформулировать ряд выводов.

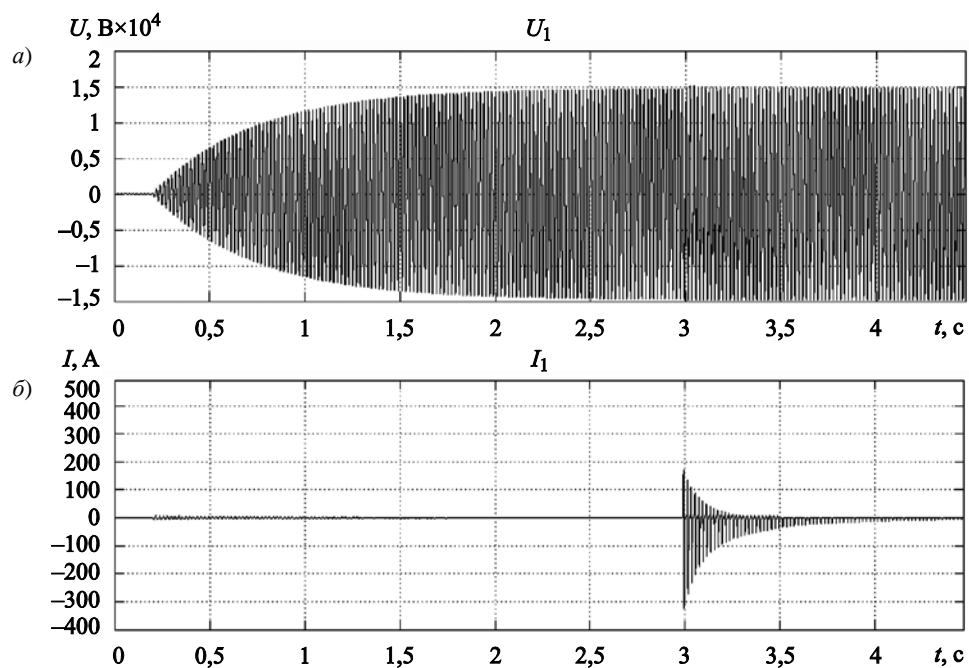
1. При прямом пуске силового трансформатора и наличии остаточного потока намагничивания магнитопровода трансформатора амплитуда броска тока намагничивания превышает номинальное значение тока первичной обмотки трансформатора в 5–6 раз, что недопустимо.

2. Переходные процессы плавного пуска трансформатора с дополнительной обмоткой намагничивания (четвертой обмоткой) и трехобмоточного трансформатора, одна из вторичных обмоток которого используется на интервале пуска в качестве обмотки намагничивания, практически идентичны.

3. Переходный процесс плавного пуска трансформатора при использовании УПП с ТРН без обратной связи по току заряда сопровождается броском тока в обмотке намагничивания в момент включения УПП. Амплитуда импульса броска тока достигает 1100 А.

4. Переходный процесс плавного пуска трансформатора при отсутствии остаточного потока

Рис. 15. Осциллограммы плавного пуска трансформатора с использованием балластных резисторов при 30° фазовом сдвиге между ЭДС E_{10} и напряжением U_1 : напряжение (а) и ток (б) первичной обмотки силового трансформатора
Fig. 15. Soft-start oscillograms for the transformer with ballast resistors: 30° phase shift between EMF E_{10} and voltage U_1 : voltage (a) and current (b) at primary winding of feed transformer



намагничивания и использовании УПП с ТРН и обратной связи по току заряда характеризуется отсутствием бросков тока намагничивания трансформатора и тока заряда конденсаторов на всем протяжении переходного процесса.

5. Переходный процесс плавного пуска трансформатора при наличии остаточного потока намагничивания, равного $\Phi_{ост2} = 0,4\Phi_m$, и использовании УПП с ТРН и обратной связи по току заряда сопровождается броском тока обмотки намагничивания трансформатора в момент включения УПП. Амплитуда импульса броска тока обмотки намагничивания достигает 600 А.

6. Переходный процесс плавного пуска трансформатора при ненулевом начальном напряжении, подаваемом на обмотку намагничивания, равном $0,1U_{0.л.н.}$, и использовании УПП с ТРН и обратной связи по току заряда сопровождается броском тока обмотки намагничивания трансформатора в момент включения УПП. Амплитуда импульса броска тока обмотки намагничивания достигает 700 А.

7. Подключение первичной обмотки трансформатора к бортовой сети до момента завершения процесса намагничивания магнитопровода трансформатора сопровождается бросками тока в обмотках трансформатора и цепи конденсаторов фильтра.

8. Переходный процесс пуска трансформатора при использовании УПП с балластными резисторами, независимо от наличия либо отсутствия остаточного потока намагничивания, проходит без бросков тока в момент подключения как УПП, так и первичной обмотки силового трансформатора к бортовой сети. При этом при расчете требуемой величины напряжения вторичной обмотки согласующего трансформатора должно быть учтено падение напряжения на балластных резисторах. Невыполнение этого условия приводит к появлению броска тока в первичной обмотке трансформатора и в конденсаторах емкостного фильтра в момент подключения первичной обмотки к бортовой сети.

9. Реализация плавного пуска трансформатора при использовании УПП с балластными резисторами сопровождается появлением фазового сдвига между ЭДС E_{10} , наводимой в первичной обмотке трансформатора потоком обмотки намагничивания, и напряжением бортовой сети U_1 , подаваемым на первичную обмотку силового трансформатора после завершения процесса намагничивания. Величина фазового сдвига составляет не более 10° , она определяется прежде всего величиной активного сопротивления балластных резисторов и не оказы-

вает заметного влияния на характер переходного процесса пуска.

Авторы выражают надежду, что результаты исследований, приведенные в статье, будут полезны специалистам при разработке и эксплуатации устройств плавного пуска силовых трансформаторов преобразователей частоты со звеном постоянного тока, используемых в составе системы электродвижения корабля.

Список использованной литературы

1. *Pухтер Р.* Электрические машины: в 5 т. Т. 3: Трансформаторы. Ленинград; Москва: Онти. Главная редакция энергетической литературы, 1935. 292 с.
2. *Пиотровский Л.М.* Электрические машины. Ленинград; Москва: Изд. и тип. Госэнергоиздата в Москве, 1950. 528 с.
3. *Петров Г.Н.* Электрические машины в 3 ч. Ч. 1: Введение. Ч. 1: Трансформаторы. Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1956. 224 с.
4. *Черных И.В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. Москва [и др.]: Питер, 2008. 288 с.
5. Устройства и системы плавного пуска и регулирования скорости электродвигателей напряжением 3...15 кВ и мощностью до 25 МВт // ООО НПФ «ЭКРА»: [сайт]. 2017. Изд. 10. 32 с. URL: [ekra.ru>upload/iblock/e33/USPP.pdf](http://ekra.ru/upload/iblock/e33/USPP.pdf) (дата обращения: 19.01.2023).
6. *Семенов М.Ю., Цицикян Г.Н., Бобровников П.В.* Устройства мягкого пуска для систем электродвижения // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Вып. 3(401). С. 116–120. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-116-120.

References

1. *Richter R.* Elektrische Maschinen. In 5 vol. Vol. 3 – Die Transformatoren (*Russian translation*). Leningrad, Moscow: Onti, Chief Publishing House of Power Engineering Literature. 1935. 292 p.
2. *Piotrovsky L.M.* Electric machines. Leningrad, Moscow: Gosenergoizdat Publishing & Printing House, 1950. 528 p. (*in Russian*).
3. *Petrov G.N.* Electric machines. In 3 vol. Vol. 1. Introduction. Part 1. Transformers. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1956. 224 p. (*in Russian*).
4. *Chernykh I.V.* Simulation of electric equipment in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink. Moscow [et al.]: Piter, 2008. 288 p. (*in Russian*).
5. Devices and systems for soft start and RPM control of motors with design voltage 3–15 kV and power up to 25 MW // Web catalogue of EKRA Research & Pro-

- duction Enterprise. 2017. 10th edition. 32 p. URL: <https://ekra.ru/upload/iblock/e33/USPP.pdf> (Accessed: 19.01.2023) (in Russian).
6. *Semenov M.U., Tsitsikyan G.N., Bobrovnikov P.V.* Soft start device for electric propulsion system // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022. Vol. 3(401). P. 116–120. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-116-120 (in Russian).
- ственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. E-mail: nio12_lab122@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.

Сведения об авторах

Мартынов Александр Александрович, к.т.н., 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) 748-52-43. E-mail: I_Goryushkin@ksrc.ru.

Ляпидов Станислав Константинович, 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.

Самсыгин Вадим Константинович, начальник лаборатории 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: w.samsygin@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-3117-9042>.

Соколов Дмитрий Владимирович, ведущий инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государ-

About the authors

Alexandr A. Martynov, Cand. Sci. (Eng.), 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, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-43. E-mail: I_Goryushkin@ksrc.ru.

Stanislav K. Lyapidov, 1st Category Engineer, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. E-mail: S_Lyapidov@ksrc.ru.

Vadim K. Samsygin, Head of Laboratory, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-46. E-mail: w.samsygin@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-3117-9042>.

Dmitry V. Sokolov, Lead Engineer, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. E-mail: nio12_lab122@ksrc.ru.

Vladimir I. Simukhin, Engineer, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. E-mail: V_Simuhin@ksrc.ru.

Поступила / Received: 16.03.23
Принята в печать / Accepted: 24.08.23
© Коллектив авторов, 2023