

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-296-305

CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN MARINE ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH DIRECT CURRENT POWER DISTRIBUTION

A. V. Grigoryev^{1,2}, A. Yu. Vasil'yev^{2,3}, S. M. Malyshev^{2,3}

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

² — Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russian Federation

³ — JSC “RPC “Ship electric propulsion”, St. Petersburg, Russian Federation

A method for calculating shock short-circuit currents in marine electric power systems with direct current distribution of electricity is presented in the paper. These systems are widely used in shipbuilding. The calculation of short-circuit currents in such systems has a number of features related to the operating modes of these networks. In the systems with direct current electricity distribution, the generation and consumption of electricity is carried out on alternating current, while the distribution is carried out on direct current. The current standards for calculating short-circuit currents in DC and AC systems in this case cannot be used for a number of reasons. These standards do not consider specific supply sources of short-circuit points (short circuit) and variable rotational speed of valve generators in the various operating modes. AC electric motors (ED), when they are mains powered with DC power distribution via autonomous inverters, supply the short-circuit point on the DC side. Capacitor banks and accumulator batteries connected to a system with direct current electricity distribution are additional sources for the short circuit site supply. The elements of a methodology for calculating short-circuit currents in marine power plants with direct current electricity distribution, taking into account all operating modes and additional sources of short-circuit location recharge, are proposed in the paper. A method for determining the maximum value of the shock current at the short circuit design point of the ship's electric power system is proposed.

Keywords: electric current, short circuit, electric power systems, electric generators, semiconductor converters, rowing electrical installations, electric propulsion systems, semiconductor rectifiers, semiconductor inverters, batteries.

For citation:

Grigoryev, Andrey V., Aleksey Yu. Vasil'yev, and Sergei M. Malyshev. “Calculation of short-circuit currents in marine electric power systems with direct current power distribution.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 296–305. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-296-305.

УДК 629.123:621.31

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

А. В. Григорьев^{1,2}, А. Ю. Васильев^{2,3}, С. М. Малышев^{2,3}

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

² — СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье приведена методика расчета ударных токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе, которые находят широкое

применение в судостроении. Приведенный расчет токов короткого замыкания в сетях на постоянном токе имеет ряд особенностей, связанных с режимами работы электрических машин и полупроводниковых преобразователей. В системах с распределением электроэнергии на постоянном токе генерирование и потребление электроэнергии осуществляется на переменном токе, в то время как распределение — на постоянном токе. Отмечается, что действующие в настоящее время стандарты для расчетов токов короткого замыкания в системах постоянного и переменного тока в данном случае не могут быть использованы по ряду причин. В частности, в этих стандартах не рассматриваются специфические источники подпитки точек короткого замыкания и переменная частота вращения вентильных генераторов при различных режимах работы. Электрические двигатели переменного тока при питании от сети с распределением электроэнергии на постоянном токе через автономные инверторы осуществляют подпитку точки короткого замыкания на стороне постоянного тока. Конденсаторные и аккумуляторные батареи, подключенные к системе с распределением электроэнергии на постоянном токе, являются дополнительными источниками подпитки места короткого замыкания. В статье предложены элементы методики расчета токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе, учитывающие все режимы эксплуатации и дополнительные источники подпитки точки КЗ. Предложен способ определения максимального значения ударного тока в расчетной точке КЗ судовой электроэнергетической системы.

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

Для цитирования:

Григорьев А. В. Расчет токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, С. М. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 296–305. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-296-305.

Введение (Introduction)

В последнее десятилетие в судостроении при проектировании судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) находят широкое применение системы распределения электроэнергии на постоянном токе (РПТ) [1], [2], в которых источниками электроэнергии являются вентильные генераторы и статические источники электроэнергии. Основным потребителем электроэнергии является гребная электроустановка (ГЭУ), обеспечивающая движение судна. В состав вентильных источников электроэнергии входят полупроводниковые выпрямители, а в состав ГЭУ — полупроводниковые инверторы. Распределение на постоянном токе электрической энергии имеет явные преимущества по сравнению с традиционными системами. Для систем РПТ отсутствуют нормативные документы расчета токов короткого замыкания (ТКЗ). Для расчета ТКЗ в судовых электроэнергетических системах (ЭЭС) применяются стандартные методы расчета переходных процессов с использованием ОСТ5Р.6181–81 и ОСТ.6126–77 [3]. Данные стандарты, применяемые для расчета ТКЗ в ЭЭС, содержат один род тока: переменный или постоянный. Для систем РПТ имеются сложности расчета ТКЗ, требующих дополнительного рассмотрения [4], [5].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Расчет ТКЗ для ЭЭС с РПТ предполагается выполнять в приведенной последовательности:

1. Анализ схем главного тока ЭЭС.
2. Определение источников питания и подпитки точек КЗ.
3. Обоснование и выбор расчетного режима работы ЭЭС перед моментом наступления короткого замыкания (КЗ), при котором работает максимальное число источников подпитки.
4. Выбор режима работы генераторного агрегата и ГЭУ (нагрузка, частота вращения и др.), при котором данные источники в режиме КЗ будут генерировать максимальную величину тока.
5. Составление расчетных схем с указанием всех источников питания точки КЗ.
6. Обоснование и выбор расчетных точек КЗ.

7. Составление схем замещения ЭЭС.
8. Определение параметров всех источников питания точки КЗ, входящих в состав расчетных схем.

9. Определение тока КЗ для каждой расчетной точки.

Источниками питания места возникновения КЗ являются:

- генераторные агрегаты (ГА), подключенные к сети РПТ через выпрямители;
- гребные электродвигатели (ГЭД), подключенные к сети РПТ через автономные инверторы;
- электродвигатели (ЭД) переменного тока, получающие питание от сети РПТ через автономные инверторы;

- ЭД переменного тока, получающие питание напрямую от сети переменного тока;

- ЭД постоянного тока, подключенные к сети РПТ;

- конденсаторные батареи, подключенные к сети РПТ;

- аккумуляторные батареи, подключенные к сети РПТ.

ЭЭС с РПТ отличаются большим разнообразием возможных режимов эксплуатации. В каждом режиме эксплуатации задействовано разное количество источников подпитки точки КЗ. От режима эксплуатации и количества источников подпитки существенно зависит величина токов КЗ. В связи с этим необходимо выбирать такой режим эксплуатации, при котором работает максимальное количество источников подпитки точки КЗ [6], [7].

При выборе режима работы судовой электростанции (СЭС) выбирается режим с максимальным количеством параллельно действующих ГА. При расчете считаем, что в работе находятся все ГЭУ и подруливающие устройства, если иное не оговорено в проектной и эксплуатационной документации. Расчет мощности эквивалентного ЭД выполняется с учетом максимально загруженного режима эксплуатации судовой электростанции (СЭС) [8]. Частота вращения электрической машины (ЭМ) влияет на индуктивные сопротивления якорной обмотки. При уменьшении частоты вращения ГА снижается частота вырабатываемого тока и пропорционально уменьшаются индуктивные сопротивления ЭМ. Вместе с тем снижение частоты вращения ГА может привести к снижению напряжения и мощности СГ, что также изменяет значение тока КЗ, снижая максимальное значение ударного тока. В связи с этим расчеты токов КЗ от генераторов необходимо выполнять при двух режимах эксплуатации: номинальной и минимальной частоте вращения [9], [10].

Расчет токов КЗ от ГЭД необходимо выполнять при номинальной частоте вращения, когда ЭДС электрической машины имеет максимальное значение. Расчет ТКЗ от ЭД подруливающих устройств и другого мощного частотно-регулируемого электропривода, осуществляющих подпитку точки КЗ, также необходимо выполнять при номинальной частоте вращения. Расчет токов КЗ от валогенераторов (ВГ) необходимо осуществлять при номинальной эксплуатационной частоте, когда ЭДС генератора максимальна. Дополнительно целесообразно выполнять расчет при минимально допустимой частоте вращения электрической машины, работающей в генераторном режиме. При расчетах токов КЗ считаем, что блоки конденсаторных и аккумуляторных батарей полностью заряжены [11].

Расчетные схемы составляются на основании принципиальных схем ЭЭС. Расчетная схема ЭЭС должна содержать полный перечень всех генераторов и преобразователей электроэнергии, электропотребителей постоянного и переменного тока, работающих в рассматриваемом режиме. На схеме указываются коммутационно-защитная аппаратура, токопроводы, отдельные крупные ЭД, соизмеримые с источниками питания и подключенные к РЩ постоянного тока, силовые трансформаторы, общесудовая асинхронная нагрузка в виде эквивалентного ЭД, подключенная к распределительным щитам (РЩ) переменного тока. На схему наносятся необходимые для расчета токов КЗ технические данные элементов ЭЭС. Выбор расчетных точек выполняется после составления расчетной схемы ЭЭС.

Для проверки аппаратов защиты источников электроэнергии и секционных аппаратов следует выбирать такую точку, чтобы значение тока КЗ, протекающего через аппарат или токопровод,

достигало максимального значения. Для проверки аппаратов защиты точку КЗ следует принимать на выводах проверяемого аппарата. На рис. 1 приведен пример выбора расчетных точек КЗ для ЭЭС с РПТ. Точка К1 расположена на сборных шинах ГРЩ 3. Расчет тока КЗ в этой точке необходим для проверки сборных шин по термической и динамической стойкости. В зависимости от места расположения точки КЗ производится суммирование токов от источников подпитки места КЗ. Источниками подпитки являются генераторы 1, ГЭД 8, ЭД подруливающего устройства 9, общесудовая нагрузка, выраженная эквивалентным ЭД 10. Точка К2 расположена со стороны генератора 1 на выходе полупроводникового выпрямителя 2. В этой точке рассчитывается ток КЗ, по которому выбирается защитно-коммутационная аппаратура и определяется ток подпитки тока КЗ в точке К1.

В рассматриваемой схеме защитно-коммутационная аппаратура может быть установлена на входе выпрямителя 2 и на вводе в распределительный щит постоянного тока 3. Автоматический выключатель (или защитные предохранители) на входе выпрямителя 2 необходимы для защиты выпрямителя 2 и отходящей от него линии в случае отсутствия внутренней защиты в выпрямителе.

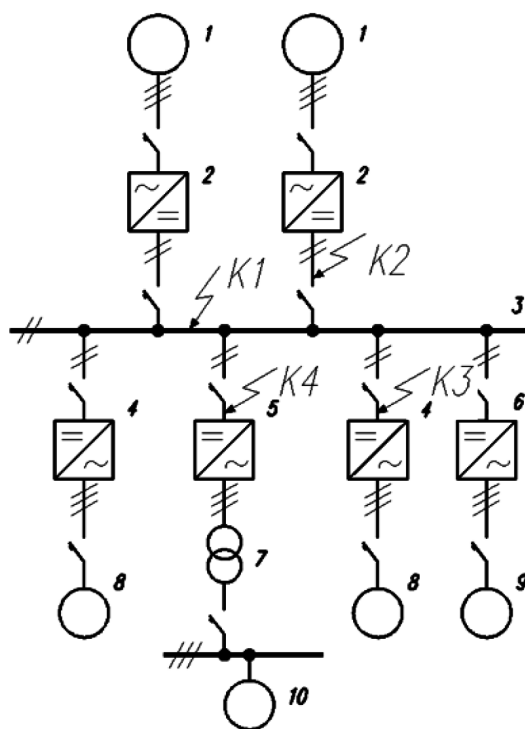


Рис. 1. Расчетные точки КЗ в ЭЭС с РПТ:

- 1 — генераторы; 2 — полупроводниковые выпрямители; 3 — ГРЩ;
- 4 — автономные инверторы ГЭУ;
- 5 — полупроводниковый инвертор общесудовых приемников;
- 6 — полупроводниковый инвертор подруливающего устройства;
- 7 — силовой понижающий трансформатор; 8 — ГЭД;
- 9 — ЭД подруливающего устройства; 10 — эквивалентный ЭД

При возникновении внутренних повреждений в полупроводниковом преобразователе, возникновении КЗ на его входе или выходе, автоматический выключатель должен произвести защитное отключение и предотвратить отказ выпрямителя 2 или его полное разрушение при внутреннем повреждении. На выходе выпрямителя может быть расположена конденсаторная батарея, которая создаст дополнительную подпитку тока КЗ в точку К1. На вводе в РЩ постоянного тока 3 в качестве защитно-коммутационного аппарата может быть применен автоматический выключатель на постоянный ток или разъединитель-предохранитель.

Точка КЗ расположена на входе инвертора 4, питающего ГЭД 8 или ЭД подруливающего устройства 9. В точку сходятся два тока КЗ: от ГЭД, перешедшего в генераторный режим, и от ГРЩ постоянного тока 3. Следует отметить наличие на входе инвертора 4, 6 конденсаторной батареи большой емкости. При возникновении КЗ на сборных шинах распределительного щита или в другом месте, конденсаторы разрядятся на точку КЗ. Данный ток необходимо учитывать при выборе защитно-коммутационного аппарата и расчете динамической стойкости сборных шин. Как правило, для защиты данного фидера в распределительном щите постоянного тока применяют разъединитель-предохранитель. Точка К4 расположена на входе инвертора, питающего через распределительный щит переменного тока общесудовые потребители 10. В точке сходятся два тока короткого замыкания: от эквивалентного ЭД 10 распределительного щита переменного тока и от ГРЩ постоянного тока 3.

В первом случае протекает ток подпитки КЗ от эквивалентного электродвигателя 10, во втором случае в точку КЗ протекает суммарный ток КЗ от системы постоянного тока. Необходимо отметить наличие на входе инвертора 5 конденсаторной батареи. При возникновении КЗ от конденсаторной батареи также будет протекать ток к месту КЗ. В случае наличия силового понижающего трансформатора 7 на выходе инвертора 5 он оказывает ограничивающее действие, что необходимо учитывать при расчете тока КЗ.

Для некоторых режимов КЗ в СЭЭС расчетную схему следует преобразовать в схему замещения. В этом случае источники электроэнергии и элементы схемы замещаются электродвижущими силами (ЭДС) и сопротивлениями, выраженными в именованных единицах: электродвижущие силы — в вольтах (В), токи — в килоамперах (кА), сопротивления — миллиомах (мОм). При выборе значения сопротивлений следует учитывать рабочую температуру. Такие действия выполняются для каждой точки КЗ.

Аккумуляторная батарея (АКБ) замещается эквивалентной ЭДС с полным сопротивлением, которое является суммой сопротивлений межэлементных связей и контактных соединений. ЭД постоянного тока учитываются как один эквивалентный источник питания с эквивалентной ЭДС и фиктивным сопротивлением. Элементы схемы переменного тока (генераторы, трансформаторы, двигатели, реакторы, участки кабельных трасс и протяженных шинопроводов) замещаются активными и индуктивными сопротивлениями. Элементами с относительно небольшими сопротивлениями допускается пренебречь.

Синхронные и асинхронные ЭД, синхронные генераторы в схеме замещения учитываются своими ЭДС, а также сопротивлениями (активными и индуктивными). Параметры генераторов и синхронных двигателей принимают согласно техническим условиям. При составлении схемы замещения последовательно соединенные сопротивления элементов отдельных цепей (кабели, шины, аппараты, переходные сопротивления контактов и т. п.), выраженные в именованных единицах, заменяются суммарными. Активные и индуктивные сопротивления суммируются отдельно. Для всех находящихся в схеме трансформаторов необходимо привести замещающие их сопротивления к одной ступени напряжения, принимаемой за базисную. К этой ступени приводятся сопротивления всех элементов схемы, установленных на другой ступени напряжения, а также токи, ЭДС и напряжения этих элементов. На рис. 2 приведен пример расчетной схемы замещения ЭЭС с полным распределением вырабатываемой на постоянном токе электрической энергии с асинхронными ГЭД. В состав данной ЭЭС входят два синхронных генератора 1, эквивалентный асинхронный ЭД 2, асинхронный ГЭД 3, ЭД подруливающего устройства 4.

После составления схем замещения выполняется их упрощение на основе использования следующих условий:

1. Если точка КЗ находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями, то схему можно разделить на части (отдельные ветви), сохранив на конце каждой из ветвей КЗ. Расчет ТКЗ в этом случае ведется раздельно для каждой ветви. За базисную мощность следует принимать номинальную мощность генератора или группы генераторов данной ветви. Ток в точке КЗ равен сумме токов отдельных ветвей.

2. Если схема полностью симметрична относительно точки КЗ (одинаковые источники, одинаковые сопротивления и т. п.) либо ее часть имеет симметрию относительно некоторой промежуточной точки, то ее можно сложить по оси симметрии. В этом случае мощность источников или двигателей равна сумме их мощностей, а сопротивления складываются параллельно.

3. Последовательность сопротивлений заменяются одним эквивалентным.

4. Все источники питания заменяются одним эквивалентным источником.

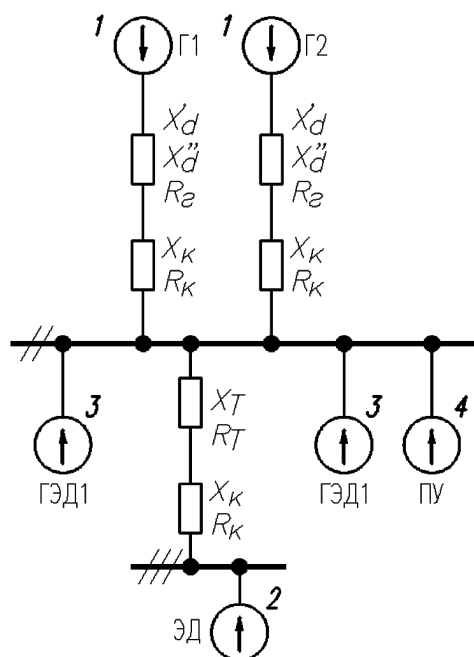


Рис. 2. Расчетная схема замещения ЭЭС
с распределением на постоянном токе вырабатываемой
электрической энергии с асинхронными ГЭД: 1 — синхронные генераторы;
2 — эквивалентный асинхронный ЭД; 3 — асинхронный ГЭД;
4 — асинхронный ЭД подруливающего устройства

При расчете ТКЗ необходимо учесть ток подпитки точки КЗ от всех источников электроэнергии, которые могут осуществить подпитку током КЗ выбранную точку.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

В ЭЭС с РПТ генераторы работают совместно с выпрямителем. В процессе расчета ТКЗ на выходе трехфазного полупроводникового выпрямителя, который получает электрическое питание от синхронного генератора, расчет выполняется так же, как для симметричного КЗ на выводах генератора. При этом учитываются активные и реактивные сопротивления кабельной линии электропередачи на участке *генератор — выпрямитель*. Ударный ТКЗ определяется согласно следующему выражению:

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

где γ_a — коэффициент аperiodической составляющей;

I_6 — базисный ток;

I_t — периодическая составляющая тока;

I_0'' — начальное значение сверхпереходного тока.

При работе вентильного генератора на нескольких частотах его электрические параметры будут меняться. Каждому режиму работы будет соответствовать определенное значение ТКЗ. Расчет ТКЗ необходимо выполнять для минимальных и максимальных частот работы генератора.

Электрические двигатели, которые получают питание от автономных инверторов, также являются источниками подпитки точки КЗ. Это обусловлено наличием в составе автономных инверторов обратных диодов. При возникновении КЗ электрические машины переходят в режим генераторов и осуществляют подпитку КЗ в сети РПТ. Расчет ТКЗ необходимо выполнять при максимальных оборотах работы электрических машин.

В качестве ГЭД, как правило, применяются асинхронные и синхронные ЭД. В случае применения синхронного ГЭД расчет ТКЗ необходимо выполнять аналогично расчету ТКЗ от синхронных генераторов. Для асинхронного ГЭД ударный ТКЗ будет определяться по формуле

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

где γ_a — коэффициент аperiodической составляющей;

$I_{тд}$ — периодическая составляющая тока КЗ (действующее значение) для момента времени t ;

U_c — напряжение на фидере двигателя до КЗ;

$I_{ном}$ — номинальный ток.

В ЭЭС с РПТ дополнительным источником выступают конденсаторы, входящие в состав выпрямителей и автономных инверторов. Также могут применяться дополнительные конденсаторные батареи, подключенные напрямую к шинам системы РПТ. Поскольку наибольший ток разряда конденсатора возможен при максимальном его заряде и наименьшем сопротивлении цепи разряда, значение тока разряда может достигать многих килоамперов. Мгновенное значение напряжения блока конденсаторов в отдельный момент времени разряда можно определить с помощью выражения

$$U_t = U_0 e^{-\frac{t}{T}}.$$

Мгновенное значение тока разряда

$$i_t = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{T}},$$

где U_t — напряжение между обкладками конденсатора после начала разряда, В;

i_t — ток в цепи конденсатора после начала разряда;

T — период времени от момента начала заряда, с;

U_0 — напряжение источника, В;

C — емкость конденсатора, Ф;

R — сопротивление цепи, Ом;

T — постоянная времени ($T = RC$);

$e = 2,718$.

Расчеты ТКЗ от ЭД переменного тока изложены в ОСТ5Р.6181–81, расчеты ТКЗ от ЭД постоянного тока — в ОСТ.6126–77. В качестве накопителей электроэнергии в ЭЭС с РПТ могут применяться аккумуляторные батареи (АКБ), подключаемые непосредственно к шинам ГРЩ или при помощи зарядно-разрядного устройства. В случае возникновения КЗ на шинах ГРЩ при непосредственном подключении АКБ они могут являться источниками подпитки точки КЗ. После расчета ТКЗ для всех режимов в расчетных точках следует рассчитать ТКЗ для каждой выбранной точки КЗ. Расчет максимального значения ударного ТКЗ выполняется для источников двух типов:

- источника тока в момент времени, близкий к нулю;
- источника тока в момент времени, отличный от нуля.

К первой группе относятся АКБ и конденсаторные батареи, ко второй — генераторы и ЭД. Ударный ТКЗ от источников первой группы в момент времени, близкий нулю ($t_0 = 0$ с), составит сумму токов от всех источников ТКЗ:

$$I_{уд.бт_0} = I_{C1} + I_{C2} + \dots + I_{Cn} + I_{ак}.$$

Выполняется расчет суммарного ударного ТКЗ от источников первой группы в момент времени $t_1 = 1/2f$:

$$I_{уд.бt_1} = I_{C1t_1} + I_{C2t_1} + \dots + I_{Cnt_1} + I_{акt_1},$$

где $t_1 = 1/2f$;

f — частота напряжения генератора, Гц.

Для момента времени $t = 1/2f$ необходимо составить сумму токов от второго типа источников в точке КЗ:

$$I_{уд.эмt_1} = I_{Г1} + I_{Г2} + \dots + I_{Гn} + I_{Д1} + I_{Д2} + \dots + I_{Дn},$$

где $t_1 = 1/2f$;

f — частота сети, Гц.

Для момента времени $t = 1/2f$ необходимо составить сумму токов от всех источников в точку КЗ:

$$I_{удt_1} = I_{уд.бt_1} + I_{уд.эмt_1}.$$

Из расчетных значений ударного ТКЗ выбирается максимальное значение, по которому выполняется проверка защитно-коммутационного оборудования кабельных трасс и шинопроводов на электродинамическую устойчивость.

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Судовые электроэнергетические системы с РПТ находят широкое применение в судостроении. Расчет ТКЗ в таких системах имеет ряд особенностей, связанных с режимами работы таких сетей.
2. При расчете ТКЗ необходимо учитывать переменную частоту вращения электрических генераторов, а также возможность применения обратимых полупроводниковых преобразователей в составе гребной электрической установки и накопителей электрической энергии, установленных в системе РПТ, а также возможность подпитки места КЗ от гребных электродвигателей.
3. Необходима разработка нормативной технической документации для расчета токов КЗ в судовых ЭЭС с РПТ с гребными электрическими установками.
4. Рассмотренные примеры расчета ударных ТКЗ в судовых ЭЭС с РПТ учитывают основные режимы эксплуатации судна, позволяя повысить их достоверность и точность. Предлагаемая методика может быть рекомендована при расчете ТКЗ в ЭЭС с РПТ для современных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский В. В. Анализ схемных решений гребных электрических установок с распределенной шиной постоянного тока / В. В. Романовский, В. А. Малышев, А. С. Бежик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 169–181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.
2. Grigoryev A. V. Unified ship power grids with alternators and DC power distribution / A. V. Grigoryev, S. M. Malyshev, R. R. Zaynullin // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). — IEEE, 2017. — Pp. 1–3. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076232.
3. Жуков В. В. Короткие замыкания в электроустановках постоянного тока / В. В. Жуков. — М.: Изд-во МЭИ, 2005. — 160 с.
4. 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 // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2017. — № 48–49. — С. 104–108.
5. 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.

6. 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.

7. 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 научной конференции «Токи короткого замыкания в энергосистемах». — М., 1995. — С. 64–67.

8. Азовцев А. А. Короткие замыкания в мощных электроустановках постоянного тока / А. А. Азовцев, Ю. В. Рокотян // Судовая электромеханика и связь. — 1968. — Вып. 40. — С. 3–15.

9. 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.

10. 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.

11. Жуков В. В. Расчет токов коротких замыканий в электроустановках, питаемых от аккумуляторных батарей / В. В. Жуков // Электрические станции. — 1996. — № 9. — С. 29–35.

REFERENCES

1. Romanovskiy, Victor V., Vladimir A. Malishev, and Artem S. Bezhik. “Special structure of the electrical propulsion plant with DC-grid system.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 169–181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.

2. Grigoryev, A. V., S. M. Malyshev, and R. R. Zaynullin. “Unified ship power grids with alternators and DC power distribution.” *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076232.

3. Zhukov, V. V. *Korotkie zamykaniya v elektroustanovkakh postoyannogo toka*. M.: Izdatel'stvo MEI, 2005.

4. Grigoryev, A. V., A. Yu. Vasilyev, and S. M. Malyshev. “Calculation features for short circuit currents in shipboard electric power systems with electrical power distribution on direct current.” *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 48–49 (2017): 104–108.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Azovtsev, A. A., and Yu. V. Rokotyan. “Korotkie zamykaniya v moshchnykh elektroustanovkakh postoyannogo toka.” *Sudovaya elektromekhanika i svyaz* 40 (1968): 3–15.

9. 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.

10. Zhukov, V. V., et al. “Vliyaniye obratimyykh dvigatel'-generatorov i staticheskikh preobrazovatelei na tok KZ v sisteme postoyannogo toka elektrostantsii.” *Elektricheskie stantsii* 10 (1990): 44–48.

11. Zhukov, V. V. “Raschet tokov korotkikh zamykaniy v elektroustanovkakh, питаемых от аккумуляторных батарей.” *Elektricheskie stantsii* 9 (1996): 29–35.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Андрей Владимирович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru,
kaf_saees@gumrf.ru

Васильев Алексей Юрьевич —

ассистент, начальник отдела
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178
e-mail: vasilev@eds-marine.ru

Малышев Сергей Михайлович —

ассистент, начальник отдела
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178
e-mail: malyshev@eds-marine.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigoryev, Andrey V. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
Saint Petersburg Electrotechnical University
5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197022,
Russian Federation
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru,
kaf_saees@gumrf.ru

Vasil'yev, Aleksey Yu. —

Assistant, Head of Department
Saint Petersburg Electrotechnical University
5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197022,
Russian Federation
JSC "RPC "Ship electric propulsion"
12 Fermское shosse Str., let. E, office 178,
St. Petersburg, 197341, Russian Federation
e-mail: vasilev@eds-marine.ru

Malyshev, Sergei M. —

Assistant, Head of Department
Saint Petersburg Electrotechnical University
5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197022,
Russian Federation
JSC "RPC "Ship electric propulsion"
12 Fermское shosse Str., let. E, office 178,
St. Petersburg, 197341, Russian Federation
e-mail: malyshev@eds-marine.ru

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2022 г.

Received: February 27, 2022.