

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-117-128  
УДК 621.313.322

А.А. Мартынов<sup>1</sup> , В.К. Самсыгин<sup>2</sup> , Д.В. Соколов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

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

## К ВОПРОСУ РАСЧЕТА АВТОНОМНОЙ МОРСКОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ДОКОВОЙ СТАНЦИИ

**Объект и цель научной работы.** Объектом является автономная морская электростанция, предназначенная для энергообеспечения подводной доковой станции. Цель состоит в разработке основ методики расчета электрического генератора автономной морской электростанции, размещенной в капсуле с конической насадкой – диффузором.

**Материалы и методы.** Исследование проводилось на основе аналитических методов расчета электромеханических систем, предназначенных для энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов.

**Основные результаты.** Разработаны основы методики расчета основных параметров синхронного генератора кольцевой конструкции с магнитоэлектрическим возбуждением, преобразующим энергию морского течения в электрическую энергию, передаваемую в подводную доковую станцию для заряда аккумуляторных батарей. Разработанная система энергообеспечения подводной доковой станции защищена патентом Российской Федерации.

**Заклучение.** Результаты разработки и исследования расширяют возможности выбора оптимального варианта системы энергообеспечения подводных доковых станций и способствуют ускорению процесса внедрения их на практике.

**Ключевые слова:** резидентный подводный робот, робототехнический комплекс, аккумулятор, энергообеспечение, доковая станция, синхронный генератор.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-117-128  
UDC 621.313.322

A. Martynov<sup>1</sup> , V. Samsygin<sup>2</sup> , D. Sokolov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Engineering, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> SET Branch of the Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## ON THE ISSUE OF CALCULATION OF AN AUTONOMOUS MARINE POWER PLANT FOR ENERGY SUPPLY OF AN UNDERWATER DOCKING STATION

**Object and purpose of research.** The object of work is an autonomous offshore power plant designed to provide energy to the underwater docking station. The aim is to develop the basics of the methodology for calculating the electric generator of an autonomous offshore power plant, placed in a capsule with a conical nozzle – a diffuser.

**Materials and methods.** The study was conducted on the basis of analytical methods for calculating electromechanical systems designed for energy supply of resident underwater robots and robotic complexes.

**Main results.** The basics of the methodology for calculating the basic parameters of a synchronous generator of ring structure with magnetoelectric excitation, which converts the energy of the sea current into electrical energy transmitted to the un-

*Для цитирования:* Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В. К вопросу расчета автономной морской электростанции для энергообеспечения подводной доковой станции. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 2(404): 117–128.

*For citations:* Martynov A., Samsygin V., Sokolov D. On the issue of calculation of an autonomous marine power plant for energy supply of an underwater docking station. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 2(404): 117–128 (in Russian).

derwater dock station for charging batteries, have been developed. The developed system of power supply of the underwater docking station is protected by a patent of the Russian Federation.

**Conclusion.** The results of the development and research expand the possibilities of choosing the optimal option for the energy supply system of underwater docking stations and contribute to the acceleration of the process of their implementation in practice.

**Keywords:** resident underwater robot, robotic complex, battery, power supply, dock station, synchronous generator.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

Бурное развитие подводной робототехники, включая подводную резидентную робототехнику, привело к появлению нового научно-практического направления, связанного с разработкой и созданием устройств и систем энергообеспечения подводных роботов и робототехнических комплексов.

Вопросами энергообеспечения подводных резидентных роботов и робототехнических комплексов занимаются такие ведущие мировые фирмы, как ICM Subsea & Technology / Hunter Group (Норвегия), Oceaneering International, Inc. (США), Saab Seaeye Limited (Великобритания). Среди отечественных фирм, работающих в данной сфере, можно отметить Крыловский государственный научный центр, АО «НПП ПТ «Океанос», а также университеты СПбГМТУ, СПбГУАП и др. [1–13].

В настоящее время формируется новое направление в разработке устройств и систем энергообеспечения подводной резидентной робототехники, основанное на использовании энергии Мирового океана. Прежде всего это касается использования энергии морских волн и энергии морских течений.

Примером использования энергии морских волн может служить трехфазная поплавковая волновая электростанция, описание которой приведено в [11]. Волновой электрический генератор содержит жестко закрепленный на опоре корпус с двумя крышками, внутри которого размещен статор с ферромагнитным магнитопроводом и трехфазной электрической обмоткой. Поплавок с помощью штока соединен с индуктором генератора. Внутри корпуса также находится пружина, прикрепленная к нижней крышке корпуса. Частота ЭДС, генерируемой в обмотке статора при возвратно-поступательном движении индуктора  $f_s$ , больше частоты колебания волны  $f_b$  в коэффициент электрической редукции раз, т.е.  $f_s = k_p f_b$ . Волновые генераторы подобной конструкции могут быть выполнены на мощность от нескольких сотен Вт до нескольких сотен кВт и применяться для энергообеспечения как доковых станций, так и потребителей электрической энергии, размещенных на берегу.

Другим примером использования энергии морских волн для энергообеспечения подводных роботов может служить патент RU № 2389638 «Устройство для обслуживания и ремонта подводно-кабельных магистралей связи» [12]. Плавающий волновой источник энергии состоит из трех шарнирно соединенных между собой понтонов, воспринимающих колебания волн. На одном из понтонов размещены емкость для закачки воздуха, воздушная турбина и электрический генератор, вал которого механически соединен с валом воздушной турбины. Кабель-трос соединяет электрический генератор с аккумуляторной батареей и электродвигателем подводного аппарата. Поднимаясь или падая, волна, соответственно, выталкивает или всасывает воздух внутрь емкости. Движение столба воздуха при этом приводит в движение воздушную турбину и ротор электрического генератора. Электрический генератор вырабатывает электрическую энергию, которая по кабель-тросу передается аккумулятору и электродвигателю подводного аппарата. К недостаткам этой системы следует отнести повышенную сложность конструкции и невысокую надежность.

Результаты совместной работы Крыловского центра и СПбГУАП в области разработки систем энергообеспечения подводных аппаратов, в которых в качестве первичного источника энергии использована энергия Мирового океана, опубликованы в Трудах Крыловского государственного научного центра [1, 9–10] и защищены патентами РФ [8] и [13]. На результаты разработки системы энергообеспечения доковых станций и автономных роботов от электрического генератора, размещенного в капсуле с положительной плавучестью, получен патент РФ [5].

Электрическую энергию в этой системе вырабатывает синхронный генератор кольцевого типа с магнитоэлектрическим возбуждением. На рис. 1 приведена фотография внешнего вида синхронной машины кольцевого типа с винтом, размещенным внутри ротора электрической машины. При работе электрической машины в генераторном режиме винт выполняет функцию турбины, преобразующей кинетическую энергию морского течения в механи-

ческую энергию, передаваемую ротору электрического генератора. Лопасты турбины (винта) приводятся во вращение за счет естественного движения потока воды.

Рассмотрим основы методики расчета автономной морской электростанции с синхронным генератором кольцевого типа с магнитоэлектрическим возбуждением, размещенным в капсуле с положительной плавучестью и соединенным с доковой станцией кабель-тросом [5–6].

Основным показателем, характеризующим морской поток по мощности, является динамический напор  $H$ :

$$H = v_n^2 / 2g, \text{ м}, \quad (1)$$

где  $v_n$  – скорость морского потока, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Движение лопастей турбины под воздействием динамического напора происходит поперек направления потока.

Вторым показателем, характеризующим работу турбины, является расход воды через турбину:

$$Q = S_T v_n, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2)$$

где  $S_T$  – площадь, ометаемая лопастями турбины, м<sup>2</sup>.

Используя значения параметров  $H$  и  $Q$ , можно получить аналитическое выражение мощности потока (3):

$$P_n = 0,5 \cdot \rho \cdot S_T \cdot v_{nN}^3 = 500 \cdot S_T \cdot v_{nN}^3, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

В первом приближении значение  $\rho$  может быть принято равным 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Из (3) можно определить произведение двух важных параметров, а именно площади, ометаемой лопастями турбины, и скорости потока:

$$S_T \cdot v_{nN}^3 = P_n / 500. \quad (4)$$

Формула (4) позволяет определить величину площади, ометаемой лопастями турбины, при которой поток передаст турбине требуемую мощность при заданном значении скорости потока, проходящего через лопасти турбины. Поскольку площадь турбины  $S_T$  связана с диаметром внутреннего обода ротора турбины  $D_T$  (диаметром лопастей) известным соотношением  $S_T = \pi \cdot D_T^2 / 4$ , то нетрудно определить зависимость диаметра лопастей турбины от скорости потока при заданном значении мощности потока  $P_n$ :

$$D_T = 0,05 \sqrt{\frac{P_n}{v_{nN}^3}}, \text{ м}. \quad (5)$$



**Рис. 1.** Внешний вид синхронной машины кольцевого типа

**Fig. 1.** General view of ring-type synchronous machine

Из (5) видно, что диаметр турбины существенно зависит от величины скорости потока. Несложно установить, что увеличение скорости потока, например в 2 раза, будет способствовать уменьшению диаметра турбины, при одном и том же значении мощности потока, в 2,828 раза.

Основным фактором, повышающим эффективность турбины, является выполнение лопастей турбины с единым шагом вращения на всех ее радиусах. Под шагом данного сечения турбины принимается расстояние, на которое переместится масса воды за один оборот, если представить эту массу воды в виде гайки, диаметр которой равен  $2R_T$ , а угол подъема резьбы равен углу между хордой взятого сечения и плоскостью вращения турбины.

Как предложено в [5], для увеличения скорости потока через турбину необходимо на вход турбины установить насадку конической формы – конфузор. Практически не составляет труда с помощью установки такой насадки увеличить скорость потока, проходящего через турбину, в 2–4 раза и тем самым увеличить скорость вращения турбины.

Шаг турбины определяется по формуле:

$$h = 2\pi R \operatorname{tg} \alpha, \quad (6)$$

где  $h$  – шаг выделенного сечения, м;  $R$  – радиус сечения, м;  $\alpha$  – угол установки сечения, град.

Определение величины шага турбины существенно упрощается, если известно отношение шага турбины  $h$  к диаметру,  $h/D_T$ . В этом случае шаг турбины определяется произведением отношения  $(h/D_T)$  и диаметра турбины  $D_T$ :

$$h = (h/D_T) \cdot D_T, \text{ м}. \quad (7)$$

Скорость вращения турбины  $n$  определяется по известным значениям шага турбины  $h$  и скорости потока воды  $v_n$ :

$$n = v_n / h, \text{ об/с.} \quad (8)$$

## Расчет основных параметров синхронного генератора кольцевого типа

Calculation of main parameters for synchronous ring-type alternator

Механическая мощность, передаваемая турбиной на вал генератора,  $P_T$ :

$$P_T = P_n \cdot \eta_T, \text{ Вт,} \quad (9)$$

где  $\eta_T$  – КПД турбины.

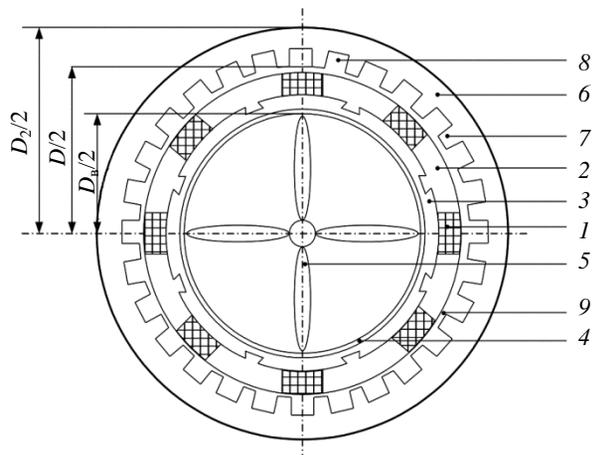
Электрическая мощность, снимаемая с обмотки статора генератора,  $P_n$ :

$$P_n = P_T \cdot \eta_r, \text{ Вт,} \quad (10)$$

где  $\eta_r$  – КПД электрического генератора.

Полная мощность генератора,  $S_r$ :

$$S_r = P_n / \cos\varphi_r, \text{ ВА.} \quad (11)$$



**Рис. 2.** Эскиз поперечного сечения генератора:

1 – магниты; 2 – сердечники полюсов; 3 – немагнитная втулка; 4 – металлический внутренний обод ротора; 5 – лопасть турбины; 6 – спинка магнитопровода статора; 7 – зубец магнитопровода статора; 8 – паз магнитопровода статора (без проводников обмотки); 9 – зазор между статором и ротором,  $\delta_s$

**Fig. 2.** Alternator cross-section: 1 – magnets; 2 – pole cores; 3 – non-magnetic bushing; 4 – internal metal rim of the rotor; 5 – turbine blade; 6 – back of stator magnet core; 7 – tooth of stator magnet core; 8 – groove of stator magnet core (without winding wires); 9 – clearance  $\delta_s$  between stator and rotor

С учетом того, что ЭДС обмотки статора генератора  $E_\delta$  при номинальной нагрузке больше номинального напряжения в  $k_E = E_\delta / U_\phi$  раз [16], расчетная мощность синхронного генератора должна быть увеличена в  $k_E$  раз. Значение  $k_E = 1,05 \div 1,10$ :

$$S_{r,p} = (1,05 \div 1,10) S_r. \quad (12)$$

При расчете электростанции, обмотка статора которой подключена на неуправляемый выпрямитель, величину коэффициента мощности генератора  $\cos\varphi_r$  можно в первом приближении принять равной 0,90, а КПД генератора  $\eta_r$  – равным 0,93.

На начальном этапе расчета синхронного генератора следует выбрать главные размеры генератора: внутренний диаметр расточки статора  $D_1$  и его расчетную длину  $l_\delta$ . Отношение расчетной длины  $l_\delta$  к внутреннему диаметру расточки статора  $D_1$  принято обозначать символом  $\lambda$ , т.е.  $l_\delta / D_1 = \lambda$  [16]. Для электрических машин общепромышленного применения это отношение может лежать в пределах от 0,6 до 1,5, а для синхронных генераторов большой мощности – в пределах от 2,8 до 3,5. Для синхронных генераторов автономных морских электростанций при выборе отношения  $\lambda$  следует учитывать величину мощности морского потока  $P_n$ , который должен проходить через площадь, ометаемую лопастями турбины,  $S_T$ .

С учетом этого отношение  $\lambda = l_\delta / D_1$  генераторов кольцевой конструкции существенно отличается от значений, указанных выше, и лежит в пределах от 0,15 до 0,4. Параметр  $\lambda$  уточняется по результатам предварительного расчета.

На рис. 2 приведен эскиз поперечного сечения генератора кольцевой конструкции с ротором коллекторного типа. В радиальном направлении ротора размещены постоянные магниты.

Введем обозначения:  $h_{н.в}$  – толщина немагнитной втулки;  $h_{в.о.р}$  – толщина внутреннего обода ротора;  $b_m$  – ширина магнита (размер магнита в радиальном направлении ротора).

Из теории электрических машин [16] известно, что основные размеры электрической машины связаны с расчетным значением мощности электрической машины  $S_{r,p}$  соотношением:

$$D_1^2 l_\delta = S_{r,p} \cdot 60 / (n \cdot k \cdot A \cdot B_{\delta_{\max}}), \quad (13)$$

где  $D_1^2 l_\delta$  – объем, ограниченный активной поверхностью расточки статора электрического генератора,  $\text{м}^3$ ;  $S_{r,p}$  – расчетная мощность электрического генератора, ВА;  $A$  – линейная токовая нагрузка электрического генератора, А/м;  $B_{\delta_{\max}}$  – индукция

в зазоре между магнитопроводами статора и ротора, Тл;  $n$  – скорость вращения ротора, об/мин;  $k$  – коэффициент;  $l_\delta$  – длина (толщина набора электротехнической стали) магнитопровода статора генератора, м.

Для машин переменного тока коэффициент  $k = \pi^2 k_{ог} / \sqrt{2}$ .

При значении обмоточного коэффициента  $k_{ог} = 0,92$  коэффициент  $k = 6,43$ .

Значения линейной токовой нагрузки электрического генератора  $A$ , а также значение индукции в зазоре между магнитопроводами статора и ротора  $B_{\delta\max}$  выбираем с учетом рекомендаций, приведенных в методиках по проектированию электрических машин подобного типа, например [17].

Длина магнитопровода статора электрического генератора определяется по формуле:  $l_\delta = \lambda D_1$ .

Величину диаметра расточки магнитопровода статора  $D_1$  определим с помощью формулы (13), введя в нее значение  $l_\delta = \lambda D_1$ :

$$D_1 = \sqrt[3]{S_{г.р} \cdot 60 / (\lambda \cdot n \cdot k \cdot A \cdot B_{\delta\max})}. \quad (14)$$

После расчета диаметра расточки сердечника статора  $D_1$  необходимо провести проверку выполненных расчетов. С этой целью необходимо определить разность значений рассчитанных диаметров  $D_1$  и  $D_r$ . Из рис. 2 можно установить, что разность диаметров  $(D_1 - D_r)$  должна удовлетворять соотношению (15):

$$(D_1 - D_r) \geq 2(\delta_3 + b_m + h_{н.в} + h_{в.о.р}). \quad (15)$$

Величина длины зазора  $\delta_3$  в первом приближении может быть принята равной 1 мм. При малых зазорах повышаются добавочные потери, а также при деформации ротора появляется опасность задевания его об статор. От зазора зависят возможные кратковременные перегрузки синхронной машины по моменту и мощности. На максимальные значения момента и электромагнитной мощности существенное влияние оказывает синхронное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси  $x_d$ . Чем больше зазор, тем меньше индуктивное сопротивление по продольной оси  $x_d$  и, следовательно, большие будут кратности момента и мощности [16].

Величина параметра  $h_{н.в}$  в первом приближении может быть принята равной  $5\delta_3$ . Уточненное значение параметра  $h_{в.о.р}$  определяется при механическом расчете генератора. В первом приближении величина параметра  $h_{в.о.р}$  может быть принята равной также  $5\delta_3$ .

Ширина магнита  $b_m$  (размер магнита в радиальном направлении) выбирается в пределах (0,090–0,120)  $D_1$  [14]. С учетом перечисленных выше рекомендаций разность рассчитанных значений диаметров  $(D_1 - D_r)$  должна быть не менее величины, рассчитанной по формуле (15):

$$(D_1 - D_r) > (22 + 0,22 D_1) \text{ мм.}$$

Точное значение этого размера устанавливается при расчете основных размеров генератора. При проектировании генератора необходимо правильно выбрать значение частоты генерируемого напряжения  $f$ , от величины которой во многом зависят массогабаритные характеристики и энергетические показатели генератора. Частота генерируемого напряжения зависит от скорости вращения  $n$  и числа пар полюсов генератора  $p$ :

$$f = n \cdot p / 60, \text{ Гц.} \quad (16)$$

В [16] показано, что каждой скорости вращения соответствует оптимальное число полюсов, что и определяет оптимальную частоту генерируемого напряжения. Кроме этого при данной скорости вращения с увеличением мощности несколько возрастает оптимальное число полюсов и, следовательно, оптимальная частота. При выборе частоты необходимо также учитывать, что частота влияет не только на размеры генератора, но и на потери в стали и меди.

Рекомендации по выбору числа пар полюсов в первом приближении с учетом мощности и скорости вращения генератора приведены в табл. 1 [16].

Внешний диаметр сердечника статора  $D_2$  больше диаметра  $D_1$  в  $K_d$  раз. Величина  $K_d$  в первом приближении может быть принята равной 1,23–1,33. Точное значение диаметра  $D_2$  определяется по результатам расчета зубцовой зоны и ярма магнитопровода генератора. Активную длину сердечника ротора можно принять равной длине сердечника статора  $L_{с.р} = l_\delta$ , см.

**Таблица 1.** Рекомендации для выбора числа пар полюсов

**Table 1.** Recommendations on pole couple number selection

$S_{г.р}/n_N$ , ВА/об/мин	< 0,4	0,4÷1,5	0,6÷3,4	> 2,6
$p$	1	2	3	4

## Расчет постоянных магнитов и геометрических размеров ротора

Calculation of permanent magnets and rotor geometry

Для магнитной системы ротора целесообразно использовать магниты на основе неодима-железа-бора (Nd-Fe-B), намагниченные тангенциально (рис. 3).

Магниты системы Nd-Fe-B обладают исключительно высокими гистерезисными характеристиками (остаточной индукцией  $B_r$  и коэрцитивной силой  $H_c$ ). Энергетическое произведение  $(BH)_{\max}$  этих магнитов на порядок выше, чем у известных магнитов на основе ферритов бария и стронция.

Основные характеристики магнитов системы Nd-Fe-B, например N35:

- остаточная магнитная индукция  $B_r = 1,17\text{--}1,2$  Тл;
- коэрцитивная сила по току  $H_{cj} = 950$  кА/м.

Для расчета магнитной цепи синхронного генератора с магнитоэлектрическим возбуждением необходимо задаться следующими параметрами [14]:

- коэффициент, учитывающий падение магнитного напряжения в магнитной цепи в долях МДС реакции якоря  $\beta_r = 1,1\text{--}1,5$ ;
- коэффициент рассеяния магнита в режиме холостого хода в первом приближении  $\sigma_0 = 1,2$ ;
- коэффициент приведения МДС реакции якоря по продольной оси к МДС индуктора  $k_{ad} = 0,82\text{--}0,87$ ;
- индукция при холостом ходе в нейтральном сечении магнита  $B_{m0} = (0,8\text{--}0,9)B_r$ ;
- напряженность поля в магните  $H_{m0} = 0,5H_{cj}$ , А.

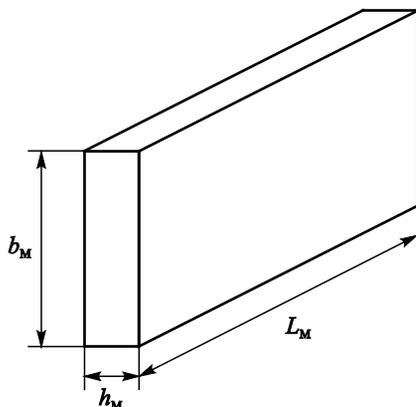


Рис. 3. Эскиз магнита  
 Fig. 3. A sketch of magnet

Высота магнита  $h_m$  определяется по формуле (17):

$$h_m = \frac{0,9 \cdot \pi \cdot a_1 \cdot k_{ad} \cdot k_0 \cdot k_{кз} \cdot D_1 \cdot A}{2p \cdot H_{m0}}, \text{ м}, \quad (17)$$

где  $a_1$  – коэффициент падения магнитного напряжения в рабочем зазоре, в первом приближении принят равным 1,2;  $k_0$  – обмоточный коэффициент, предварительно принят равным 0,92.

Длину магнита в аксиальном направлении приравняем к длине сердечника статора:  $L_m = l_c$ , м.

Объем магнитов:

$$V_m = L_m \cdot 2p \cdot b_m \cdot h_m, \text{ см}^3. \quad (18)$$

Магниты закреплены на немагнитной втулке (рис. 2), закрепленной в свою очередь на внутреннем ободе ротора, внутренний диаметр которого обозначен символом  $D_T$ . К внутренней поверхности этого обода крепятся лопасти турбины.

Наружный диаметр немагнитной втулки, к которой крепятся сердечники полюсов:  $D_{н.в} = D_1 - 2\delta - 2b_m$ , мм. Наружный диаметр ротора  $D = D_1 - 2\delta_3$ , мм.

## Расчет параметров обмотки статора генератора

Calculation of alternator stator winding parameters

При расчете параметров обмотки статора определяется число пазов статора, геометрические размеры, число витков в фазе обмотки и сечение проводников. При этом число витков фазы обмотки статора должно быть таким, чтобы линейная нагрузка генератора и индукция в воздушном зазоре как можно более близко совпадали с их значениями, принятыми предварительно при выборе главных размеров, а число пазов статора обеспечивало достаточно равномерное распределение катушек обмотки.

Номинальный фазный ток генератора:

$$I_{\phi N} = \frac{S_{г.р}}{3 \cdot U_{\phi N}}, \text{ А}. \quad (19)$$

Для расчета количества пазов статора должны быть заданы следующие параметры:

- число пар полюсов  $p$  (определено ранее);
- число пазов на полюс и фазу  $q$ .
- число фаз обмотки статора  $m = 3$ .

Определим общее число зубцов статора:

$$Z_1 = 2pmq. \quad (20)$$

Полусное деление  $\tau$ :

$$\tau = \pi D_1 / (2 \cdot p), \text{ м.} \quad (21)$$

Зубцовое деление статора находится по формуле (22):

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1}, \text{ мм.} \quad (22)$$

Шаг обмотки статора  $y_1 = 0,8\tau_n$  обычно округляется до целого числа.

$\tau_n = Z/2 p$  – число пазов на полюс.

Уточненное значение обмоточного коэффициента  $k_{об}$  определяется как произведение коэффициентов укорочения и распределения обмотки [16]:

$$k_{об} = k_y \cdot k_p. \quad (23)$$

Величину магнитного потока полюса в режиме холостого хода можно определить, воспользовавшись выбранной ранее величиной индукции в воздушном зазоре  $B_{\delta}$ , Тл:

$$\Phi_{\delta 0} = B_{\delta} \cdot l \cdot \tau \cdot a_i, \text{ Вб.} \quad (24)$$

Как указано выше, расчетное значение ЭДС холостого хода с учетом размагничивающего влияния реакции якоря, падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния и активном сопротивлении обмотки статора должно быть принято выше номинального значения напряжения в  $k_E = 1,05-1,10$  раз, т.е.  $E_o = U_{\phi N} \cdot k_E$ , В.

Определим предварительно число последовательно соединенных витков в фазе обмотки статора:

$$W_{\phi}' = \frac{E_o}{4,44 \cdot k_o \cdot f \cdot \Phi_{\delta 0}}. \quad (25)$$

Определим число эффективных проводников в пазу  $u_n$  исходя из того, что ток одной параллельной ветви не должен превышать 50 А. В этом случае число параллельных ветвей  $a = I_{\phi}/50$ . Тогда число эффективных проводников в пазу будет равно

$$u_n = \frac{W_{\phi}' \cdot a}{q \cdot p}. \quad (26)$$

Число эффективных проводников в пазу  $u_n$  целесообразно выбирать целым. Окончательное число витков в фазе:

$$W_{\phi} = \frac{u_n \cdot q \cdot p}{a}. \quad (27)$$

Уточненная величина магнитного потока в режиме холостого хода

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{E_o}{4,44 \cdot k_o \cdot f \cdot W_{\phi}'}, \text{ Вб.}$$

Уточненное значение индукции в воздушном зазоре

$$B_{\delta 0} = B_{\delta} \cdot W_{\phi}' / W_{\phi}, \text{ Тл.} \quad (29)$$

Уточненное значение линейной нагрузки

$$A = \frac{Z \cdot u_n \cdot I_{\phi N}}{\pi \cdot D_1 \cdot a}, \text{ А/м.} \quad (30)$$

При правильно выбранном числе пазов статора разница между выбранной в начале расчета линейной нагрузкой и ее уточненным значением не должна превышать 5 %.

## Расчет параметров зубцовой зоны статора

Calculation of stator tooth zone parameters

Далее необходимо выбрать марку электротехнической стали для магнитопровода статора, толщину листа, например  $\Delta_n = 0,1$  мм, и уточнить коэффициент заполнения пакета сталью  $k_c$  [17]. При выборе размеров пазов в электрических машинах учитываются следующие факторы.

Во-первых, площадь паза должна соответствовать количеству и размерам размещаемых в нем проводников обмотки с учетом всей изоляции.

Во-вторых, значения индукции в зубцах и ярме статора должны находиться в определенных допустимых пределах, зависящих от типа, мощности, исполнения машины и марки электротехнической стали сердечника. Выбираем паз трапецеидальной формы, меньшую ширину паза обозначим  $b_{11}$ , большую ширину –  $b_{12}$ , высоту паза –  $h_n$ . При выбранной форме паза ширина зубцов  $b_z$  постоянная.

Определим требуемую ширину зубца  $b_z$

$$b_z = \frac{B_{\delta 0} \cdot t_1}{B_z \cdot k_c}, \text{ м,} \quad (31)$$

где  $B_z$  – индукция в зубцах статора.

Значение  $B_z$  принимается с учетом магнитных свойств выбранной электротехнической стали для магнитопровода статора. Например, для стали марки 2312 индукция в зубце варьируется в пределах от 1,6 до 1,9 Тл.

Ширина зубца исходя из технологических ограничений должна быть не менее 2 мм.

Высота ярма статора:

$$h_a = \frac{\Phi_{\delta 0}}{2 \cdot B_a \cdot l_{\delta} \cdot k_c}, \text{ м}, \quad (32)$$

где  $B_a$  – индукция в ярме статора.

Для стали марки 2312 можно принять  $B_a = 1,5$  Тл.

Высоту паза можно определить исходя из требуемого значения площади паза  $S_{\text{п}}$ :

$$S_{\text{п}} = S_{\text{м.п}} / k_{3,\text{п}}, \quad (33)$$

где  $S_{\text{м.п}}$  – суммарное сечение проводников в пазу;  $k_{3,\text{п}}$  – коэффициент заполнения паза, в первом приближении может быть принят равным 0,5.

$$S_{\text{м.п}} = u_{\text{п}} \cdot q_{\text{эф}}, \quad (34)$$

где  $q_{\text{эф}}$  – сечение эффективного проводника.

Площадь паза в первом приближении можно определить как произведение ширины паза на высоту паза:

$$S_{\text{п}} = b_{\text{п.ср}} \cdot h_{\text{п}}, \quad (35)$$

$$b_{\text{п.ср}} = (b_{11} + b_{12})/2.$$

После несложных преобразований можно получить формулу для расчета площади паза:

$$S_{\text{п}} = \left( t_1 + \frac{h_{\text{п}}}{Z} - b_z \right) \cdot h_{\text{п}}, \text{ м}^2. \quad (36)$$

Приравняв формулы (33) и (36), получим уравнение второго порядка. Решив его, получим формулу для расчета высоты паза:

$$h_{\text{п}} = \frac{t_1 - b_z}{2} \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot Z \cdot u_{\text{п}} \cdot q_{\text{эф}}}{k_{3,\text{м}} (t_1 - b_z)^2}} \right], \text{ м}. \quad (37)$$

После определения параметров  $h_{\text{п}}$  и  $h_a$  можно определить наружный диаметр сердечника статора:

$$D_2 = D_1 + 2(h_{\text{п}} + h_a). \quad (38)$$

Для определения плотности тока в обмотке в первом приближении можно воспользоваться характеристикой тепловой нагрузки обмотки  $A_j$ , определяемой как произведение линейной нагрузки  $A$  на плотность тока в обмотке  $j$ . Среднее значение параметра  $A_j$  зависит от условий охлаждения генератора и класса нагревостойкости изоляции обмотки.

После определения параметра  $A_j$  нужно рассчитать допустимое значение плотности тока  $j$ :

$$j = \frac{A_j}{A}. \quad (39)$$

Сечение провода обмотки  $q = I_{\phi} / j$ . Далее следует выбрать марку обмоточного провода с принятым выше классом нагревостойкости изоляции и требуемым сечением. После этого нужно провести расчет уточненного значения коэффициента заполнения паза медью.

## Расчет активного и индуктивного сопротивлений обмотки статора

Calculation of active and inductive resistance for stator winding

Длина лобовой части обмотки:  $l_{\text{л}} = 1,4\tau$ , м. Средняя длина витка:  $l_{\text{ср}} = 2(l_{\text{л}} + l_{\delta})$ , м.

Активное сопротивление фазы обмотки статора:

$$R_{\phi} = \rho \cdot k_{\text{T}} \left( \frac{l_{\text{ср}} W_{\phi}}{q} \right), \text{ Ом}, \quad (40)$$

где  $\rho = 0,0175$  Ом · мм<sup>2</sup>/м – удельное сопротивление меди;  $k_{\text{T}} = 1,2$  – температурный коэффициент.

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора

$$x_{\sigma} = \left( \frac{4\pi l_i f W_{\phi}^2}{10^7 \rho q} \right) (\lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{д}} + \lambda_{\text{л}}), \quad (41)$$

где  $\lambda_{\text{п}}$ ,  $\lambda_{\text{д}}$  и  $\lambda_{\text{л}}$  – удельные проводимости пазового, дифференциального и лобового рассеяния.

Расчет этих параметров производится по расчетным соотношениям, которые приведены в [16–17].

## Расчет массы, потерь и КПД генератора

Calculation of alternator weight, losses and efficiency

При работе синхронного генератора часть подводимой мощности расходуется на нагрев проводников, перемагничивание сердечника, трение в подшипниках и т.д. Эту часть мощности называют потерями.

Потери в синхронных машинах подразделяются на потери в стали (основные и добавочные),

электрические потери, вентиляционные, механические и добавочные потери при нагрузке. При оценке массогабаритных параметров синхронной машины и для расчета потерь надо произвести расчет массы активных материалов и самой машины. Активными материалами проектируемой машины являются: спинка статора, зубцы статора, медная обмотка статора, постоянные магниты, сердечники полюсов ротора.

Масса зубцов статора:

$$m_z = \rho \cdot l_\delta \cdot h_n \cdot b_z \cdot Z, \text{ кг}, \quad (42)$$

Масса ярма магнитопровода статора:

$$m_{a1} = \rho \cdot l_\delta \cdot \pi \cdot (D_2 - h_a) \cdot h_a, \text{ кг}, \quad (43)$$

где  $\rho_c$  – удельная плотность стали, равная 7800 кг/м<sup>3</sup>.

Масса меди обмотки статора:

$$m_m = \rho_m \cdot q_{\text{эф}} \cdot u_n \cdot Z \cdot \frac{l_{\text{ср}}}{2}, \text{ кг}, \quad (44)$$

где  $\rho_m$  – удельная плотность меди, равная 8900 кг/м<sup>3</sup>.

Масса магнитов ротора:

$$m_{\text{маг}} = \rho_{\text{маг}} \cdot V_{\text{маг}}, \text{ кг}, \quad (45)$$

где  $\rho_{\text{маг}}$  – удельная плотность магнитов Nd-Fe-B, равная 8400 кг/м<sup>3</sup>.

Масса полюсов:

$$m_{\text{п}} = 0,25 \cdot \pi [D^2 - (D - h_n)^2] \cdot l_\delta \cdot \rho - m_{\text{маг}}, \text{ кг}. \quad (46)$$

Масса немагнитной втулки:

$$m_{\text{н.в}} = 0,25 \cdot \pi [(D - h_n)^2 - (D_{\text{в.о.р}} + h_{\text{в.о.р}})^2] \cdot l_\delta \cdot \rho_{\text{вт}}, \quad (47)$$

где  $\rho_{\text{вт}}$  – удельная плотность материала немагнитной втулки.

Масса металлического внутреннего обода ротора:

$$m_{\text{в.о.р}} = 0,25 \cdot \pi ((D_{\text{в}} + h_{\text{в.о.р}})^2 - D_{\text{в}}^2) \cdot l_\delta \cdot \rho_c. \quad (48)$$

Таким образом, полная масса активных материалов составляет:

$$m_{\text{акт}} = m_z + m_{a1} + m_m + m_{\text{маг}}.$$

Полная масса генератора:

$$m_{\text{г}} = m_{\text{акт}} + m_{\text{п}} + m_{\text{н.в}} + m_{\text{в.о.р}}, \text{ кг}. \quad (49)$$

Удельный показатель генератора по массе:

$$M_{\text{г.уд}} = m_{\text{г}}/P_{\text{г}}, \text{ кг/кВт}. \quad (50)$$

Потери и КПД генератора определяют для номинального режима его работы.

Электрические потери в обмотке статора:

$$P_m = m I_\phi^2 R_a. \quad (51)$$

Потери в стали спинки магнитопровода статора:

$$P_a = \rho_0 \cdot k_{\text{та}} \cdot B_a^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{0,33} \cdot m_{a1}, \text{ Вт}, \quad (52)$$

где  $k_{\text{та}} = 1,5$  – технологический коэффициент для спинки статора, учитывающий увеличение потерь.

Потери в зубцах магнитопровода статора:

$$P_z = \rho_0 \cdot k_{\text{тз}} \cdot B_z^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{0,33} \cdot m_z, \text{ Вт}, \quad (53)$$

где  $\rho_0 = 1,6$  Вт/кг – удельные потери в стали при 50 Гц;  $k_{\text{тз}} = 2$  – технологический коэффициент для зубца магнитопровода статора, учитывающий увеличение потерь.

Суммарные потери в стали:

$$P_{\text{ст}} = P_a + P_z. \quad (54)$$

Механические потери:

$$P_{\text{мех}} = 0,02 \cdot P \cdot \cos\varphi, \text{ Вт}. \quad (55)$$

Добавочные потери, обусловленные высшими гармониками магнитного поля, вихревыми токами:

$$P_d = 0,01 \cdot P \cdot \cos\varphi, \text{ Вт}. \quad (56)$$

Суммарные потери генератора:

$$\sum P_{\text{п}} = P_m + P_a + P_z + P_{\text{мех}} + P_d, \text{ Вт}. \quad (57)$$

Коэффициент полезного действия генератора:

$$\eta = \frac{P_{\text{нг}}}{P_{\text{нг}} + \sum P_{\text{п}}}.$$

## Заключение

### Conclusion

Разработаны основы методики расчета основных параметров синхронного генератора кольцевой конструкции с магнитоэлектрическим возбуждением, предназначенного для преобразования кинетической энергии морского течения в электрическую энергию и передачи ее на подводную доко-

вую станцию для заряда аккумуляторных батарей. Указанная система энергообеспечения подводной доковой станции защищена патентом Российской Федерации.

Результаты работы расширяют возможности выбора оптимального варианта системы энергообеспечения подводных доковых станций и способствуют ускорению процесса внедрения их на практике.

Полученные результаты также могут быть использованы при разработке свободно-поточных мобильных гидротурбинных электростанций для снабжения электроэнергией тех областей России, которые до сих пор не подключены к центральным электроэнергетическим системам.

## Список использованной литературы

1. *Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В.* К вопросу энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Вып. 3(401). С. 103–115. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-103-115.
2. Аспекты применения гетерогенных групп робототехнических комплексов повышенной автономности, в том числе из состава обсерваторий, с целью получения океанографических данных и их дальнейшего использования для освоения Арктической зоны / *С.Б. Волошин, Ф.О. Драгомощенко, В.Ю. Занин, А.М. Маевский* // Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на освоение и развитие Арктики и континентального шельфа, 2020. Москва : Технологии развития, 2020. С. 62–75.
3. *Бочаров А.Ю.* Современные тенденции в развитии миниатюрных подводных аппаратов и роботов за рубежом // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 36–52.
4. *Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В.* Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов // Известия Томского политехнического ун-та. 2004. Т. 307. № 5. С. 120–123.
5. Система энергообеспечения подводного аппарата : пат. 2750396 Рос. Федерация / *А.А. Мартынов*. № 2020144021; заявл. 28.12.2020; опубл. 28.06.2021, Бюл. № 19. 14 с.
6. *Мартынов А.А.* Энергообеспечение подводных аппаратов // Завалишинские чтения'21 : XVI Междунар. конференция по электромеханике и робототехнике. Санкт-Петербург : ГУАП, 2021. С. 252–260. DOI: 10.31799/978-5-8088-2021-16-252-260.
7. *Ким Л.В., Шмаков А.С., Дмитриев С.С.* Некоторые конструктивные решения создания донных причальных устройств для подводных аппаратов // Технические проблемы освоения Мирового океана. 2019. № 8. С. 180–185.
8. *Мартынов А.А., Самсыгин В.К.* Устройства для заряда и разряда аккумуляторных батарей источников бесперебойного питания // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2020. Вып. 1(391). С. 151–158. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-151-158.
9. Разработка и создание источников бесперебойного питания систем энергообеспечения морского исполнения / *Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В.* [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Вып. 2(388). С. 101–111. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-388-101-111.
10. Исследование устройства для беспроводной передачи электрической энергии на необитаемый подводный аппарат / *Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В.* [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 2(380). С. 92–100. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-2-380-92-100.
11. *Drew B., Plummer A.R., Sahinkaya M.N.* A review of wave energy converter technology // Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy. Vol. 223(8). P. 887–902. DOI: 10.1243/09576509JPE782.
12. Устройство для обслуживания и ремонта подводно-кабельных магистралей связи : пат. 2389638 Рос. Федерация / *А.А. Катанович, С.А. Лобов, С.И. Беда*. № 200609420/11; заявл. 24.03.2006; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 14, с. 7.
13. Способ энергообеспечения подводного аппарата и устройство для его реализации: пат. 2724197 Рос. Федерация / *А.А. Мартынов, В.К. Самсыгин, Д.В. Соколов*. № 2019145189; заявл. 25.12.2019; опубл. 22.06.2020, Бюл. № 18. 14 с.
14. Неисчерпаемая энергия : учебник. Кн. 1. Ветро-электрогенераторы / *В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев*. Харьков : Нац. аэрокосм. ин-т «Харьковский авиастр. ин-т», 2003. 400 с.
15. *Фарбер Ф.Е.* Физика : учеб. пособие. Москва : Высшая школа, 1979. 320 с.
16. *Вольдек А.И.* Электрические машины. Ленинград : Энергия. 1974. 840 с.
17. *Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф.* Электрические генераторы с постоянными магнитами. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. 280 с.

## References

1. *Martynov A.A., Samsygin V.K., Sokolov D.V.* On the issue of energy supply of resident underwater robots

- and robotic complexes. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 3(401): 103–115 (*in Russian*).
2. Application aspects of heterogeneous highly autonomous robotic systems, including parts of observatory complexes, for obtaining oceanographic data and their further use for development of the Arctic zone / *S.B. Voloshin, F.O. Dragomoshchenko, V.Yu. Zanin, A.M. Maevsky* // Collection of papers by winners of the International competition of research, technical and innovative developments for the Arctic and Continental Shelf, 2020. Moscow : Tekhnologii razvitiya, 2020. P. 62–75 (*in Russian*).
  3. *Bocharov A.Yu.* Modern trends in development of mini submersibles and robots abroad // Underwater investigations and robot engineering. 2006. Vol. 2. P. 36–52 (*in Russian*).
  4. *Rulevsky V.M., Dementiev Yu.N., Bubnov O.V.* Electric power systems of remotely operated vehicles // News of Tomsk Polytechnic University. 2004. Vol. 307, No. 5. P. 120–123 (*in Russian*).
  5. System of power supply in underwater vehicle : Pat. 2750396 of Russian Federation / *A.A. Martynov*. No. 202014402; appl. 28.12.2020; publ. 28.06.2021. Bulletin No. 19. 14 p. (*in Russian*).
  6. *Martynov A.A.* Power supply of underwater vehicles // Zavalishin's Readings'21 : XVI International Conference on Electromechanics and Robot Engineering. St. Petersburg : GUAP, 2021. P. 252–260. DOI 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-252-260 (*in Russian*).
  7. *Kim L.V., Shmakov A.S., Dmitriev S.S.* Some engineering solutions for seabed mooring facilities for underwater vehicles // Technical problems in development of the World Ocean. 2019. Vol. 8. P. 180–185 (*in Russian*).
  8. *Martynov A.A., Samsygin V.K.* Dischargers for UPS batteries. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; 1(391): 151–158. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-151-158 (*in Russian*).
  9. Design and development of UPS for marine power systemz / *A.A. Martynov, V.K. Samsygin, D.V. Sokolov* [et al.] // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019. Vol. 2(388). P. 101–111. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-388-101-111 (*in Russian*).
  10. Wireless charger for the underwater unmanned vehicle / *A.A. Martynov, V.K. Samsygin, D.V. Sokolov* [et al.] // Transactions of the Krylov State Research Centre 2017. Vol. 2(380). P. 92–100. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-2-380-92-100 (*in Russian*).
  11. *Drew B., Plummer A.R., Sahinkaya M.N.* A review of wave energy converter technology // Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy. Vol. 223(8). P. 887–902. DOI: 10.1243/09576509JPE782.
  12. Device for maintenance and repair of subsea communication cables : Pat. 2389638 of Russian Federation / *A.A. Katanovich, S.A. Lobov, S.I. Beda*. No. 200609420/11; appl. 24.03.2006; publ. 20.05.2010. Bulletin No. 14. 7 p. (*in Russian*).
  13. Method of power supply in underwater vehicle and device for its implementation : Pat. 2724197 of Russian Federation / *A.A. Martynov, V.K. Samsygin, D.V. Sokolov*. No. 2019145189; appl. 25.12.2019; publ. 22.06.2020. Bulletin No. 18. 14 p. (*in Russian*).
  14. Inexhaustible energy : manual. Book 1. Wind-driven generators / *V.S. Krivtsov, A.M. Oleynikov, A.I. Yakovlev*. Kharkov : National Aerospace University „Kharkov Aviation Institute“, 2003. 400 p. (*in Russian*).
  15. *Farber F.E.* Physics : student's guide. Moscow : Vysshaya Shkola, 1979. 320 p. (*in Russian*).
  16. *Voldek A.I.* Electric machines. Leningrad : Energiya, 1974, 840 p. (*in Russian*).
  17. *Balagurov V.V., Galteev F.F.* Permanent-magnet alternators. Moscow : Energoatomizdat, 1988. 280 p. (*in Russian*).
- 
- Сведения об авторах**  
*Мартынов Александр Александрович*, к.т.н., доцент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного 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>.  
*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: setnil123@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3117-9042>.  
*Соколов Дмитрий Владимирович*, ведущий инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Тел.: +7 (812) 748-52-48. E-mail: setnil123@yandex.ru.
- 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>.

*Vadim K. Samsygin*, Head of Laboratory, TSNI 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: setnil123@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3117-9042>.

*Dmitry V. Sokolov*, Lead Engineer, TSNI 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: setnil123@yandex.ru.

Поступила / Received: 29.12.22

Принята в печать / Accepted: 02.06.23

© Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В., 2023