DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-115-124
УДК 621.316.174

ФОРМИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ ВО ВРЕМЯ ДУГОВЫХ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОСИСТЕМАХ[1]

И. Е. Кажекин

Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Российская Федерация

Рассматриваются процессы при однофазных замыканиях в судовых низковольтных электроустановках при заземлении их нейтрали через реактор. В таких электроустановках при замыканиях одной из фаз на корпус из-за особенностей самого устройства заземления возможно возникновение феррорезонансных колебаний. Эти колебания оказывают влияние на процессы формирования максимальных дуговых перенапряжений при однофазных замыканиях на корпус. Исследуются условия возникновения феррорезонансных явлений в низковольтных судовых электросетях. Проанализированы процессы в феррорезонансном контуре, выявлены начальные условия, необходимые для их возбуждения. Рассмотрены процессы, приводящие к формированию в электросети начальных условий, достаточных для появления феррорезонансных колебаний при замыкании фазы на корпус. Формирование условий возбуждения феррорезонанса обусловлено особенностями поведения низковольтной заземляющей дуги и последующими переходными процессами в контуре нулевой последовательности. Возникновение максимальных перенапряжений, сопровождающихся феррорезонансными процессами, происходит при поведении заземляющей дуги, соответствующем теории Петерса и Слепяна, т. е. при ее гашении в момент близкий к переходу через нулевое значение принужденной составляющей тока однофазного замыкания. Такое поведение дуги приводит к повышенным напряжениям на элементах устройства заземления нейтрали. В результате существенно увеличивается напряжение смещения нейтрали по постоянному потенциалу. На основе величины напряжения смещения нейтрали по постоянному потенциалу произведена оценка влияния феррорезонансных колебаний на максимальные перенапряжения, возникающие на здоровых фазах. Приведенные выражения позволяют провести вычисления максимальных значений дуговых перенапряжений. Достоверность предложенной методики расчета перенапряжений подтверждена выполненными исследованиями на физической модели судовой электрической сети.

Ключевые слова: однофазные замыкания, перенапряжения, феррорезонансные процессы, судовые электросети, заземляющая дуга.

Для цитирования: *Кажекин И. Е.* Формирование максимальных перенапряжений при возникновении феррорезонансных процессов во время дуговых однофазных замыканий в низковольтных судовых электросистемах // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 1. С. 115–124. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-115-124.

Введение

Согласно статистике большинство используемых в настоящее время российских судов превышает расчетные сроки эксплуатации. Такая ситуация характерна для ряда отечественных флотов [1], включая рыбопромысловый [2]. Даже при должном финансировании быстрое обновление флотов невозможно, поэтому неизбежно использование судов со сверхнормативным сроком службы. Износ флота приводит к росту аварийности на объектах морской техники, сопровождающейся, как правило, более тяжелыми последствиями в сравнении с объектами береговой инфраструктуры.

К числу наиболее тяжелых аварий, возникающих на судах, следует отнести крупные пожары. Согласно исследованию [3] причины, связанные с электрооборудованием, занимают тре-

[1] Исследования процессов формирования максимальных перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях, сопровождающихся феррорезонансными колебаниями, в низковольтных электросетях выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00622.

тье место среди всей совокупности источников возникновения пожаров. Как свидетельствует анализ, проведенный в работе [4], пожарная аварийность бортовых электросистем во многом определяется режимом однофазного замыкания. Его опасность обусловлена двумя составляющими: током в месте замыкания и перенапряжениями, действующими на изоляцию неповрежденных фаз всей электросети. Обе опасности в большей степени зависят от способа заземления нейтрали. В настоящее время электрические сети большинства объектов морской техники имеют режим изолированной нейтрали. При таком режиме нейтрали токи в месте однофазного повреждения изоляции определяются ее емкостной проводимостью и напряжением сети. Как правило, величина этих токов в низковольтных судовых электросистемах не превышает нескольких ампер и в большинстве случаев такие повреждения автоматически не отключаются. Последнее приводит к тому, что время существования однофазного замыкания ограничивается лишь временем его поиска экипажем судна после срабатывания соответствующей сигнализации. При этом в месте устойчивого контакта фазы с корпусом под действием тока замыкания будет происходить нагрев, который приводит к дальнейшему развитию повреждения. В случае неустойчивого контакта фазы с корпусом на изоляцию неповрежденных фаз действуют перенапряжения, способствующие увеличению интенсивности ее старения. При наличии ослабленных участков изоляции воздействие перенапряжений приводит к их пробою, тем самым способствуя переходу однофазных повреждений в более опасные (например, междуфазные замыкания через корпус судна).

Снижению обоих составляющих опасности однофазных замыканий способствует заземление нейтральной точки судовой электросети через реактор, настроенный в резонанс с ее фазной емкостью. Такой режим нейтрали традиционно используется в береговых электросетях средних классов напряжения. Однако в бортовых электросетях, несмотря на то, что он допускается правилами Морского регистра [5] и даже имеются сведения о некоторых испытаниях реализующих его устройств в действующих судовых электросистемах, например [6], широкого применения на объектах морской техники этот режим заземления нейтрали пока не нашел. Одна из проблем внедрения и разработки устройств, осуществляющих заземления нейтрали через реактор бортовых электросетей, заключается в возможности возникновения феррорезонансных явлений при неправильном выборе их параметров. Возникновение феррорезонанса сопровождается сверхтоками в месте замыкания и значительным повышением перенапряжений. *Целью настоящей работы* является анализ процессов формирования перенапряжений при однофазных неустойчивых дуговых замыканиях в условиях возникновения феррорезонансных колебаний в судовых электроустановках с нейтралью, заземленной через реактор.

Особенности заземления нейтрали низковольтных судовых электросистем

Обязательным условием эксплуатации низковольтных судовых электросистем является непрерывный контроль состояния изоляции путем измерения его сопротивления постоянному току [5]. Традиционное заземление нейтрали электросети через реактор делает невозможным такой контроль, поскольку в этом случае щитовой мегаомметр будет измерять сопротивление реактора, во много раз уступающего сопротивлению изоляции. Для согласования заземления нейтрали с работой устройства непрерывного контроля изоляции необходимо выполнить гальваническую развязку электросети и корпуса судна по постоянному току. Такая развязка осуществляется при помощи разделительных конденсаторов, емкостное сопротивление которых значительно уступает реактивному сопротивлению всего устройства заземления [7]. Эта особенность оказывает существенное влияние на процесс формирования перенапряжений по следующим причинам:

– появляется возможность образования феррорезонансного контура при замыкании фазы на корпус судна;

– изменяется механизм образования напряжения смещения нейтрали по постоянному потенциалу после гашения заземляющей дуги, которое согласно классическим теориям определяет максимальные кратности дуговых перенапряжений.

Феррорезонансный контур, образующийся в электросистеме, включает в себя нелинейную индуктивность реактора, разделительную емкость устройства заземления нейтрали, электродвижущую силу (ЭДС) поврежденной фазы и эквивалентное активное сопротивление реактора, линии, источника и места повреждения изоляции. На рис. 1 представлена упрощенная схема электросети в режиме однофазного замыкания, в составе которой сформирован феррорезонансный контур.

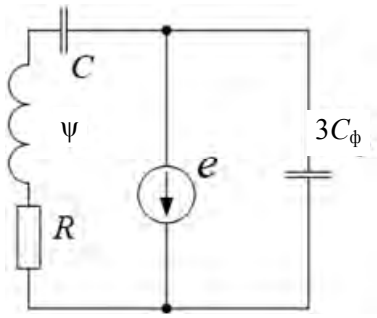


Рис. 1. Схема судовой электросети с заземленной нейтралью через реактор при однофазном замыкании на корпус: R – активное сопротивление феррорезонансного контура; e – ЭДС поврежденной фазы; C – разделительная емкость; $C_ф$ – фазная емкость электросети; ψ – потокосцепление реактора

Возникновение феррорезонанса в рассматриваемом контуре возможно при выполнении следующих условий [8]:

– сочетание разделительной емкости и индуктивности реактора в насыщенном и ненасыщенном состоянии должно соответствовать следующему неравенству

$$L_1 \geq 1/\omega C \geq L_2,$$

где L_1, L_2 – индуктивности реактора в ненасыщенном и насыщенном состоянии; ω – угловая частота сети; C – разделительная емкость устройства заземления нейтрали;

– энергия, поступающая в феррорезонансный контур, должна превышать энергию, которая рассеивается на его активном сопротивлении;

– перед образованием контура на его элементах должны сформироваться начальные условия переходных процессов, которые будут достаточными для перехода системы в феррорезонансное состояние равновесия.

Как правило, исключение феррорезонансного режима обеспечивается нарушением первых двух условий. Однако если это не выполнено, возможность появления феррорезонансных колебаний может быть оценена по начальным условиям, формирующимся в предыдущем режиме работы электроустановки. К этим условиям относятся величина тока через реактор и напряжения на разделительной емкости в момент зажигания заземляющей дуги. Определение значений указанных величин, необходимых для возникновения феррорезонанса, выполняется на основе анализа процессов в самом контуре. Для этого возможно использование как достаточно упрощенных графо-аналитических методов, так и обладающих высокой точностью, но требующих использования современной вычислительной техники численных методов решения нелинейных дифференциальных уравнений.

Анализ феррорезонансных процессов при однофазных замыканиях

Наиболее удобным методом представляется анализ процессов на основе аналитических методов. Один из таких методов основывается на описании схемы при помощи уравнения Дуффинга. Такой подход требует принятия ряда упрощений, позволяющих описать наиболее удобным способом феррорезонансный контур, изображенный на рис. 1. Процессы, протекающие в этом контуре, могут быть описаны следующим образом:

$$\frac{d\psi}{dt} + Ri + \frac{1}{C}\int idt = E_m \sin(\omega t + \varphi), \tag{1}$$

где E_m – амплитуда ЭДС поврежденной фазы; ψ – потокосцепление реактора; i – ток феррорезонансного контура; R – активное сопротивление феррорезонансного контура; C – емкость разделительных конденсаторов; ω – угловая частота сети; φ – начальная фаза ЭДС.

Нелинейный индуктивный элемент довольно часто представляется выражением на основе кубического полинома

$$i = \alpha\psi + \beta\psi^3. \tag{2}$$

Используя обозначения $\omega_0 = \sqrt{\alpha/C}$, $\psi_0 = \omega E_{m0}/\omega_0^2$, $a = \omega/\omega_0$, $x = \psi/\psi_0$, $\tau = \omega_0 t$, $\lambda = \beta/\alpha$, $\psi_0 = (\beta/\alpha)\left(\omega E_{m0}/\omega_0^2\right)^2$, $2\delta = Ra/\omega_0$, выражение (1) с учетом (2) можно привести к следующему виду:

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} + 2\delta\frac{dx}{d\tau} + x + \lambda x^3 = k\cos(a\tau + \varphi). \tag{3}$$

Уравнение (3) достаточно подробно исследовано и может быть использовано для определения условий возникновения феррорезонанса. Оно может иметь три решения. Два из них соответствуют устойчивым точкам равновесия (феррорезонансные и нерезонансные колебания), а третье решение – неустойчивому равновесию. При упрощенном расчете, учитывающем только первую и третью гармоники, решения уравнения имеют вид, проиллюстрированный на рис. 2.



Рис. 2. Решения уравнения Дуффинга в фазовых координатах:
1 – нерезонансные колебания; *2* – неустойчивое равновесие; *3* – феррорезонансные колебания

Кривая *1* отражает состояние контура в нерезонансном режиме. Неустойчивое равновесие системы характеризуется кривой *2*, а кривая *3* описывает феррорезонансные колебания в образовавшемся контуре. При этом кривую *2* можно рассматривать как границу области значений начальных условий, приводящих систему к одному из состояний. В случае выхода начальных значений параметров режима за пределы области, ограниченной этой кривой, при последующем замыкании фазы на корпус судна система переходит в состояние феррорезонанса.

Один из таких упрощенных подходов к решению уравнения Дуффинга изложен в работе [9]. Согласно этому подходу амплитуда колебаний в феррорезонансном контуре может быть найдена следующим образом:

$$A_0 = d\sqrt[3]{\frac{2k}{3\lambda}}, \tag{4}$$

где d – коэффициент, определяемый в результате решения кубического уравнения

$$d^3 - 3cd + 2 = 0, \tag{5}$$

где c – коэффициент, определяемый по выражению

$$c = \frac{4\left(\omega^2 - 1\right)}{3\sqrt[3]{12\lambda k}}. \tag{6}$$

Уравнение (5) при $c \geq 1$ имеет три корня, один из которых соответствует неустойчивому состоянию равновесия и границе значений начальных условий, приводящих к феррорезонансным колебаниям.

Возникновение феррорезонансных колебаний при горении заземляющей дуги приводит к повышению ее тока. В результате дуга становится устойчивой, ее гашение происходит только при переходе через нуль принужденной составляющей тока однофазного замыкания. Изображение характерной осциллограммы тока через место замыкания и напряжения на поврежденной фазе, полученное в ходе эксперимента в электроустановке напряжением 220 В при возникновении феррорезонанса, приведено на рис. 3.

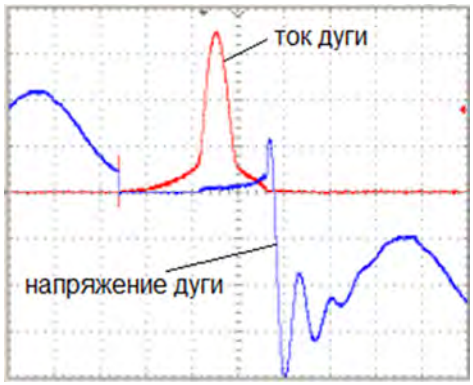


Рис. 3. Изображение осциллограмм тока и напряжения заземляющей дуги при однофазном дуговом замыкании в сочетании с феррорезонансом

Гашение дуги в указанные моменты характерно для теории Петерса и Слепяна, описывающей процесс формирования максимальных перенапряжений в электросистемах с изолированной нейтралью. При дальнейшем анализе переходных процессов при коммутациях фазы на корпус может быть использована эта теория.

При гашении дуги в этот момент мгновенное значение напряжения на разделительной емкости достигает наибольшего значения. После гашения заземляющей дуги разделительная и фазные емкости перераспределяют между собой заряд. В результате этого напряжение на нейтрали перед повторным зажиганием дуги приобретает величину, определяемую следующим выражением:

$$U_N = \frac{Cu\left(t_г\right) + C_ф\left[3e_A\left(t_г\right) + u_д\left(t_г\right)\right]}{C + 3C_ф},$$

где $u\left(t_г\right)$, $e_A\left(t_г\right)$, $u_д\left(t_г\right)$ – напряжение на разделительной емкости, ЭДС поврежденной фазы и напряжение дуги в момент гашения дуги; $C_ф$ – фазная емкость электросети.

Формирование начальных условий, достаточных для возникновения феррорезонансных колебаний, возможно в предыдущих циклах зажигания и гашения заземляющей дуги при неустойчивом контакте фазы с корпусом судна. При первых зажиганиях заземляющей дуги начальные условия не могут привести к феррорезонансу, а ток замыкания настолько мал, что гашение дуги может происходить в любой момент и часто носит характер среза [10]. Такое гашение дуги приводит к возникновению колебаний напряжения на нейтрали и тока в контуре нулевой последовательности. Схема контура, формирующегося после гашения заземляющей дуги, представлена на рис. 4.

Амплитуда и начальная фаза возникших в результате гашения дуги колебаний напряжения между нейтралью электросети и корпусом U_{Nk} может быть определена следующим образом:

$$U_{Nk} = \frac{\sqrt{\left(\Delta u_N 3C_ф\delta + \Delta i\right)^2 + \left(\Delta u_N 3C_ф\omega_0\right)^2}}{3C_ф\omega_0}, \qquad (7)$$

где Δu_N – разность между напряжением на нейтрали до и после гашения дуги; δ – коэффициент затухания; Δi – разность между током через реактор до и после гашения дуги; ω_0 – частота свободных колебаний.

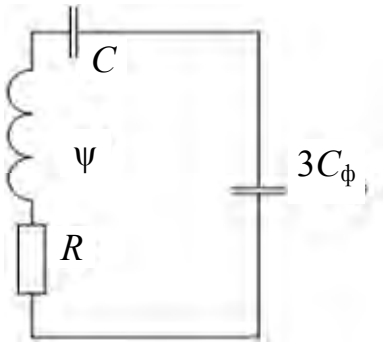


Рис. 4. Схема замещения контура нулевой последовательности после гашения дуги:
R – активное сопротивление устройства заземления нейтрали;
ψ – потокосцепление устройства заземления нейтрали

Амплитуда тока, протекающего через реактор после гашения дуги, в начальный момент времени определяется выражением

$$I = \frac{\sqrt{\left(\Delta iL\delta + \Delta u_N\right)^2 + \left(\Delta iL\omega_0\right)^2}}{3L\omega_0}. \quad (8)$$

При повторном зажигании дуги в момент, когда амплитуды колебаний в контуре нулевой последовательности имеют достаточную величину, т. е. превышают значения, определяемые выражениями (4)–(6), возможно возникновение феррорезонанса. Сопоставляя значения амплитуд колебаний в контуре нулевой последовательности, найденные по (7) и (8) с результатами расчета выражений (4)–(6), можно оценить возможность возникновения феррорезонансных колебаний. Помимо этого, на основе выражения (7) можно произвести оценку амплитуды свободной составляющей напряжения на неповрежденной фазе при очередном зажигании дуги. Амплитуда свободной составляющей напряжения здоровой фазы определяется напряжением поврежденной фазы в момент зажигания дуги, временная зависимость этого напряжения описывается следующим образом:

$$u_A\left(t\right) = E_m \sin\left(\omega t\right) + U_{Nk} e^{\delta t} \sin\left(\omega_0 t + \varphi_0\right) + U_N,$$

где E_m – амплитуда фазной ЭДС; φ_0 – начальная фаза свободных колебаний.

Расчет и экспериментальная оценка максимальных перенапряжений

Максимальные перенапряжения на неповрежденных фазах определяются выражением

$$u_{B\max} = u_{C\max} = 1{,}5E_m + u_A\left(t_3\right)\left(1-k\right)\left(1-d\right),$$

где t_3 – момент повторного зажигания дуги; $\left(1-k\right)$ – коэффициент, учитывающий влияние междуфазной емкости; $\left(1-d\right)$ – коэффициент, учитывающий затухание амплитуды свободной составляющей напряжения.

Оценка максимальных перенапряжений проводилась на физической модели. Поскольку исследуемые процессы носят вероятностный характер, для оценки наибольших перенапряжений проводилась серия однофазных замыканий. При этом регистрировалась величина напряжения смещения нейтрали по постоянному потенциалу, позволяющая оценить наибольшие перенапряжения при последующем зажигании дуги с учетом необходимого момента ее возникновения. Исследования проводились в электроустановке, схема которой представлена на рис. 5.

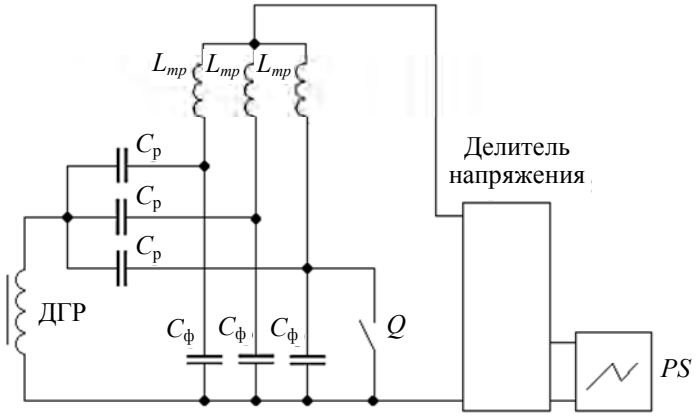


Рис. 5. Схема замещения экспериментальной установки:
$C_р$ – разделительная емкость, включенная по схеме звезда;
L_{mp} – индуктивность питающего стенд трансформатора;
ДГР – дугогасящий реактор; Q – неустойчивый контакт; PS – осциллограф

Следует отметить, что с целью возбуждения феррорезонансных колебаний в электроустановке путем формирования ненулевых начальных условий переходных процессов создавались наиболее неблагоприятные режимы, заключающиеся в повышенных значениях несимметрии фазных емкостей и степени расстройки реактора с фазной емкостью электросети в сторону перекомпенсации.

В таблице представлены значения наибольших кратностей напряжений смещения нейтрали относительно амплитуды фазной ЭДС сети E_m, полученных экспериментально и расчетным путем, а также кратности напряжений, используемых в промежуточных расчетах.

Результаты расчетов и измерений перенапряжений

Параметр	**Значение**		
Суммарная фазная емкость, мкФ	0,5	2	4
Зарегистрированные наибольшие величины напряжения смещения нейтрали	3,67 E_m	3,57 E_m	3,43 E_m
Расчетные наибольшие величины напряжения смещения нейтрали	3,6 E_m	3,58 E_m	3,55 E_m
Расчетные напряжения на разделительной емкости при феррорезонансе	3,3 E_m	3,3 E_m	3,3 E_m
Расчетные максимальные амплитуды свободной составляющей напряжения на нейтрали после гашения дуги	4 E_m	3,63 E_m	3,5 E_m
Начальные условия для возникновения феррорезонансных колебаний	1,37 E_m	1,37 E_m	1,37 E_m
Максимальные перенапряжения	6,8 E_m	6,5 E_m	6,4 E_m

Согласно табл. все теоретически выявленные возможности возникновения феррорезонанса подтвердились. Созданные в экспериментальной установке условия возбуждения феррорезонансных колебаний, рассчитанные на основе (4), оказались существенно ниже амплитуд, возникающих колебаний напряжения на нейтрали после гашения дуги, определяемых по выражению (7).

Указанные в таблице зарегистрированные значения представляют собой наибольшие величины из 500 значений, полученных для каждой емкости электросети. При этом расхождения между расчетными и экспериментальными данными не превышают 3,5 %. Такое отклонение может быть объяснено погрешностью измерительных средств, использовавшихся при регистрации напряжения смещения нейтрали и при снятии вольт-амперных характеристик нелинейного реактора, пренебрежением параметров заземляющей дуги во время ее гашения, а также вероятностным характером процесса формирования перенапряжений.

Заключение

Проведенный в работе анализ процессов при однофазных дуговых замыканиях, сопровождающихся феррорезонансными процессами, подтвердил, что максимальная кратность перенапряжений во многом определяется параметрами феррорезонансного контура. На основе проведенных исследований предлагается следующий порядок расчета максимальных перенапряжений:

– определение начальных условий для возникновения феррорезонанса;

– определение амплитуд колебаний в контуре нулевой последовательности и сопоставление их с условиями возникновения феррорезонанса;

– расчет напряжений на элементах феррорезонансного контура и напряжения смещения нейтрали;

– расчет максимальной кратности перенапряжений на неповрежденных фазах при повторном зажигании заземляющей дуги с учетом результатов вычислений по предыдущим двум пунктам.

При этом расчеты, связанные с анализом феррорезонансного контура, могут производиться различными методами в зависимости от требуемой точности.

Исследования, проведенные на физической модели со специально созданными условиями возбуждения феррорезонанса, доказали, что кратность возникающих при этом перенапряжений может достигать шести амплитуд фазного напряжения. Такие перенапряжения значительно превышают перенапряжения в электросети с изолированной нейтралью, а зарегистрированные кратности, даже в электросетях напряжением 220 В, оказываются больше допускаемых испытательных воздействий на изоляцию электрооборудования. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при разработке устройств заземления нейтрали необходимо обязательно предусмотреть меры по исключению возможности возникновения феррорезонансных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Егоров Г. В., Автутов Н. В.* Перспективы существующих судов смешанного (река – море) плавания // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. 2009. № 46 (330). С. 17–28.

2. *Жулева О. И.* К вопросу о состоянии рыбопромыслового флота Северного бассейна // Глобал. науч. потенциал. 2014. № 10 (43). С. 128–130.

3. *Подобед В. А., Панкратов А. А.* Анализ пожаров на судах рыбопромыслового флота Северного бассейна // Вестн. Мурман. гос. техн. ун-та. 2011. № 14. Т. 4. С. 728–732.

4. *Благинин В. А., Кажекин И. Е.* Профилактика аварийности отечественного рыбопромыслового флота // Безопасность жизнедеятельности. 2010. № 3 (111). С. 40–47.

5. *Электрическое* оборудование // Правила классификации и постройки морских судов. СПб.: Изд-во РМРС, 2016. Ч. XI. 130 с.

6. *Благинин В. А., Кажекин И. Е., Юсып В. М., Москалюк А. М., Сиренко Д. П.* Результаты длительных натурных испытаний устройства защитного заземления нейтрали для судовых электросистем // Вестн. Мурман. гос. техн. ун-та. 2015. Т. 18. № 1. С. 124–129.

7. *Кажекин И. Е.* Феррорезонансные процессы при однофазных замыканиях в судовых электроустановках с компенсированной нейтралью // Изв. Калининград. гос. техн. ун-та. 2019. № 52. С. 145–153.

8. *Защита* сетей 6-35 кВ от перенапряжений / под ред. Ф. Х. Халилова, Г. А. Евдокунина, А. И. Таджибаева. СПб.: Изд-во ПЭИПК М-ва энергетики РФ, 2001. 216 с.

9. *Баев С. В., Пикуш Ю. С.* Построение аналитического решения уравнения Дуффинга // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2009. № 6-7 (137). С. 43–48.

10. *Благинин В. А., Кажекин И. Е.* Перенапряжения при однофазных дуговых замыканиях на корпус в судовых низковольтных электросистемах с резонансно заземленной нейтралью // Изв. Калининград. гос. техн. ун-та. 2012. № 25. С. 207–214.

Статья поступила в редакцию 19.12.2019

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кажекин Илья Евгеньевич – Россия, 236022, Калининград; Калининградский государственный технический университет; канд. техн. наук; доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики; kazhekin@mail.ru.

GENERATING MAXIMUM OVERVOLTAGES IN FERRORESONANT PROCESSES DURING SINGLE-PHASE ARC SHORTS IN SHIP LOW-VOLTAGE ELECTRICAL SYSTEMS

I. E. Kazhekin

Kaliningrad State Technical University,
Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. The article discusses processes with single-phase faults in shipboard low-voltage electrical plants with a neutral grounded through a reactor. In such electrical plants, ferroresonant oscillations occur if one of the phases closes to the housing. The oscillations have an influence on the process of generating maximum arc overvoltages during single-phase shorts on the housing. The conditions for appearing ferroresonant phenomena in low-voltage ship electrical networks are studied. The processes in the ferroresonant circuit have been analyzed, the initial conditions necessary for their excitation have been identified. The processes causing the initial conditions in the power supply network that are sufficient for generating ferroresonant oscillations when the phase is closed to the housing have been considered. The conditions favorable for ferroresonant excitation are created due to the behavior of the low-voltage grounding arc and subsequent transient processes in the zero sequence circuit. Maximum overvoltages accompanied by ferroresonant processes occur when the grounding arc is burned in accordance with the theory of Peters and Slepian, that is, when it is extinguished at a moment close to the transition through the zero value of the forced component of the single-phase current short. The arc causes the increased voltages on the neutral grounding elements. As a result, the neutral bias voltage at a constant potential increases significantly. Based on the magnitude of the neutral bias voltage at a constant potential, the effect of ferroresonant oscillations on the maximum overvoltages arising in strong phases is estimated. The quoted formulas help to calculate the maximum values of arc overvoltages. The reliability of the proposed methodology for calculating overvoltages is confirmed by the studies performed on the physical model of the ship electrical network.

Key words: single-phase faults, overvoltages, ferroresonant processes, ship electrical networks, grounding arc.

For citation: Kazhekin I. E. Generating maximum overvoltages in ferroresonant processes during single-phase arc shorts in ship low-voltage electrical systems. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;1:115-124. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-115-124.

REFERENCES

1. Egorov G. V., Avtutov N. V. Perspektivy sushchestvuyushchih sudov smeshannogo (reka – more) plavaniya [Prospects for operating sea-river vessels]. *Trudy CNII imeni akademika A. N. Krylova,* 2009, no. 46 (330), pp. 17-28.

2. Zhuleva O. I. K voprosu o sostoyanii rybopromyslovogo flota Severnogo bassejna [To the problem of fishing fleet of Northern basin]. *Global'nyj nauchnyj potencial,* 2014, no. 10 (43), pp. 128-130.

3. Podobed V. A., Pankratov A. A. Analiz pozharov na sudah rybopromyslovogo flota Severnogo bassejna [Analysis of fires on fishing vessels of the Northern basin]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta,* 2011, no. 14, vol. 4, pp. 728-732.

4. Blaginin V. A., Kazhekin I. E. Profilaktika avarijnosti otechestvennogo rybopromyslovogo flota [Accident prevention of domestic fishing fleet]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti,* 2010, no. 3 (111), pp. 40-47.

5. Elektricheskoe oborudovanie [Electrical equipment]. *Pravila klassifikacii i postrojki morskih sudov.* Saint-Petersburg, Izd-vo RMRS, 2016. Part XI.130 p.

6. Blaginin V. A., Kazhekin I. E., Yusyp V. M., Moskalyuk A. M., Sirenko D. P. Rezul'taty dlitel'nyh naturnyh ispytanij ustrojstva zashchitnogo zazemleniya nejtrali dlya sudovyh elektrosistem [Results of long-term full-scale tests of neutral protective earthing device for marine electrical systems]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta,* 2015, vol. 18, no. 1, pp. 124-129.

7. Kazhekin I. E. Ferrorezonansnye processy pri odnofaznyh zamykaniyah v sudovyh elektroustanovkah s kompensirovannoj nejtral'yu [Ferroresonance processes during single-phase faults in ship electrical plants with compensated neutral]. *Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta,* 2019, no. 52, pp. 145-153.

8. *Zashchita setej 6-35 kV ot perenapryazhenij* [Protection of 6-35 kV networks from overvoltage]. Pod redakciej F. H. Halilova, G. A. Evdokunina, A. I. Tadzhibaeva. Saint-Petersburg, Izd-vo PEIPK Ministerstva energetiki RF, 2001. 216 p.

9. Baev S. V., Pikush Yu. S. Postroenie analiticheskogo resheniya uravneniya Duffinga [Developing analytical solution of Duffing equation]. *Visnik Pridniprovs'koï derzhavnoï akademiï budivnictva ta arhitekturi,* 2009, no. 6-7 (137), pp. 43-48.

10. Blaginin V. A., Kazhekin I. E. Perenapryazheniya pri odnofaznyh dugovyh zamykaniyah na korpus v sudovyh nizkovol'tnyh elektrosistemah s rezonansno zazemlennoj nejtral'yu [Overvoltage during single-phase arc shorts on housing in low-voltage electrical systems with resonantly grounded neutral]. *Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta,* 2012, no. 25, pp. 207-214.

The article submitted to the editors 19.12.2019

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kazhekin Ilia Evgenievich – Russia, 236022, Kaliningrad; Kaliningrad State Technical University; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Electrical Equipment of Ships and Electrical Power Engineering; kazhekin@mail.ru.