

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-229-237

METHODS OF CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN SHIPBOARD ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH TOTAL ELECTRIC POWER DISTRIBUTION ON DIRECT CURRENT

A. V. Grigoryev^{1, 2}, A. Yu. Vasilyev², R. R. Zaynullin²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — JSC “RPC “Ship electric propulsion”, St. Petersburg, Russian Federation

The methods of calculation of short-circuit currents in shipboard electric power systems with electric power distribution on direct current and with valve generators are considered. Unlike systems with a single type of current, in the systems under consideration, the generation and consumption of electric power occurs on alternating current, and the distribution occurs on a direct current. The actual standards for the calculation of short-circuit currents can not be used in such systems for a number of reasons. In particular, they do not consider separate sources of energizing of the short-circuit point and the operating modes of valve generator sets with variable rotation speed. AC electric machines receiving power supply from the DC grid through inverters carry out energizing of the short-circuit point in the DC network, what is due to the presence of reverse diodes. The capacitors banks in DC link are an additional source of energizing of short-circuit point. With a small resistance of the sections of the circuit through which the discharge currents of capacitors flow, the values of the discharge currents can reach hundreds of kiloamperes. Short-circuit currents cause a strong electrodynamic effect on the bus bars and can lead to serious damage to the switchboards with the occurrence of a fire. Due to this, it is necessary to develop methods for calculating of short-circuit currents in such systems. Methods for determining the maximum value of the shock current in the short-circuit point of the electric power system with the distribution of electric power on direct current are proposed in the article. Increasing the accuracy of calculations of short-circuit currents will increase the reliability and safety of shipboard electric power systems with electric power distribution on direct current.

Keywords: short circuit, electric current, electric power systems, valve generators, semiconductor converters, electric propulsion plants, rectifiers, inverters, capacitors, accumulator batteries.

For citation:

Grigoryev, Andrey V., Aleksey Yu. Vasilyev, and Ruslan R. Zaynullin. “Methods of calculation of short-circuit currents in shipboard electric power systems with total electric power distribution on direct current.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 229–237. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-229-237.

УДК 621.315:621.3.025

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ПОЛНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

А. В. Григорьев^{1, 2}, А. Ю. Васильев², Р. Р. Зайнуллин²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрена методика расчетов токов короткого замыкания в судовых электро-энергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе и вентильными ге-

нераторами. В отличие от систем с одним родом тока, в рассматриваемых системах генерирование и потребление электроэнергии происходит на переменном токе, а распределение — на постоянном. Действующие стандарты для расчетов токов короткого замыкания в данных системах не могут быть использованы по ряду причин. В частности, в них не рассматриваются отдельные источники подпитки точки короткого замыкания и режимы работы вентильных генераторных агрегатов с переменной частотой вращения. Электрические машины переменного тока, получающие питание от сети постоянного тока через инверторы, осуществляют подпитку точки короткого замыкания в сети постоянного тока, что связано с наличием обратных диодов. Конденсаторные батареи звена постоянного тока являются дополнительным источником подпитки места короткого замыкания. При малом сопротивлении участков цепи, по которым протекают токи разряда конденсаторов, значения токов разряда могут достигать сотен килоампер. Токи короткого замыкания оказывают сильное электродинамическое воздействие на токопроводы и могут привести к серьезным повреждениям распределительных щитов с возникновением пожара. В связи с этим необходимо разработать методику расчета токов короткого замыкания в данных системах. В статье предложен способ определения наибольшего значения ударного тока в точке короткого замыкания электроэнергетической системы с распределением электроэнергии на постоянном токе. Повышение точности расчетов токов короткого замыкания позволит повысить надежность и безопасность судовых электроэнергетических систем с распределением электроэнергии на постоянном токе.

Ключевые слова: короткое замыкание, электрический ток, электроэнергетические системы, вентильные генераторы, полупроводниковые преобразователи, гребные электрические установки, выпрямители, инверторы, конденсаторы, аккумуляторные батареи.

Для цитирования:

Григорьев А. В. Методика расчетов токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с полным распределением электроэнергии на постоянном токе / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 229–237. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-229-237.

Введение (Introduction)

В настоящее время в мировом судостроении вводятся в эксплуатацию суда с единой электроэнергетической системой (ЕЭЭС), вентильными генераторами и распределением электроэнергии на постоянном токе. Данные системы получили название *Onboard DC Grid*. В России примером судов, где применяется принцип *Onboard DC Grid*, является ледокольный буксир «Юрибей» проекта «Т40105» постройки ООО «Краншип» (г. Темрюк, Краснодарский край), и портовый ледокол *Aker ARC124* ФГУП «Атомфлот» (Выборгский судостроительный завод).

ЕЭЭС данных судов включает в себя главные вентильные дизель-генераторы, работающие через тиристорные выпрямители на главном распределительном щите (ГРЩ) постоянного тока. Гребные электродвигатели (ГЭД) получают питание от автономных инверторов. В качестве генераторов в ЕЭЭС данного типа применяются трехфазные синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением. На судах зарубежной постройки небольшого водоизмещения находят применение синхронные генераторы на постоянных магнитах.

Расчет токов короткого замыкания (КЗ) с целью выбора защитно-коммутационной аппаратуры и проверки динамической устойчивости сборных шин ГРЩ производится на стадии технического проектирования. При разработке технических проектов ЕЭЭС необходимо производить расчет токов КЗ с использованием нормативных документов. На сегодняшний день отсутствует методика расчета токов КЗ в ЕЭЭС с распределением электроэнергии на постоянном токе.

Методы и материалы (Methods and Materials)

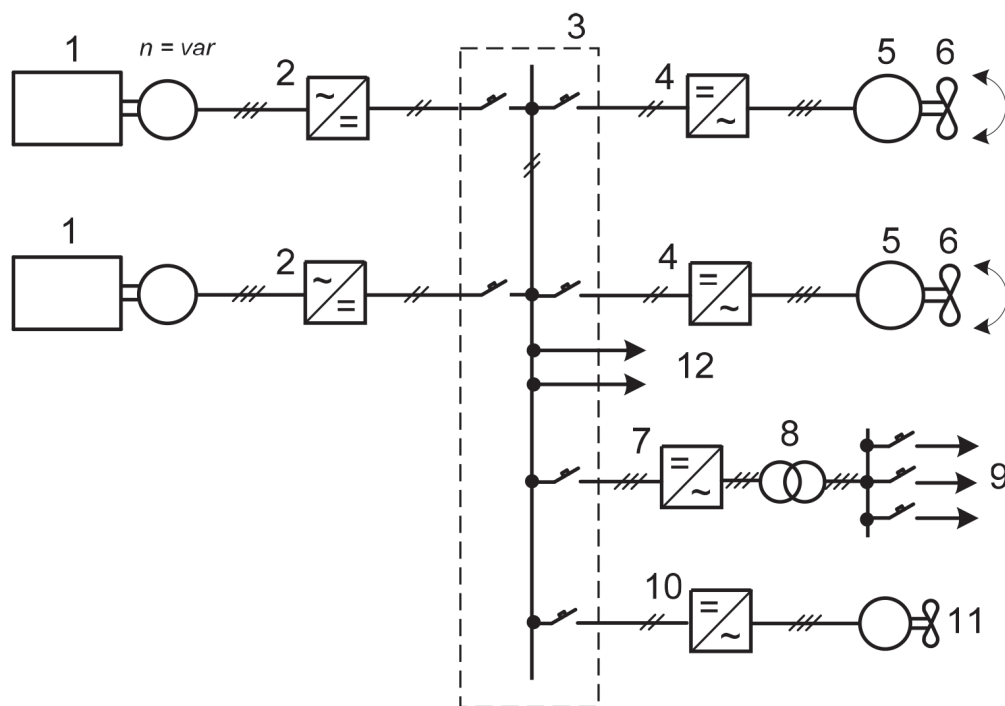
В настоящее время действуют следующие правила и стандарты, используемые при расчетах токов КЗ в судовых электрических сетях [1] – [3]:

- Правила классификации и постройки морских судов;
- ОСТ 5Р.6181-81. Стандарт отрасли «Судовые электроэнергетические системы. Метод расчета переходных процессов»;

– ОСТ 6126-77. Стандарт отрасли «Судовые электроэнергетические системы постоянного тока. Метод расчета токов короткого замыкания».

Данные стандарты предназначены для расчета токов КЗ в ЭЭС одного рода тока: переменного или постоянного. В случае рассмотрения систем с распределением на постоянном токе с одновременным генерированием и потреблением электроэнергии на переменном токе появляются технические сложности расчета токов КЗ, требующие отдельного рассмотрения.

Структурная схема ЕЭЭС с системой электродвижения (СЭД) и распределением электроэнергии на постоянном токе приведена на рисунке.



Структурная схема ЕЭЭС с полным распределением вырабатываемой электроэнергии на постоянном токе и СЭД с прямой передачей вращающего момента на винт:

1 — дизель-генераторы; 2 — полупроводниковые выпрямители; 3 — ГРЩ постоянного тока;

4 — полупроводниковые инверторы гребной электрической установки;

5 — гребной электродвигатель; 6 — гребной винт;

7 — полупроводниковый инвертор общесудовых приемников; 8 — силовой понижающий трансформатор;

9 — общесудовые приемники электроэнергии переменного тока;

10 — полупроводниковый инвертор подруливающего устройства; 11 — подруливающее устройство;

12 — общесудовые приемники электроэнергии постоянного тока

Трехфазные генераторные агрегаты (ГА) переменного тока вырабатывают электроэнергию, которая через выпрямители поступает на шины ГРЩ. Вентильные ГА могут работать с переменной частотой в зависимости от нагрузки, за счет чего достигается существенная экономия топлива [4], [5]. От ГРЩ электроэнергия постоянного тока посредством автономных инверторов напряжения преобразуется в переменный ток, питая гребной электропривод и общесудовые приемники электроэнергии. При наличии потребителей постоянного тока, их питание осуществляется непосредственно от ГРЩ постоянного тока.

Наибольшее значение тока КЗ в данной системе будет наблюдаться при возникновении замыкания на сборных шинах ГРЩ постоянного тока [6]. В этом случае в подпитке точки КЗ будут участвовать следующие источники электроэнергии:

– генераторные агрегаты;

– гребные электродвигатели, получающие питание от щита постоянного тока через инверторы;

- электродвигатели переменного тока, получающие питание от щита постоянного тока через инверторы;
- электродвигатели переменного тока, получающие питание от щита переменного тока;
- электродвигатели постоянного тока, получающие питание от щита постоянного тока;
- конденсаторы, установленные в сети постоянного тока;
- аккумуляторные батареи.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Источники подпитки точки КЗ отличаются по принципу действия, конструкции, техническим характеристикам, имеют разное активное, индуктивное сопротивление и постоянные времени [7] – [9]. Время нарастания ударного тока КЗ от электрических машин, конденсаторов и аккумуляторных батарей различно. Конденсаторные батареи при отсутствии индуктивности в цепи разряда выдают максимальный ток разряда (принимаемый за ударный ток от разряда конденсаторных батарей) в момент времени, близкий к нулю ($t = 0$). При наличии индуктивности момент наступления максимального ударного тока смещается вправо по шкале времени. Ток разряда аккумуляторных батарей зависит только от внутреннего сопротивления и сопротивления цепи разряда. Наибольшее значение достигается также в момент времени, близкий к нулю ($t = 0$). Электрические машины, представленные генераторами и электродвигателями, генерируют ударный ток в момент времени t , отличный от нуля. Значение времени t в данном случае напрямую зависит от частоты генератора f , где $t = 1/2f$, т. е. для частоты 50 Гц значение времени $t = 0,01$ с.

В рассматриваемой схеме распределения электроэнергии на постоянном токе частота работы генератора может отличаться от 50 Гц. ГЭД и электродвигатели подруливающих устройств в момент наступления КЗ могут работать с произвольной частотой, определяемой законом управления частотного привода. Эквивалентные асинхронные электродвигатели работают на номинальной частоте (50 или 60 Гц). При определении наибольшего значения ударного тока в точке КЗ необходимо найти наибольшую сумму токов от источников подпитки точки КЗ в определенный момент времени.

Наиболее значимую по величине составляющую тока КЗ генерируют вентильные главные дизель-генераторы (ГДГ). В ЭЭС с полным распределением электроэнергии на постоянном токе каждый вентильный генератор подключен к своему выпрямителю. При КЗ трехфазного мостового выпрямителя, питающегося непосредственно от синхронного генератора, расчет тока КЗ на выводах выпрямителя выполняется как для случая симметричного КЗ на выводах генератора с учетом активных и реактивных сопротивлений кабельной линии генератор – выпрямитель.

В данном случае ударный ток КЗ будет определяться в соответствии с ОСТ 5Р.6181-81 по формуле [10] – [12]:

$$i_{уд} = \sqrt{2}(I_t - I_0'' \cdot \gamma_a) \cdot I_6, \quad (1)$$

где γ_a — коэффициент апериодической составляющей; I_6 — базисный ток; I_t — периодическая составляющая тока КЗ; I_0'' — начальное значение сверхпереходного тока.

Необходимо принимать во внимание, что вентильный генератор может работать на различных частотах, а значит, и ток КЗ будет иметь различные значения. Следовательно, вычисления токов КЗ необходимо проводить при минимальных и максимальных рабочих частотах ГДГ. В настоящее время наблюдается использование в ГДГ синхронных генераторов на постоянных магнитах. В действующих стандартах методы расчета токов КЗ для данного типа генераторов не приводятся.

Другим источником подпитки места КЗ являются ГЭД. В действующих правилах РС отмечается, что *электродвигатели, получающие питание от полупроводниковых преобразователей, не создают тока подпитки* [1]. Это утверждение справедливо для преобразователей, имеющих

в своем составе неуправляемые выпрямители. Автономные инверторы в связи с наличием обратных диодов могут при возникновении КЗ проводить электрический ток в обратном направлении. В связи с этим ГЭД также становятся источником подпитки точки КЗ. Становится возможным протекание тока подпитки точки КЗ от электрических двигателей через преобразователи.

В качестве ГЭД используют синхронные и асинхронные машины [13], [14]. В случае синхронного ГЭД расчет тока КЗ следует производить аналогично расчету токов КЗ от синхронных генераторов по формуле (1). В случае асинхронного ГЭД ударный ток КЗ будет определяться в соответствии с ОСТ 5Р.6181-81 по формуле

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot \left(I_{ид} + \frac{U_c}{Z'_{р.д}} \cdot \gamma_a \right) \cdot I_{д.ном}, \quad (2)$$

где γ_a — коэффициент апериодической составляющей; $I_{ид}$ — периодическая составляющая тока КЗ (действующее значение) для момента времени t ; U_c — напряжение на фидере двигателя до КЗ; $I_{д.ном}$ — номинальный ток двигателя; $Z'_{р.д}$ — полное расчетное сопротивление двигателя.

Третьим важным источником подпитки точки КЗ являются конденсаторы звена постоянного тока, расположенные как на входе полупроводниковых инверторов напряжения, питающих ГЭД, так и на выходе выпрямителей. Конденсаторы могут быть представлены отдельной конденсаторной батареей, подключенной непосредственно к шинам ГРЩ постоянного тока. Ёмкости конденсаторов, устанавливаемых на входах инверторов и входящих в состав автономных инверторов, значительны и достигают величины 10 мФ на 1 МВт мощности инвертора. При малом сопротивлении участков цепи, по которым протекают токи разряда конденсаторов, значения токов разряда могут достигать сотен килоампер. Ток разряда конденсатора пропорционален напряжению на конденсаторе, а его изменение во времени подобно изменению напряжения.

В начальный момент разряда напряжение на конденсаторе наибольшее, разрядный ток максимальный и разряд происходит быстро. При понижении напряжения ток разряда снижается, и процесс перехода зарядов с одной обкладки на другую замедляется. Время процесса разряда конденсатора зависит от сопротивления цепи и емкости конденсатора, причем возрастание как сопротивления, так и емкости увеличивает продолжительность разряда. С увеличением сопротивления разрядный ток снижается, замедляется процесс переноски зарядов с одной обкладки на другую. С увеличением емкости конденсатора заряд на обкладках повышается.

Мгновенное значение напряжения конденсатора в произвольный момент времени разряда конденсатора определяется формулой

$$U_t = U_0 e^{-\frac{t}{T}}, \quad (3)$$

мгновенная величина разрядного тока

$$i_t = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (4)$$

где U_t — напряжение между обкладками конденсатора через t с после начала разряда, В; i_t — ток в цепи разряда конденсатора через t с после начала разряда, А; U_0 — напряжение источника, от которого производится заряд конденсатора, В; R — сопротивление цепи разряда, Ом; T — постоянная времени в секундах ($T = RC$); $e = 2,718$.

Расчеты токов подпитки точки КЗ от электродвигателей переменного тока, получающие питание от щита переменного тока и электродвигателей постоянного тока, получающих питание от щита постоянного тока и аккумуляторных батарей, изложены в ОСТ 5Р.6181-81 и ОСТ 6126-77. После расчета тока подпитки точек КЗ от источников необходимо определить результирующий ток КЗ в каждой из выбранных точек.

При определении наибольшего значения ударного тока в точке КЗ необходимо найти наибольшую сумму токов от источников подпитки точки в произвольный момент времени. Для опре-

деления максимального значения ударного тока КЗ источники подпитки необходимо разбить на две группы:

- источники, которые выдают максимальный ударный ток в момент времени, близкий к $t = 0$ с;
- источники, которые выдают максимальный ударный ток в момент времени, отличный от $t = 0$ с.

К первой группе источников можно отнести конденсаторные и аккумуляторные батареи, ко второй — все генераторы и электрические двигатели.

Ударный ток от конденсаторных и аккумуляторных батарей в момент времени, близкий к нулю ($t_0 = 0$ с), составит сумму токов от всех батарей в точке КЗ:

$$I_{\text{уд. б}t_0} = I_{c_1} + I_{c_2} + \dots + I_{c_n} + I_{\text{ак}} \quad (5)$$

Повторно проводится суммарный расчет ударного тока от конденсаторных и аккумуляторных батарей в момент времени $t_1 = 1/2f$

$$I_{\text{уд. б}t_1} = I_{c_1t_1} + I_{c_2t_1} + \dots + I_{c_nt_1} + I_{\text{ак}t_1}, \quad (6)$$

где $t_1 = 1/2f$, f — частота напряжения генератора, Гц.

Производится суммарный расчет ударного тока от генераторов и электрических двигателей в момент времени $t = 1/2f$, который составит сумму токов от всех электрических машин в точке КЗ:

$$I_{\text{удэм}t_1} = I_{г_1} + I_{г_2} + \dots + I_{г_n} + I_{д_1} + I_{д_2} + \dots + I_{д_n}, \quad (7)$$

где $t_1 = 1/2f$ (f — частота напряжения, Гц).

Производится сложение суммарного ударного тока от конденсаторных и аккумуляторных батарей, рассчитанного по формуле (7), и от генераторов и электрических двигателей в момент времени $t = 1/2f$, рассчитанного по формуле (8):

$$I_{\text{уд}t_1} = I_{\text{уд. б}t_1} + I_{\text{удэм}t_1}. \quad (8)$$

Из полученных значений ударного тока КЗ от конденсаторных и аккумуляторных батарей в момент времени, близкий к нулю, $I_{\text{уд. б}t_0}$, рассчитанных по формуле (5), и суммарного ударного тока от конденсаторных и аккумуляторных батарей и от генераторов и электрических двигателей в момент времени $t = 1/2f$, $I_{\text{уд}t_1}$, рассчитанного по формуле (8), выбирается наибольшее значение. По наибольшему значению расчетного тока КЗ производится проверка защитно-коммутационного оборудования и шинопроводов на электродинамическую стойкость.

Выводы (Conclusions)

1. В настоящее время в судостроении начинают применяться ЕЭЭС с распределением электроэнергии на постоянном токе с вентильными генераторами и системой электродвижения. При проектировании данных систем необходимо произвести расчет ударных токов КЗ для выбора защитно-коммутационной аппаратуры и проверки динамической стойкости оборудования.

2. Расчет токов КЗ в ЕЭЭС с СЭД и распределением электроэнергии на постоянном токе имеет ряд особенностей, что связано с переменной частотой вращения вентильных ГДГ, наличием обратимых полупроводниковых преобразователей и накопителей электроэнергии, установленных в звене постоянного тока. Современная нормативная техническая документация не может быть использована для расчета токов КЗ в ЕЭЭС с вентильными генераторами и СЭД.

3. Разработанная методика расчета ударных токов КЗ учитывает режимы эксплуатации вентильных ГДГ, возможность подпитки места КЗ через полупроводниковые инверторы от ГЭД и общесудовых электродвигателей, а также наличие статических накопителей электроэнергии. Методика может быть рекомендована для расчетов токов КЗ в ЕЭЭС с распределением электроэнергии на постоянном токе на стадии эскизного и технического проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. — Ч. XI. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2017. — 129 с.
2. ОСТ 5Р.6181-81. Судовые электроэнергетические системы. Методы расчета переходных процессов. — 1981. — 596 с.
3. ОСТ 6126-77. Судовые электроэнергетические системы постоянного тока. Метод расчета токов короткого замыкания. — 1977. — 142 с.
4. Григорьев А. В. Перспективы внедрения вентильных газотурбогенераторов на морском флоте / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова — 2016. — № 1 (35). — С. 165–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-165-169.
5. Шелудько В. Н. Научно-экспериментальный комплекс физических моделей судовых электроэнергетических систем и систем электродвижения нового поколения / В. Н. Шелудько, Ю. В. Сентябрьев, А. В. Григорьев [др.] // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. — 2016. — Т. 7. — С. 48–51.
6. Григорьев А. В. Особенности расчетов токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, С. М. Малышев // Российский морской регистр судоходства: науч.-техн. сб. — 2017. — Вып. 48/49. — С. 104–108.
7. Гольдштейн М. Е. Функции передачи постоянного тока на базе преобразователей напряжения в режиме установившегося короткого замыкания в энергосистеме / М. Е. Гольдштейн, Н. В. Корбуков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2015. — Т. 15. — № 3. — С. 20–24. DOI: 10.14529/power150303.
8. Приходько В. М. Особенности расчетов токов короткого замыкания с учетом сопротивления электрической дуги в судовых электроэнергетических системах / В. М. Приходько, И. В. Приходько, В. Ю. Лучкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 185–195. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-185-195.
9. Жуков В. В. Влияние обратимых двигатель-генераторов и статических преобразователей на ток КЗ в системе постоянного тока электростанций / В. В. Жуков, В. Ф. Казайкин, М. А. Шиша [и др.] // Электрические станции. — 1990. — № 10. — С. 44–48.
10. Кузнецов Ю. П. Математическое моделирование и расчеты дуговых процессов при коротких замыканиях в сетях постоянного тока / Ю. П. Кузнецов, Эль-Зейн Адам // Тезисы докладов Всесоюзной науч. конф. «Токи короткого замыкания в энергосистемах». — М., 1995. — С. 64–67.
11. Азовцев А. А. Короткие замыкания в мощных электроустановках постоянного тока / А. А. Азовцев, Ю. В. Рокотян // Судовая электромеханика и связь. — 1968. — № 40. — С. 3–15.
12. Григорьев А. В. Теоретические вопросы расчета токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, Ю. А. Кулагин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1095–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1095-1103.
13. Grigoryev A. V. Unified ship power grids with alternators and DC power distribution / A. V. Grigoryev, S. M. Malyshev, R. R. Zaynullin // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference on. — IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076232.
14. Vicenzutti A. Studies on asymmetrical short circuit currents in shipboard medium voltage direct current distribution systems fed by AC generators / A. Vicenzutti, F. Tosato, E. De Din, G. Sulligoi // Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2015 IEEE. — IEEE, 2015. — Pp. 48–53. DOI: 10.1109/ESTS.2015.7157860.

REFERENCES

1. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov*. Ch. XI. SPb: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2017.
2. OST 5R.6181-81. Sudovyye elektroenergeticheskiye sistemy. Metod rascheta perekhodnykh protsessov. 1981.

3. OST 6126-77. Sudovyye elektroenergeticheskiye sistemy postoyannogo toka. Metod rascheta tokov korotkogo zamykaniya. 1977.
4. Grigoryev, Andrey Vladimirovich, Ruslan Rinatovich Zaynullin, and Sergey Mihaylovich Malyshev. "Opportunities of introduction of ship valve gas turbogenerators in marine fleet." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 165–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-165–169.
5. Sheludko, Viktor Nikolaevich, Yuriy Vladimirovich Sentyabryov, Andrey Vladimirovich Grigoryev, Ruslan Rinatovich Zaynullin, and Sergey Mihailovich Malyshev. "Scientific-experimental complex of physical models of new generation ship electric power systems and electric propulsion plants." *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University* 7 (2016): 48–51.
6. Grigor'ev, A. V., A. Yu. Vasil'ev, and S. M. Malyshev. "Osobennosti raschetov tokov korotkogo zamykaniya v sudovykh elektroenergeticheskikh sistemakh s raspredeleniem elektroenergii na postoyannom toke." *Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva: nauch.-tekhn. sb.* 48/49 (2017): 104–108.
7. Goldstein, M. E., and N. V. Korbukov. "VSC-HVDC transmission functions under short-circuit conditions in ac power system." *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"* 15.3 (2015): 20–24. DOI: 10.14529/power150303.
8. Prikhodko, Valentin Makarovich, Irina Valentinovna Prikhodko, and Vasily Yuryevich Lucchino. "Features of payments current short circuit in view of resistance arc in the ship electric power system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(39) (2016): 185–195. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-185-195.
9. Zhukov, V. V., V. F. Kazaikin, M. A. Shisha, et al. "Vliyanie obratimyykh dvigatel'-generatorov i staticheskikh preobrazovatelei na tok KZ v sisteme postoyannogo toka elektrostantsii." *Elektricheskie stantsii* 10 (1990): 44–48.
10. Kuznetsov, Yu. P., and El'-Zein Adam. "Matematicheskoe modelirovanie i raschety dugovykh protsessov pri korotkikh zamykaniyakh v setyakh postoyannogo toka." *Tezisy dokladov Vsesoyuznoi nauchnoi konferentsii «Toki korotkogo zamykaniya v energosistemakh»*. M., 1995: 64–67.
11. Azovtsev, A. A., and Yu. V. Rokotyan. "Korotkie zamykaniya v moshchnykh elektroustanovkakh postoyannogo toka." *Sudovaya elektromekhanika i svyaz'* 40 (1968): 3–15.
12. Grigoryev, Andrey V., Aleksey Yu. Vasilyev, and Yurii A. Kulagin. "Theoretical issues of calculation of short-circuit currents in shipboard electric power systems with electric power distribution on a direct current." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 1095–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1095-1103.
13. Grigoryev, A. V., S. M. Malyshev, and R. R. Zaynullin. "Unified ship power grids with alternators and DC power distribution." *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference on*. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076232.
14. Vicenzutti, A., F. Tosato, E. De Din, and G. Sulligoi. "Studies on asymmetrical short circuit currents in shipboard medium voltage direct current distribution systems fed by AC generators." *Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2015 IEEE*. IEEE, 2015: 48–53. DOI: 10.1109/ESTS.2015.7157860.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Андрей Владимирович — кандидат технических наук, доцент, генеральный директор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 АО «НПП «Электродвижение судов» 197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178 e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru, kaf_saees@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigoryev, Andrey V. — PhD, associate professor, CEO Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation JSC "RPC "Ship electric propulsion" 12 Fermskoe shosse Str., let. E, office 178, St. Petersburg, 197341, Russian Federation e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru, kaf_saees@gumrf.ru

Васильев Алексей Юрьевич —

начальник отдела

АО «НПЦ «Электродвижение судов»

197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178

e-mail: alex_was@mail.ru

Зайнуллин Руслан Ринатович —

руководитель проектов

АО «НПЦ «Электродвижение судов»

197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178

e-mail: zaynullin@eds-marine.ru

Vasilyev, Aleksey Yu. —

Head of Department

JSC “RPC “Ship electric propulsion”

12 Fermskoe shosse Str., let. E, office 178,

St. Petersburg, 197341, Russian Federation

e-mail: alex_was@mail.ru

Zaynullin, Ruslan R. —

Chief project manager

JSC “RPC “Ship electric propulsion”

12 Fermskoe shosse Str., let. E, office 178,

St. Petersburg, 197341, Russian Federation

e-mail: zaynullin@eds-marine.ru

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.

Received: January 15, 2018.