

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-185-195
УДК 629.12.066:621.316.9

**В. М. Приходько,
И. В. Приходько,
В. Ю. Лучкин**

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С УЧЕТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В статье показано, что оптимальное проектирование современной автоматизированной судовой электроэнергетической системы в существенной мере определяется тем, насколько точно учтены при этом особенности переходных процессов при аварийных коротких замыканиях в сети и, в частности, при близких к судовым генераторным агрегатам повреждениях. Выявлено и подтверждено, что каждое многофазное замыкание является, в той или иной мере, неодновременным. В автономных (судовых, корабельных) электроэнергетических системах типичными особенностями неодновременных (последовательных) замыканий являются повышенные ударные токи и задержки прохождения токов через нуль. В данной статье разработана методика расчетов токов коротких замыканий с учетом сопротивления электрической дуги в судовых электроэнергетических системах, которая позволяет повысить их электро- и пожаробезопасность. Рассмотрено существенное влияние на величину тока короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах сопротивления электрической дуги в месте короткого замыкания на судне, которое возрастает с увеличением отношения длины дуги в метрах к расчетному напряжению судовой сети в киловольтах, а также с увеличением активного сопротивления участка электрической сети до места короткого замыкания. Выполнены расчеты токов коротких замыканий с учетом сопротивления электрической дуги для судовых электроэнергетических систем с номинальными напряжениями 220, 380 и 500 В. В судовой электроэнергетике предложена новая формула, расчеты по которой позволяют получать однозначные и точные значения сопротивления электрической дуги. Подтверждено, что формула может быть использована для расчетов сопротивления электрической дуги в судовых электроэнергетических системах любого напряжения.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, электрическая дуга, короткое замыкание, токи короткого замыкания, сопротивление электрической дуги, перемежающаяся дуга, двухфазное короткое замыкание.

Введение

Продолжающиеся работы по строительству современных автоматизированных судов и ледоколов нового поколения ведут к укрупнению электроэнергетических систем, судовых электростанций и гребных электрических установок на базе полупроводниковых преобразователей частоты, к увеличению общей протяженности кабельных коммуникаций и росту мощностей автономных электростанций, а это, в свою очередь, приводит к увеличению токов короткого замыкания (КЗ). В данной статье разработана методика расчетов токов КЗ с учетом сопротивления электрической дуги в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС), которая позволяет повысить их электро- и пожаробезопасность.

Оптимальное проектирование современной СЭЭС в значительной мере зависит от того, насколько правильно учтены при этом особенности переходных процессов при аварийных КЗ в энергосистеме и в особенности при близких к судовым генераторам повреждениях. Любое многофазное замыкание является, в той или иной мере, неодновременным. На судах типичными особенностями неодновременных (последовательных) замыканий являются повышенные ударные токи и задержка прохождения токов через нуль.

Методика расчета

Непрерывный рост мощности судовых электростанций составляет главную тенденцию в развитии отечественной и мировой судовой электроэнергетики. Удвоение роста мощностей су-

довых электростанций происходит приблизительно каждые 10 лет. С этим связано увеличение единичной мощности судовых синхронных генераторов, что, в свою очередь, является основным направлением прогресса в области крупного электромашиностроения для судостроения и отрасли водного транспорта.

Мощность судовых (корабельных) синхронных турбогенераторов растет, главным образом, за счет увеличения линейной токовой нагрузки статора при почти неизменных геометрических размерах и мало изменяющейся индукции в воздушном зазоре. Следствием этого являются рост величин реактивных сопротивлений X_d , X'_d и X''_d . Кроме того, как показывает линия регрессии $\frac{T_a^{(3)}}{T_a^{''(3)}} = f(S)$, представленная на рис. 1 в полулогарифмических координатах для двухполюсных турбогенераторов отечественного производства, с ростом номинальной мощности постоянные времени якоря $T_a^{(3)}$, характеризующие затухание апериодического тока, увеличиваются существенно быстрее сверхпереходных постоянных времени $T_a^{''(3)}$.

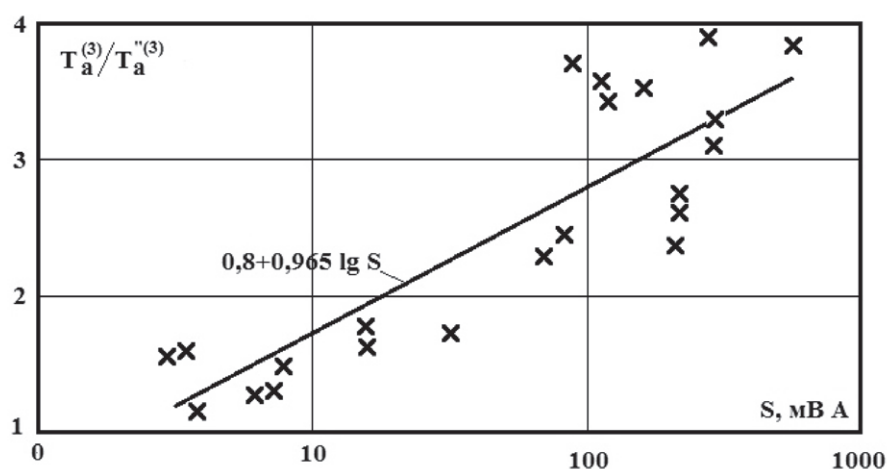


Рис. 1. Зависимость $\frac{T_a^{(3)}}{T_a^{''(3)}} = f(S)$

для трехфазных двухполюсных турбогенераторов отечественного производства

В результате в судовых электростанциях при КЗ на выводах современного турбогенератора затухание апериодического тока в начале переходного процесса происходит медленнее, чем периодического, и может возникнуть задержка прохождения тока одной или двух фаз через нуль. Последнее обстоятельство способно чрезвычайно затруднить работу быстродействующего автоматического выключателя [1]. В высоковольтных СЭЭС в случае аварийного КЗ на стороне высшего напряжения блока «турбогенератор – трансформатор» затухание апериодического тока ускоряется трансформатором. Однако, чем выше номинальные мощность и напряжение трансформатора морского исполнения, тем ниже его активное сопротивление КЗ — $r_{КЗ}$, отнесенное к индуктивности КЗ: $\frac{X_{КЗ}}{\omega}$ (рис. 2), и тем, следовательно, слабее содействие судового трансформатора затуханию апериодических токов.

Кроме того, возрастание реактивных сопротивлений судовых синхронных генераторов неблагоприятно сказывается на динамической устойчивости СЭЭС, одним из средств повышения которой является уменьшение времени срабатывания автоматических выключателей на судах [1]. В настоящее время в России и за рубежом созданы автоматические быстродействующие выключатели с собственным временем срабатывания — не более двух периодов основной частоты тока. Дальнейший прогресс в области автоматических сверхбыстродействующих выключателей будет, по-видимому, связан с применением управляемого пополюсного отключения при тяжелых условиях КЗ (например, в случае повышенных апериодических составляющих токов). Возмож-

но, что таким способом удастся на судах морского и речного флота удовлетворить предъявляемые к судовым автоматическим выключателям уже в настоящее время современные требования, которые связаны с гарантией их успешной работы в специфических коммутационных режимах, в том числе при отключении неудалённых КЗ.

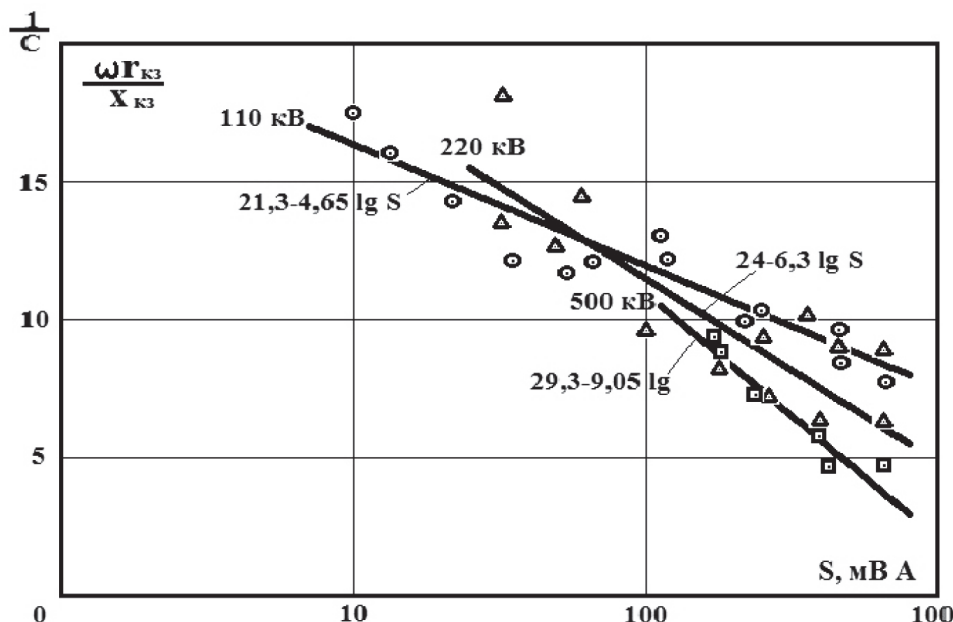


Рис. 2. Зависимость $\frac{\omega r_{кз}}{X_{кз}} = f(S)$

для отечественных трехфазных обмоточных трансформаторов

Возможность управляемого отключения КЗ технически согласуется с намечающимся переходом к непосредственной автоматизации управления нормальными и аварийными режимами автономных (судовых, корабельных) электроэнергетических систем. По прогнозам, к 2020 г. в судовой электроэнергетике экипаж судна (человек) будет полностью отстранен от принятия решений, в частности, при возникновении аварийных ситуаций. В судовой электроэнергетике актуальной является проблема одновременных или последовательных (так называемых *постепенных, каскадных, развивающихся* и др.) аварийных КЗ в СЭЭС с турбогенераторами и трансформаторами.

На практике при проектировании СЭЭС серия расчетов токов КЗ производится традиционно для случаев так называемых *металлических замыканий без переходных сопротивлений*, а возможное уменьшение токов КЗ, из-за переходных сопротивлений, учитывается введением коэффициента запаса при расчете уставок защит [1] – [6]. Однако принимаемые коэффициенты запаса не всегда обеспечивают требуемую чувствительность защиты СЭЭС. В СЭЭС значительное влияние на величину тока КЗ может оказывать сопротивление дуги в месте КЗ, которое возрастает с увеличением отношения длины дуги в метрах к расчетному напряжению судовой сети в киловольтах, а также с увеличением активного сопротивления участка электрической сети до места КЗ [7] – [14].

Расчеты токов КЗ выполнены с учетом сопротивления электрической дуги для СЭЭС с номинальными напряжениями 0,22, 0,38 и 0,5 кВ. При расчетах учитывались сопротивления кабелей, шин, трансформаторов тока, автоматических выключателей, а также активные сопротивления генераторов, питающих места КЗ [8] – [12]. Достоинство предложенной методики состоит в том, что такие процедуры можно легко алгоритмизировать и проводить в любой вычислительной среде, вплоть до Microsoft Office Excel. В данном случае вычислительные процедуры выполнены в среде MathCAD, которая предоставляет широкие возможности, в частности матричных вычислений.

Экспериментальные исследования открытых электрических дуг, проведенные в СССР, показывают, что при достаточно больших значениях токов повреждения (сотни ампер и более) градиент напряжения в дуге почти не зависит от тока и может приниматься 1,4 – 1,5 кВ на 1 м длины дуги (амплитудное значение) [13]. Принимая эти данные, сопротивление электрической дуги (действующее значение), являющееся практически чисто активным, определим по выражению, полученному на основании опытов [14]:

$$R_d = \frac{1050 L_d}{I_d}, \quad (1)$$

где L_d — длина электрической дуги, м; I_d — ток в дуге, А; R_d — активное сопротивление дуги, Ом.

В публикации [14] утверждается о возможности использования выражения (1) для расчетов сопротивления электрической дуги в сетях напряжения 0,22 кВ – 1,0 кВ, а также в сетях более высокого напряжения. Авторы данной статьи не располагают техническими сведениями о рекомендациях относительно применения этого выражения для расчетов в сетях только определенного диапазона номинальных напряжений, а также об ограничениях по его использованию. Например, на Черепетской ГРЭС Тулэнерго расчеты токов КЗ выполнялись в соответствии с выражением (1), при этом экспериментальные исследования, подтверждающие результаты расчетов, не производились. В расчетах принималась длина дуги в момент ее возникновения, равная расстоянию между шинами в месте КЗ.

Выбор уставок защит производился на основании результатов расчетов токов КЗ с учетом сопротивления электрической дуги в момент ее возникновения. В начальный период возникшего повреждения длина и сопротивление дуги имеют минимальные значения, а ток КЗ — максимальное. В последующие периоды, по мере удлинения электрической дуги под влиянием конвекции воздуха и электродинамических усилий, длина и сопротивление электрической дуги могут существенно возрасти [15], [16].

Выражение (1) определяет зависимость между сопротивлением электрической дуги R_d и током I_d при определенной длине дуги L_d и соответствующем напряжении на дуге $U_d = 1050 L_d$, но не учитывает при этом изменения суммарного сопротивления сети с появлением сопротивления возникшей дуги, от которого зависит ток в дуге, а следовательно, и сопротивление дуги. Существующая методика однократного расчета сопротивления дуги по выражению (1) не всегда обеспечивает необходимую точность расчета. Точное сопротивление дуги может быть получено в результате проведения большого числа последовательных расчетов, выполнение которых необходимо осуществлять на компьютере (микрокалькуляторе) по специальной программе. В публикации [14] для практических расчетов сопротивления электрической дуги предлагается формула, дающая однозначное и точное значение сопротивления электрической дуги, соответствующее выражению (1).

Формула для расчета сопротивления электрической дуги в месте КЗ при одно-, двух- и трехфазных симметричных КЗ имеет вид

$$R_d = A \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + \frac{Z_1^2}{A}} \right), \quad (2)$$

где $R_1, X_1, Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$ — активное, реактивное и полное сопротивление сети при КЗ без дуги;

$$A = \frac{U_d^2}{U_p^2 - U_d^2} \text{ — коэффициент;}$$

U_p — расчетное напряжение, которое в зависимости от вида КЗ принимается по отношению к номинальному напряжению сети равным:

$$\begin{aligned} &\text{— для трехфазного и однофазного КЗ } U_p = 1,05 \frac{U_n}{\sqrt{3}}; \\ &\text{— для двухфазного КЗ } U_p = 1,05 U_n. \end{aligned}$$

Здесь U_n — номинальное напряжение сети;

U_d — напряжение на дуге.

Соответственно активное, реактивное и полное сопротивления сети при КЗ с дугой составляют: $R_{11} = R_1 + R_d$; $X_{11} = X_1$; $Z_{11} = \sqrt{R_{11}^2 + X_1^2}$, где R_d — активное сопротивление дуги.

Формула (2) может быть использована для расчетов в сетях любого напряжения при условии сохранения закономерностей, определяемых выражением (1). Для выполнения расчетов в эту формулу (2) вводятся суммарные сопротивления сети и коэффициент A в соответствии с видом КЗ (одно-, двух- или трехфазное симметричное).

Проверка результатов расчетов производится в соответствии с выражением (1), т. е. $U'_d = I_{11} R_d = U_d = 1050 L_d$ или $\frac{U_d}{U'_d} = 1$, где $I_{11} = \frac{U_p}{Z_{11}}$ — ток аварийного КЗ с учетом дуги в месте повреждения.

Для автоматизации, упрощения и ускорения расчетов сопротивления дуги R_d по формуле (2), а также суммарных сопротивлений сети и токов аварийных КЗ разработана программа расчетов на компьютере (микрокалькуляторе). При исходных данных U_p , R_1 , X_1 , L_d и 1050 по предложенной программе автоматически вычисляются U_d , A , Z_{11} , I_{11} , R_d , R_{11} , Z_{11} , I_{11} , U'_d и $\frac{U_d}{U'_d}$. Ток аварийного КЗ

без учета электрической дуги определяется по формуле $I_1 = \frac{U_p}{Z_1}$.

Разработан алгоритм расчетов токов двухфазного и однофазного КЗ с учетом сопротивления дуги для автономных (судовых, корабельных) СЭЭС. Расчет суммарных сопротивлений судовой электрической сети выполнен в соответствии с типовой методикой, разработанной ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Сопротивление электрической дуги в момент ее возникновения вычислялось по формуле (2). Все расчеты производились на компьютере (отечественном микрокалькуляторе) по разработанному алгоритму и реализованной рабочей программе. Анализ выполненных автоматизированных расчетов показывает, что токи КЗ с дугой в момент ее возникновения уменьшаются относительно токов КЗ без дуги до 0,835 – 0,495 при двухфазных аварийных КЗ и до 0,685 – 0,355 при однофазных.

Сопротивление электрической дуги в месте аварийного КЗ существенно зависит от активного сопротивления судовой питающей сети. Значительная разница в величине отношений $\frac{I_{11}}{I_1}$ при двух- и однофазных КЗ на различных судовых секциях 0,38 кВ определяется отличием суммарных активных сопротивлений судовой сети до соответствующих мест КЗ на судах. Определение сопротивления дуги целесообразно производить автоматизированными расчетами с учетом сопротивлений всех элементов электрической сети судна. При автоматизированном проектировании СЭЭС использование в расчетах токов КЗ только заданных определенных сопротивлений дуги или коэффициентов запаса в случае выбора уставок защит, без учета реальных сопротивлений судовой сети и расчетных сопротивлений электрической дуги в месте КЗ, приводит часто к завышению токов КЗ и уставок быстродействующих защит, а иногда и к их занижению [17] – [19].

Как известно, после возникновения электрической дуги ее длина и сопротивление увеличиваются в процессе аварийного КЗ в СЭЭС. По выражению (1) можно определить расчетную теоретическую максимальную длину дуги $L_{d \text{ макс}}$ в судовых сетях любого напряжения:

$$R_d = \frac{1050 L_d}{I_d} = \frac{U_d}{I_d}. \quad (3)$$

При $I_d = 0$, $R_d = \infty$ и $U_d = 1050 L_d = U_p$, откуда $L_{d \text{ макс}} = \frac{U_p}{1050}$. Например, при $U_p = 525$ В $L_{d \text{ макс}} = \frac{525}{1050} = 0,5$ м.

Расчетная максимальная длина электрической дуги в метрах равна расчетному напряжению судовой сети в киловольтах, деленному на 1,05.

При двухфазных аварийных КЗ в промышленных и СЭЭС расчетная максимальная длина дуги в метрах равна номинальному напряжению в киловольтах. В действительности, электрическая дуга погасает при меньшей ее длине, чем $L_{д макс}$, так как при увеличении длины и сопротивления дуги уменьшается ток аварийного КЗ.

Для определения зависимости аварийных токов КЗ от длины электрической дуги выполнены автоматизированные расчеты токов двухфазного КЗ при различной длине дуги (от 0 до $L_{д макс}$) в судовой сети напряжением 0,5 кВ. При однократных расчетах сопротивление дуги вычисляется для каждого заданного значения ее длины при токе металлического КЗ, а затем определяется ток КЗ с учетом вычисленного сопротивления электрической дуги.

Зависимость токов КЗ от длины дуги в относительных единицах при автоматизированных расчетах без учета активного сопротивления судовой сети ($R_1 = 0$) одинакова для СЭЭС любого напряжения. Обычно в расчетах токов КЗ на компьютере не учитываются активные сопротивления высоковольтных судовых сетей из-за их малой величины. Значительное уменьшение аварийных токов КЗ в зависимости от длины электрической дуги определяется наличием активного сопротивления судовой сети. Увеличение длины и сопротивления электрической дуги в процессе КЗ может привести к ее погасанию на судах.

В СЭЭС напряжением 0,38 кВ при расстоянии между токоведущими частями в месте КЗ, равном 0,15 м, электрическая дуга может погаснуть после ее возникновения при двухфазном КЗ через 0,24 – 0,4 с, а при однофазном — через 0,14 – 0,28 с. В действительности электрическая дуга погаснет при меньшей ее длине, чем $L_{д макс}$, что приведет к уменьшению расчетного времени горения дуги в СЭЭС. Установлено, что через небольшой промежуток времени после погасания электрическая дуга загорится вновь при минимальной ее длине. В СЭЭС возникнет процесс аварийного КЗ через прерывистую дугу.

На судах защиты при аварийных КЗ через перемежающуюся дугу отказывают в срабатывании, если время их отключения больше времени горения дуги до ее погасания, так как при погасании дуги или даже несколько раньше (при уменьшении тока КЗ) происходит возврат токовых реле и сброс набранной выдержки времени защиты. Это подтверждается также опытом эксплуатации мощных СЭЭС. Для повышения надежности работы защиты через перемежающуюся дугу разработана схема фиксации мгновенного измерения тока КЗ, приведенная в публикации [20]. О фиксации срабатывания реле сопротивления изложено также в публикациях [15], [16], [21].

Аварийные КЗ через перемежающуюся дугу наиболее вероятны в СЭЭС до 1000В, чем в высоковольтных электрических системах, так как с уменьшением номинального напряжения судовых автоматизированных электростанций абсолютное значение расчетной максимальной длины дуги и время ее горения до погасания.

Расчеты сопротивления дуги в месте КЗ следует выполнять по формуле (2) в судовых сетях любого напряжения, где возможно применение выражения (1). Такие расчеты можно выполнять также с использованием этого же выражения, но только в диапазоне изменения относительной длины дуги от 0 до 0,5 $L_{д макс}$ и при условии равенства нулю активного сопротивления судовой сети. По формуле (2) можно выполнять расчеты сопротивления дуги при трехфазных симметричных КЗ, когда сопротивления дуги в каждой фазе одинаковы.

Трехфазное симметричное КЗ может быть в момент возникновения электрической дуги при условном расположении токоведущих частей в месте КЗ по углам равностороннего треугольника. При этом длина дуги в каждой фазе $L_{д ф}$ в $\sqrt{3}$ раза меньше расстояния между токоведущими частями. При этих условиях сохраняется соотношение токов трехфазного симметричного КЗ и двухфазного КЗ с дугой:

$$\frac{I_{11}^{(3)}}{I_{11}^{(2)}} = \frac{2}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

где $I_{11}^{(2)}$ — ток двухфазного КЗ с учетом дуги; $I_{11}^{(3)}$ — ток трехфазного КЗ с учетом дуги.

Расчетные сопротивления и токи при трех-, двух- и однофазных КЗ обозначаются соответствующими индексами. Например, $I_{11}^{(3)}, I_{11}^{(2)}, I_{11}^{(1)}$ — токи КЗ без учета дуги, при этом $R_1^{(2)} = 2R_1^{(3)}, X_1^{(2)} = 2X_1^{(3)}$.

На судах в эксплуатационных условиях возникшие трехфазные симметричные аварийные КЗ с дугой в СЭЭС могут перейти в несимметричные из-за различного изменения длины и сопротивления электрической дуги в фазах в процессе КЗ. Кроме того, открытые токоведущие части в судовых электрических установках до 1000 В расположены, как правило, в одной плоскости.

При трехфазном несимметричном КЗ с дугой фазные напряжения в месте КЗ разные по величине, происходит смещение нейтрали СЭЭС. Расчеты сопротивления дуги и токов КЗ при этом не могут быть выполнены по формуле (2) и выражению (1), так как расчетные фазные напряжения становятся неизвестными величинами.

С помощью компьютера выполнены расчеты сопротивлений электрической дуги, суммарных сопротивлений судовой сети и токов трехфазного несимметричного КЗ в СЭЭС напряжением 0,5 кВ при расположении шин A, B, C в месте аварийного КЗ с применением символического метода. Вычисления производились путем последовательных расчетов на компьютере (микрокалькуляторе) по программе расчетов произведения и частного отделения комплексных чисел. В автоматизированных расчетах принималась одинаковая длина электрической дуги между фазами $A - B$ и $C - B$. Результаты выполненных расчетов при трехфазном аварийном КЗ с расположением шин A, B, C в месте КЗ ($L_{дAB} = L_{дCB} = 0,35$ м) представлены на рис. 3.

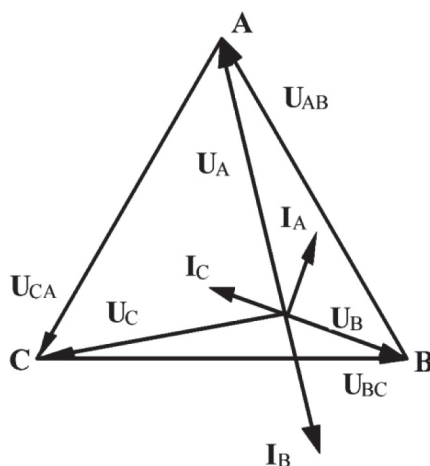


Рис. 3. Векторная диаграмма токов и напряжений при трехфазном КЗ с дугой в сети 0,5 кВ (расположение шин A, B, C в месте КЗ ($L_{дAB} = L_{дCB} = 0,35$ м))

Проведенные исследования с помощью компьютера показывают, что токи $I_A^{(3)}$ и $I_B^{(3)}$ при трехфазном несимметричном КЗ с дугой и ток $I_{11}^{(3)} = I_{11}^{(2)} \frac{2}{\sqrt{3}}$ при условном трехфазном симметричном КЗ с дугой отличаются друг от друга не более чем на 5 – 10 %. Таким образом, для вычисления токов $I_A^{(3)}$ и $I_B^{(3)}$ трехфазного несимметричного КЗ с дугой при расположении токоведущих частей СЭЭС в месте КЗ A, B, C (в одной плоскости) и одинаковой длине электрической дуги между фазами $A - B$ и $C - B$ достаточно определить ток двухфазного КЗ $I_{11}^{(2)}$ с дугой такой же длины, откуда

$$I_A^{(3)} \approx I_B^{(3)} \approx I_{11}^{(2)} \frac{2}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

Следует отметить, что при разной длине дуги между фазами $A - B$ и $C - B$ эта зависимость не выполняется и поэтому не может быть использована. Установлено, что ток в фазе C при трехфазном несимметричном КЗ с дугой резко уменьшается с увеличением длины дуги, что может

привести к погашению дуги между фазами *С* и *В* при значительно меньшей ее длине, чем $L_{д макс}$. В результате этого трехфазное несимметричное КЗ с дугой перейдет в двухфазные КЗ с дугой между фазами *А* и *В* СЭЭС.

При трехфазном несимметричном КЗ с электрической дугой появляются токи обратной последовательности [22], что следует учитывать при выборе уставок защит СЭЭС. На основании расчетов токов КЗ с учетом сопротивления электрической дуги в СЭЭС 0,38 кВ и 0,5 кВ выполнены автоматизированные расчеты уставок защит. На эксплуатируемых и модернизируемых судах изменены уставки максимальных токовых защит судовых электроустановок 0,22 кВ и 0,38 кВ, что обеспечило необходимую чувствительность при КЗ с электрической дугой на шинах резервируемых секций. На основании результатов выполненных автоматизированных расчетов на компьютере, а также практических рекомендаций, следует выполнить фиксацию мгновенного измерения тока КЗ в схемах токовых защит обратной последовательности, максимальных токовых защит 6 кВ и особенно в схемах токовых защит от замыканий на корпус судна 0,4 кВ мощных силовых трехфазных трансформаторов морского исполнения.

Выводы

1. Серию расчетов токов КЗ в СЭЭС напряжением до 1000 В следует производить с учетом сопротивления электрической дуги в месте КЗ на судах.
2. Традиционная существующая методика однократных расчетов сопротивления электрической дуги по выражению (1) не всегда обеспечивает необходимую достаточную точность и достоверность результатов расчетов для судовых электроэнергетических систем.
3. В судовой электроэнергетике предложена новая формула, расчеты по которой позволяют получать однозначные и точные значения сопротивления электрической дуги, соответствующие выражению (1). Подтверждено, что формула может быть использована для расчетов сопротивления электрической дуги в СЭЭС любого напряжения, где возможно применение выражения (1).
4. Для автоматизации, повышения производительности, упрощения, облегчения и ускорения трудоемких расчетов по формуле разработан алгоритм, предложена и реализована программа расчетов сопротивления электрической дуги с одновременным вычислением других величин на компьютере (отечественном микрокалькуляторе).
5. Уточнена и скорректирована типовая методика расчетов токов КЗ с учетом сопротивления электрической дуги в месте замыкания на судах речного и морского флота в СЭЭС до 1000 В. В СЭЭС, в соответствии с типовыми решениями, максимальная токовая защита и токовая защита от замыканий на корпус судна не обеспечивают необходимой чувствительности при КЗ с электрической дугой в конце шин резервируемых секций.
6. Предложенное аналитическое определение сопротивления электрической дуги, суммарных сопротивлений судовой сети и токов КЗ в СЭЭС по разработанной структурной схеме с реализацией на компьютере (микрокалькуляторе) соответствует наиболее оптимальному методу решения проблемы.

Научная новизна заключается в том, что разработанная методика определения КЗ с учетом сопротивления электрической дуги в СЭЭС может быть применена к судам различного назначения с целью оптимизации выбора уставок защит и повышения электропожаробезопасности. Кроме того, результаты выполненных исследований могут использоваться при создании электронных тренажеров, отрабатывающих выполнение задачи по выбору уставок защит электроэнергетических систем на судах морского и речного флота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приходько В. М. Ограничение аварийных токов в судовых электрических комплексах: науч. монография / В. М. Приходько. — СПб.: СПбГУВК, 2010. — 425 с.

2. *Приходько В. М.* Методы и технические средства комплексных испытаний элементов судовых электроэнергетических систем в судостроении и судоремонте: монография / В. М. Приходько. — СПб.: ИПЦ СПбГУВК, 2005. — 348 с.
3. *Приходько В. М.* Интенсификация комплексных испытаний судового электрооборудования по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте: монография / В. М. Приходько. — СПб.: СПбГУВК, 2013. — 244 с.
4. *Приходько В. М.* Вероятностное описание характеристик срабатывания защиты судовых электроэнергетических систем / В. М. Приходько, И. В. Приходько, В. Ю. Лучкин // Речной транспорт (XXI век). — 2016. — № 1 (77). — С. 49–52.
5. *Приходько В. М.* Вероятностное описание режимов работы судовых электроэнергетических систем и токов коротких замыканий / В. М. Приходько, И. В. Приходько, В. Ю. Лучкин // Речной транспорт (XXI век). — 2015. — № 5 (76). — С. 59–61.
6. *Лучкин В. Ю.* Вероятностные характеристики режимов и токов коротких замыканий судовых электроэнергетических систем / В. Ю. Лучкин, И. В. Приходько, В. М. Приходько // Материалы VI Межвузовской науч.-практ. конф. аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России», 14 мая 2015 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — С. 226–231.
7. *Приходько В. М.* Устройство для ограничения тока короткого замыкания в электроэнергетической установке / В. М. Приходько, Д. В. Вилесов // Авторское свидетельство СССР на изобретение № 649097. — Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1979. — № 7.
8. *Приходько В.* Защита судовых электросистем / В. Приходько // Речной транспорт. — 1983. — № 8. — С. 31–32.
9. *Приходько В. М.* Быстродействующее тиристорное защитное шунтирующее устройство для повышения пожаробезопасности судовых ЭЭС / В. М. Приходько // Повышение безопасности судовых электроэнергетических систем: сб. НТО им. акад. А. Н. Крылова. — Л.: Судостроение, 1981. — Вып. 339. — С. 25–28.
10. *Приходько В. М.* Автоматизация проектирования тиристорного токоограничителя шунтового типа для автономных электроэнергетических систем / В. М. Приходько // Автоматизация проектирования электротехнической части судна: сб. ВНТО им. акад. А. Н. Крылова. — Л.: Судостроение. — 1988. — Вып. 461. — С. 45–53.
11. *Приходько В. М.* Оценка влияния тиристорного токоограничителя на ударные токи коротких замыканий в судовых электроэнергетических системах / В. М. Приходько, И. В. Бобин // Материалы международной науч.-практ. конф., посвященной 200-летию подготовки кадров для водного транспорта России «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление», 1–2 октября 2009 года. — СПб.: ФГОУ ВПО СПбГУВК, 2009. — С. 151–156.
12. *Мелкауи Х.* Методы и средства комплексных испытаний электрооборудования по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Х. Мелкауи. — СПб.: ФГОУ ВПО СПбГУВК, 2012. — 23 с.
13. *Приходько В. М.* Коммутационно-защитные аппараты на базе полупроводниковых приборов / В. М. Приходько, П. А. Смирнов, М. В. Спиридонов // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: межвузовский сб. науч. тр. — СПб.: ГОУ ВПО СПбГТУРП, 2008. — С. 102–108.
14. *Зятин В. М.* Расчеты токов короткого замыкания с учетом сопротивления электрической дуги в месте замыкания в сетях до 1000 В / В. М. Зятин, В. И. Поляхов // Электрические станции. — 1988. — № 12. — С. 65–73.
15. *Федосеев А. М.* Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 528 с.
16. *Чернобровов Н. В.* Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 800 с.
17. *Джамо А.* Метод управляемой сушки асинхронных электродвигателей по энергосберегающей технологии при судоремонте: автореф. дис. ...канд. техн. наук / А. Джамо. — СПб.: ИПЦ ФГОУ ВПО СПбГУВК, 2004. — 24 с.
18. *Приходько В. М.* Управление переходными процессами в аварийном режиме короткого замыкания дизель-генераторных судовых электроэнергетических систем / В. М. Приходько // Наука и техника на речном транспорте. — 2001. — № 8. — С. 11–18.

19. Мелкави Х. Ограничение аварийных токов в судовых электроэнергетических системах / Х. Мелкави, В. М. Приходько // Материалы международной науч.-практ. конф., посвященной 200-летию подготовки кадров для водного транспорта России «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление». 1 – 2 октября 2009 года. — СПб.: СПГУВК, 2010. — Книга III. — С. 137–145.
20. Курбатов П. А. Основы теории электрических аппаратов / П. А. Курбатов. — 2-е изд., перераб. — СПб.: Лань, 2015. — 592 с.
21. Барзам А. Б. Тип дистанционных защит / А. Б. Барзам // Электрические станции. — 2015. — № 2 (1003). — С. 27–30.
22. Юндин М. А. Токовая защита электроустановок / М. А. Юндин. — 2-е изд., испр.—СПб.: Лань, 2016. —288 с.

FEATURES OF PAYMENTS CURRENT SHORT CIRCUIT IN VIEW OF RESISTANCE ARC IN THE SHIP ELECTRIC POWER SYSTEM

The article shows that the optimal design of modern automated marine power system to a significant extent, is determined by how accurately reflected the characteristics of the transients, accidental short circuits in the network and, in particular, when close to the ship generating units damage. Identified and confirmed that each of the multiphase circuit is in one way or another duality. In the Autonomous (ship, ship) power system typical characteristics of non-simultaneous (sequential) circuits are increased shock currents and delays the passage of current through zero. This article developed a method of short circuit calculations taking into account the resistance of the electric arc in marine power systems, which can improve their electrical and fire safety. Considered a significant influence on the magnitude of the short-circuit current in ship electric power systems the resistance of the electric arc in place of a short-circuit on the vessel, which increases with the ratio of the length of arc in meters to the ship's mains voltage in kilovolts, and also with the increase in the active resistance phase electrical network to the place of short circuit. Performed short circuit calculations taking into account the resistance of the electric arc for ship electric power systems with nominal voltages of 220; 380 and 500 Volts. In the ship power sector the proposed new formula, the calculations which allow us to obtain unambiguous and accurate values of the resistance of electric arc. It is confirmed that the formula can be used to calculate the resistance of the electric arc in marine power systems of any voltage.

Keywords: ship power system, electric arc short-circuit, short-circuit current, the resistance of the electric arc, intermittent arc, two-phase short circuit.

REFERENCES

1. Prihodko, V. M. *Ogranichenie avarijnyh tokov v sudovyh jelektricheskikh kompleksah: nauch. monog.* SPb.: SPGUVK, 2010.
2. Prihodko, V. M. *Metody i tehicheskie sredstva kompleksnyh ispytaniy elementov sudovyh jelektroenergeticheskikh sistem v sudostroenii i sudoremonte: nauch. monogr.* SPb.: IPC SPGUVK, 2005.
3. Prihodko, V. M. *Intensifikacijakompleksnyhispytanijsudovogojelektrooborudovanijapojenergoberegajush hej tehnologii v sudostroenii I sudoremonte: nauch. monogr.* SPb.: SPGUVK, 2013.
4. Prihodko, V., I. Prihodko, and V. Luchkin. "Probabilistic description of activation parameters of ship's electropower systems' protection." *River transport (XXIst century)*1(77) (2016): 49–52.
5. Prihod'ko, V., I. Prihod'ko, and V. Luchkin. "Probabilistic description of operation modes of ship's electric power systems and short-circuits' currents." *River transport (XXIst century)*5(76) (2015): 59–61.
6. Luchkin, V. Ju., I. V. Prihodko, and V. M. Prihodko. "Veroyatnostnye harakteristiki rezhimov i tokov korotkih замыkaniy sudovyh jelektroenergeticheskikh system." *Materialy VI mezhvuzovskojnauchno-prakticheskoy konferencii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendencii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii», 14 maja 2015 goda.* SPb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015: 226–231.
7. Prihodko, V. M., and D. V. Vilesov. *Ustrojstvo dlja ogranichenija toka korotkogo замыkaniya v jelektroenergeticheskoy ustanovke.* USSR assignee. Patent 649097. Otkrytija, izobretenija, promyshlennyeobrazcy, tovarnyeznaki, 1979. № 7.
8. Prihodko, V. "Zashhita sudovyh jelektrosistem." *Rechnoj transport* 8 (1983): 31–32.

9. Prihodko, V. M. "Bystrodejstvujushhee tiristornoe zashhitnoe shuntirujushhee ustrojstvo dlja povyshenija požarobezопасности sudovyh JeJeS." *Povyshenie bezопасности sudovyh jelektroenergeticheskikh sistem: sb. NTO im. akad. A.N. Krylova. L.: Sudostroenie, 1981. Is. 339. Pp. 25–28.*
10. Prihodko, V. M. "Avtomatizacija proektirovanija tiristornogo tokoogranichitelja shuntovogo tipa dlja avtonomnyh jelektroenergeticheskikh sistem." *Avtomatizacija proektirovanija jelektrotehnicheskij chasti sudna: sb. VNTO im. akad. A.N. Krylova. L.: Sudostroenie, 1988. Is. 461. Pp. 45–53.*
11. Prihodko, V. M., and I. V. Bobin. "Ocenka vlijanija tiristornogo tokoogranichitelja na udarnye toki korotkikh замыканij v sudovyh jelektroenergeticheskikh sistemah." *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskij konferencii, posvjashhennoj 200-letiju podgotovki kadrov dlja vodnogo transporta Rossii «Vodnye puti Rossii: stroitel'stvo, jekspluatacija, upravlenie», 1-2 oktjabrja 2009 goda. SPb.:FGOUVPOSPGUVK, 2009: 151–156.*
12. Melkaui, H. *Metody i sredstva kompleksnyh ispytanij jelektrooborudovanija po jenergosberegajushhej tehnologii v sudostroenii i sudoremonte. Abstract of PhD diss. SPb.: FGOUVPO SPGUVK, 2012.*
13. Prihodko, V. M., P. A. Smirnov, and M. V. Spiridonov. "Kommutacionno-zashhitnye apparaty na baze poluprovodnikovyx priborov." *Mashiny i apparaty celljulozno-bumazhnogo proizvodstva: mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. SPb.: GOUVPO SPbGTURP, 2008: 102–108.*
14. Zjatin, V. M., and V. I. Poljahov. "Raschety tokov korotkogo замыканija s uchetom soprotivlenija jelektricheskij dugi v meste замыканija v setjah do 1000 V." *Power Technology and Engineering* 12 (1988): 65–73.
15. Fedoseev, A. M., and M. A. Fedoseev. *Relejnaja zashhita jelektroenergeticheskikh sistem. M.: Jenergoatomizdat, 1992.*
16. Chernobrovov, N. V., and V. A. Semenov. *Relejnaja zashhita jenergeticheskikh sistem. M.: Jenergoatomizdat, 1998.*
17. Dzhamo, A. *Metod upravljaemoj sushki asinhronnyh jelektroprivoditelej po jenergosberegajushhej tehnologii pri sudoremonte. Abstract of PhD diss. SPb.: IPC FGOUVPO SPGUVK, 2004.*
18. Prihodko, V. M. "Upravlenie perehodnymi processami v avarijnom rezhime korotkogo замыканija dizel-generatornyh sudovyh jelektroenergeticheskikh system." *Nauka i tehnika na rechnom transporte* 8 (2001): 11–18.
19. Melkaui, H., and V. M. Prihodko. "Ogranichenie avarijnyh tokov v sudovyh jelektroenergeticheskikh sistemah." *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskij konferencii, posvjashhennoj 200-letiju podgotovki kadrov dlja vodnogo transporta Rossii «Vodnye puti Rossii: stroitel'stvo, jekspluatacija, upravlenie». 1-2 oktjabrja 2009 goda. SPb.: SPGUVK, 2010. Kniga III. Pp. 137–145.*
20. Kurbatov, P. A. *Osnovy teorii jelektricheskij apparatov. 2-d ed. SPb.: Lan, 2015.*
21. Barzam, A. B. "Tip distancionnyh zashhit." *Power Technology and Engineering* 2(1003) (2015): 27–30.
22. Jundin, M. A. *Tokovaja zashhita jelektroustanovok. 2-ded. SPb.:Lan, 2016.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Приходько Валентин Макарович —
кандидат технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
prihodki-3@yandex.ru, kaf_seu@gumrf.ru
Приходько Ирина Валентиновна —
старший преподаватель.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
prihodko-ira@yandex.ru
Лучкин Василий Юрьевич — аспирант.
Научный руководитель:
Приходько Валентин Макарович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_seu@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Prihodko Valentin Makarovich —
PhD, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
prihodki-3@yandex.ru, kaf_seu@gumrf.ru
Prihodko Irina Valentinovna —
Senior lecturer.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
prihodko-ira@yandex.ru
Lucchino Vasily Yuryevich — postgraduate.
Supervisor:
Prihodko Valentin Makarovich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_seu@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 16 сентября 2016 г.