



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ НА УСТАНОВИВШИЙСЯ ТОК ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ

А. В. Лобанова, студентка,
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»
e-mail: a.lobanova199708@mail.ru

Рассмотрено влияние междуфазной емкости на величину установившегося тока однофазного замыкания через переходное сопротивление. Исследования проведены на основе метода эквивалентного генератора. Полученные выражения позволяют проанализировать влияние различных факторов на величину тока однофазного замыкания, включая сопротивление в месте замыкания.

Однофазные замыкания, режим нейтрали, установившиеся процессы, электрический ток, пожароопасность

Развитие современного флота неизменно связано с постоянным ростом электроэнерговооруженности судов [1], что характерно как для объектов морской техники, так и для речного транспорта. Эта закономерность сопровождается ухудшением некоторых эксплуатационных показателей судовых электроэнергетических систем, влияющих на их безопасность. К таким показателям в первую очередь относится ток однофазного замыкания.

В бортовых электроустановках, согласно [2-3], преимущественно используется режим изолированной нейтрали, который характеризуется небольшими величинами тока в месте замыкания одной из фаз на корпус, определяемой емкостью сети. Малая величина тока однофазного замыкания, значительно уступающая показателям тока короткого замыкания и сопоставимая с величиной тока нагрузки, делает этот вид замыкания неотключаемым. Длительно протекающие токи в месте повреждения изоляции способствуют его нагреву вследствие выделения Джоулева тепла или дуговых процессов. Повышение этих токов, с одной стороны, недостаточно для срабатывания защиты на отключение, а с другой – способствует увеличению количества выделяемого тепла в месте повреждения и, как следствие, возникновению пожара.

Одним из способов защиты от действия таких токов является заземление нейтрали судовых электроустановок через реактор. Этот способ защиты нашел отражение в нормативных документах [2-3], но его применение может привести к ряду негативных последствий [4]. В результате, при неправильном выборе параметров устройства заземления нейтрали вместо улучшения показателей, характеризующих пожаробезопасность, может произойти их ухудшение. В частности, возможно повышение величины тока однофазного замыкания, а также максимальных кратностей дуговых перенапряжений, которые также способствуют развитию пожаров [5].

Об опасности судовых пожаров и актуальности исследований, направленных на их предотвращение и исключение возможности возникновения, можно судить по статистике мирового флота [6], приведенной на рис. 1.

Как видно из рисунка 1, ежегодно около 7-8% аварий, происходящих на объектах морской техники, – это пожары. Из них, согласно [7], свыше 18% случаев возникновения пожаров могут быть связаны с электрооборудованием.

Поскольку величина емкости электросети оказывает влияние как на ток однофазного замыкания, так и на дуговые перенапряжения [8], весьма важным для обеспечения безопас-

ности представляется ее исследование. Как правило, при оценке тока однофазного замыкания учитывается лишь емкость, сформированная между фазами электроустановки и землей (корпусом судна). Целью выполненной работы является оценка влияния на установившееся значение этого тока емкости, образующейся между различными фазами электрооборудования.

ОПИСАНИЕ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ

Судовая электроэнергетическая система представляет собой совокупность источников электроэнергии, распределительных устройств, преобразователей и потребителей и может быть представлена в виде следующей эквивалентной схемы замещения (рис. 2).

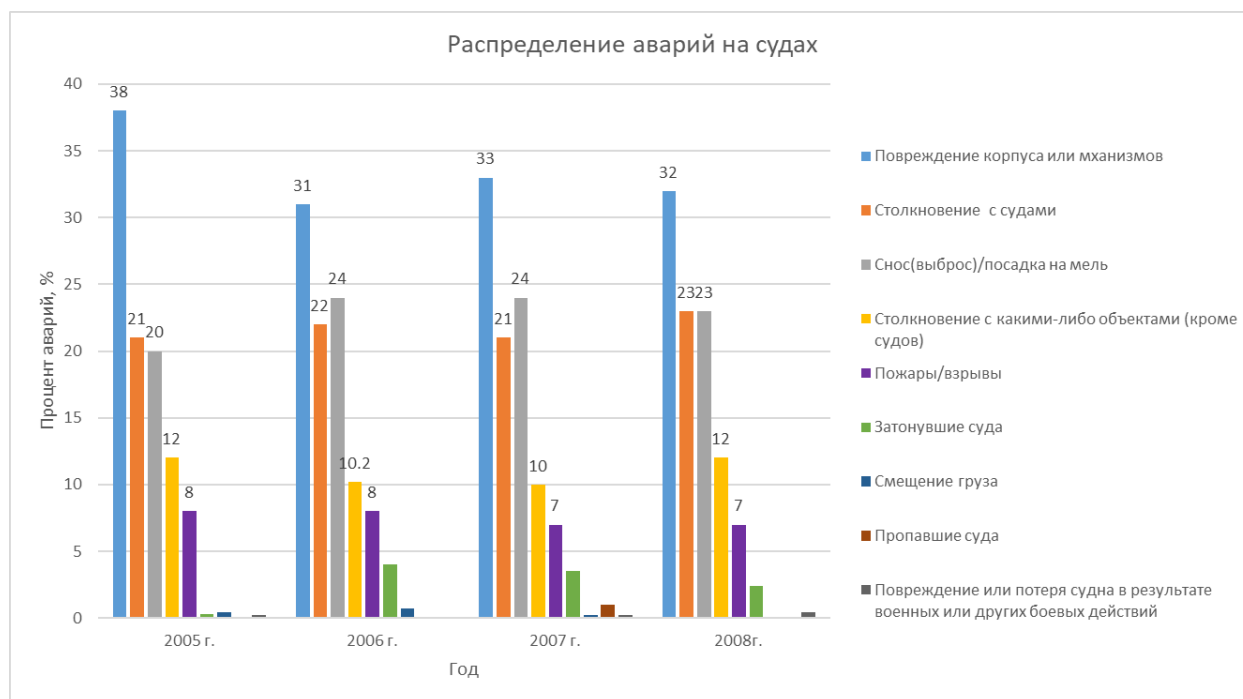


Рисунок 1 – Распределение видов аварий на судах мирового флота

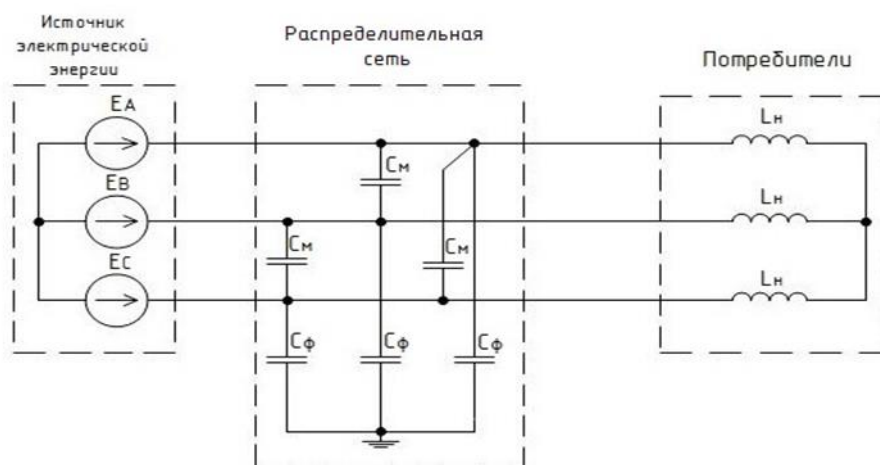


Рисунок 2 – Схема замещения судовой электроэнергетической установки:
 C_M – междуфазная емкость; C_ϕ – фазная емкость; E_A – ЭДС фазы A;
 E_B – ЭДС фазы B; E_C – ЭДС фазы C; L_N – индуктивность нагрузки

Путем эквивалентных преобразований треугольник междуфазных емкостей может быть представлен в виде соединения по схеме «звезда». Такие преобразования выполняются в соответствии со следующими выражениями.

$$C_{M1} = C_{12} + C_{13} + C_{12} \cdot \frac{C_{13}}{C_{23}}, \quad (1)$$

$$C_{M2} = C_{12} + C_{23} + C_{12} \cdot \frac{C_{23}}{C_{13}}, \quad (2)$$

$$C_{M3} = C_{13} + C_{23} + C_{13} \cdot \frac{C_{23}}{C_{12}}, \quad (3)$$

где C_{M1}, C_{M2}, C_{M3} – эквивалентная межфазная емкость цепи;
 C_{13} – междуфазная емкость фаз A и C ;
 C_{12} – междуфазная емкость фаз A и B ;
 C_{23} – междуфазная емкость фаз C и B .

Учитывая, что в рассматриваемой схеме все междуфазные емкости равны друг другу, значения емкостей эквивалентной звезды могут быть представлены в виде тройной междуфазной емкости:

$$C_M' = C_M + C_M + C_M \cdot \frac{C_M}{C_M} = 3C_M. \quad (4)$$

Таким образом, исходная схема может быть представлена в следующем виде (рис. 3):

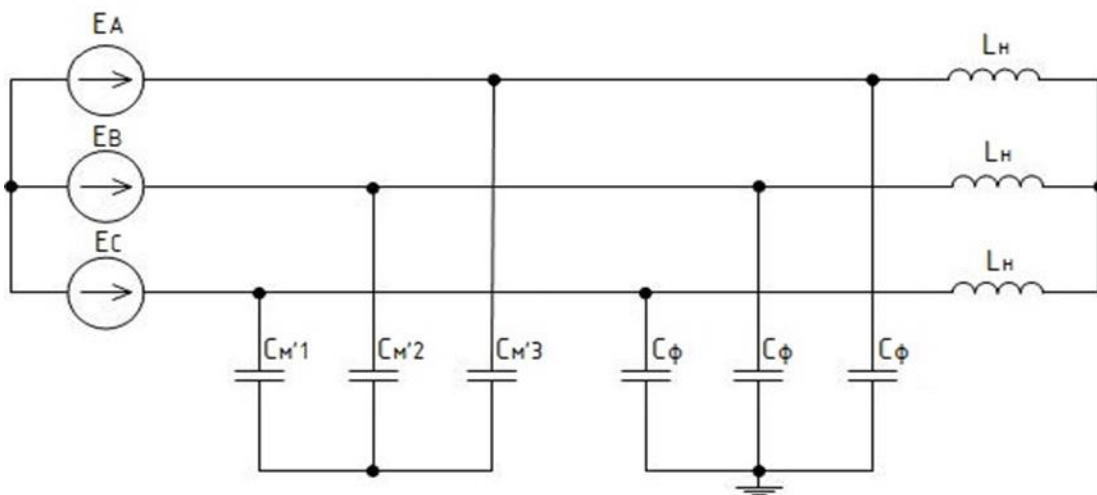


Рисунок 3 – Схема после преобразования междуфазных емкостей треугольник – звезда

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОСИСТЕМЫ НА ТОК ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ

Анализ проведен на основе метода эквивалентного генератора. Для этого схема, изображенная на рис. 3, дополнена переходным сопротивлением в месте замыкания фазы A на корпус судна. В результате расчетная схема приобрела следующий вид (рис. 4).

В рассматриваемой схеме можно объединить две неповрежденные фазы, которые оказываются соединенными параллельно друг другу. В результате параметры преобразованных участков цепи приобретают следующие значения:

$$C_M' + C_M' = 2C_M', \quad (5)$$

$$C_\Phi + C_\Phi = 2C_\Phi, \quad (6)$$

$$E_{AЭКВ} = \frac{E_B \gamma_{\Phi} + E_C \gamma_{\Phi}}{\gamma_{\Phi} + \gamma_{\Phi}} = \frac{E_C + E_B}{2} = -\frac{E_A}{2}, \quad (7)$$

$$\frac{L_H \cdot L_H}{L_H + L_H} = \frac{L_H}{2}. \quad (8)$$

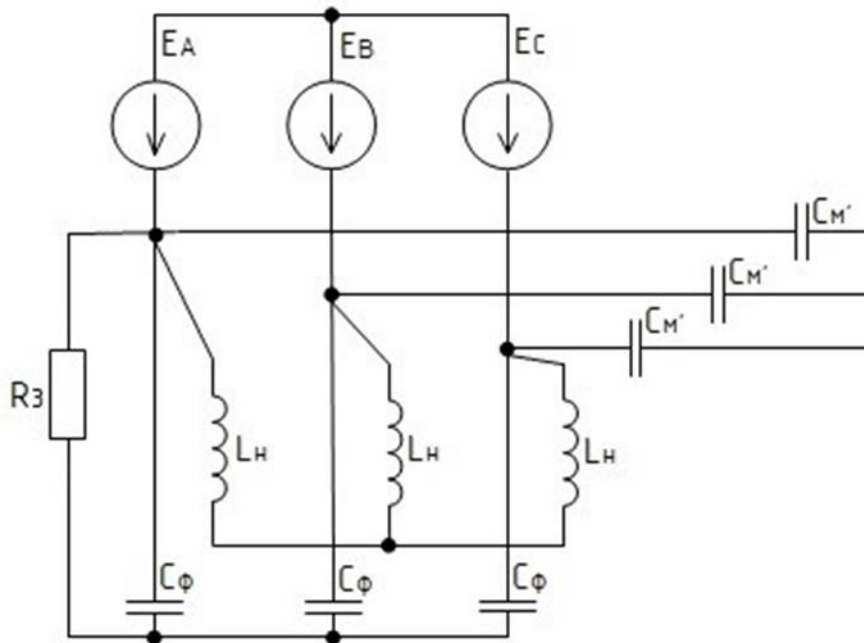


Рисунок 4 – Схема для расчета по методу эквивалентного генератора

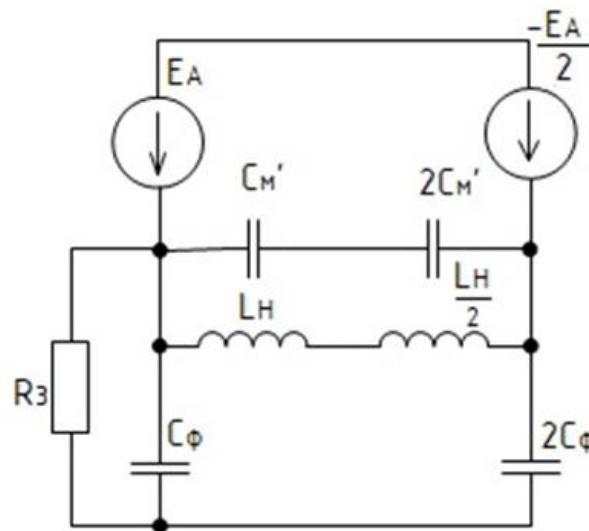


Рисунок 5 – Схема после первого этапа упрощения

Последовательно соединенные ЭДС поврежденной фазы *A* и эквивалентная ЭДС двух неповрежденных фаз на рис. 5 могут быть объединены при помощи следующего выражения:

$$E_{ЭКВ} = E_A - \left(-\frac{E_A}{2}\right) = \frac{3}{2} E_A \quad (9)$$

В результате схема приобретает вид, представленный на рис. 6.

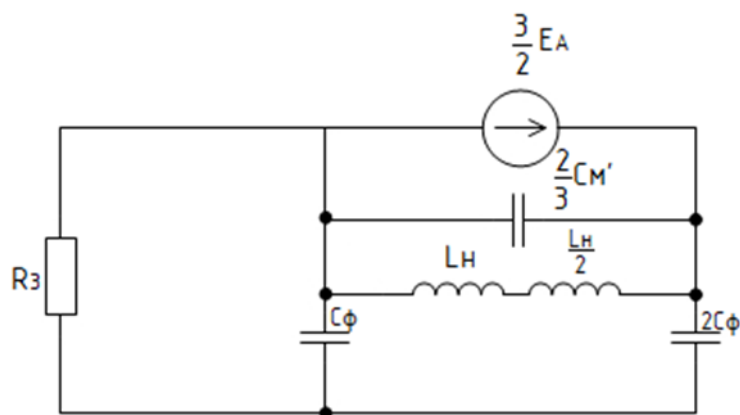


Рисунок 6 – Схема после второго этапа упрощения

Согласно методу эквивалентного генератора ток через место замыкания I_{03} может быть найден по формуле:

$$I_{03} = \frac{U_{XX}}{R_3 + Z_{BX}}, \quad (10)$$

где U_{XX} – напряжение холостого хода;
 I_{03} – ток через место замыкания;
 R_3 – переходное сопротивление в месте замыкания фазы A на корпус судна;
 Z_{BX} – входное сопротивление.

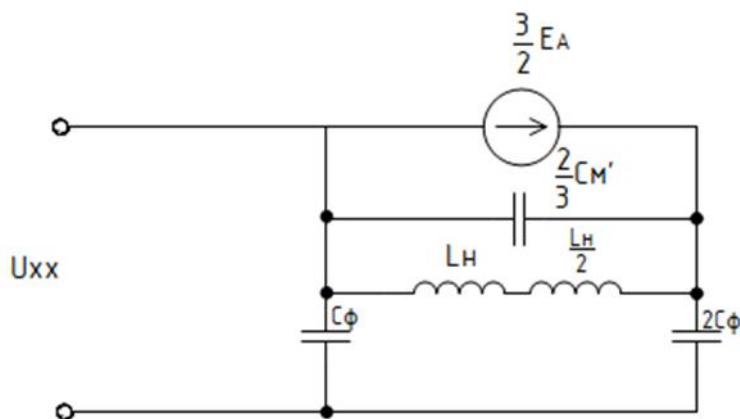


Рисунок 7 – Схема для определения напряжения холостого хода

Согласно схеме, изображенной на рис. 7, эквивалентная ЭДС распределяется между емкостями поврежденной фазы и неповрежденных фаз, которые в режиме холостого хода оказываются включенными последовательно. В результате величина напряжения U_{XX} свидетельствует о падении напряжения на емкости поврежденной фазы, которое можно определить по формуле:

$$U_{XX} = \frac{3}{2} E_A \cdot \frac{2}{3} = E_A = E_\Phi. \quad (11)$$

Входное сопротивление $Z_{вх}$ находится из режима короткого замыкания. В таком режиме все источники шунтируются накоротко и схема, изображенная на рис. 6 приобретает следующий вид (рис. 8).

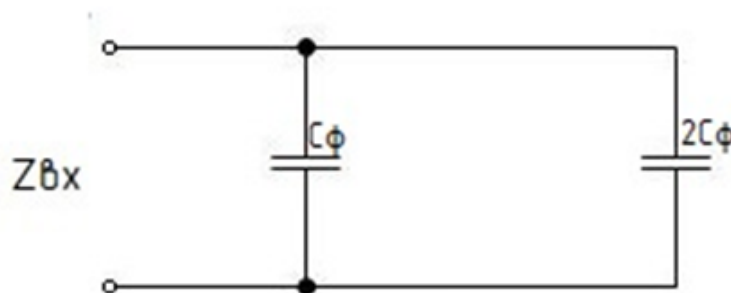


Рисунок 8 – Упрощённая схема в режиме короткого замыкания

Входное сопротивление $Z_{вх}$ двухполюсника, изображенного на рис. 6, рассчитывается по формуле:

$$\frac{1}{Z_{вх}} = \frac{1}{j\omega C_{\Phi}} + \frac{1}{j\omega 2C_{\Phi}} = j\omega 3C_{\Phi}. \quad (12)$$

Подставляя в (10) выражения для напряжения холостого хода (11) и входного сопротивления (12), можно перейти к описанию величины тока однофазного замыкания I_{03} :

$$I_{03} = \frac{E_{\Phi}}{R_3 + \frac{1}{j\omega 3C_{\Phi}}}. \quad (13)$$

При глухом однофазном замыкании, т.е. $R_3=0$, выражение (13) приобретает следующий вид:

$$I_{03} = E_{\Phi} \cdot j\omega 3C_{\Phi}. \quad (14)$$

Как видно из выражений (13)-(14), даже при ненулевом значении переходного сопротивления в месте замыкания фазы на корпус, на ток, протекающий в месте повреждения изоляции, не оказывают влияние ни параметры нагрузки, ни схема соединения источника или потребителей, ни междуфазная емкость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что в электросетях с изолированной нейтралью на величину установившегося тока однофазного замыкания на землю или заземленный корпус судна не оказывает никакого влияния ни величина междуфазной емкости, ни нагрузка, соединяемая по любой из схем, если нейтраль этой схемы не имеет контакта с землей. Величина тока в месте замыкания зависит только от значений фазной емкости электросети, ее частоты, амплитуды или действующего значения ЭДС источника, а также переходного сопротивления в месте замыкания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благинин, В. А. Прогнозирование дуговых перенапряжений в судовых электросетях низких и средних классов напряжений / В. А. Благинин, И. Е. Кажекин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. № 2. – С. 247–250.
2. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI. Электрическое оборудование. – Санкт-Петербург: Российский Морской Регистр Судоходства, 2016. – 130 с.
3. Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов (ПКПС). [Электронный ресурс]: Российский Речной Регистр. 2018. URL: <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/rules2015/rules062018.pdf> (дата обращения: 11.03.2019)
4. Благинин, В. А. Описание феррорезонансных процессов при однофазных замыканиях в судовых электроэнергетических системах с компенсированной нейтралью / В. А. Благинин, И. Е. Кажекин // Инновации в науке и образовании – 2011: IX Междунар. науч. конф.: в 2-х ч.: сб. тр. – 2011. – Ч. 1. – С. 427–430.
5. Благинин, В. А. Экспериментальная проверка применимости известных теорий дуговых перенапряжений к судовым низковольтным электросистемам / В. А. Благинин, И. Е. Кажекин // Инновации в науке, образовании и бизнесе – 2013: XI Междунар. науч. конф.: сб. тр. – 2013. – С. 384–387.
6. Любимов, Е. В. Опасности, возникающие при тушении судовых пожаров водой в Арктике // Е. В. Любимов, А. В. Микушов, Г. В. Орлов // Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России. – 2015. – Вып. 1. – С. 47–52.
7. Подобед, В. А. Анализ пожаров на судах рыбопромыслового флота Северного бассейна // В. А. Подобед, А. А. Панкратов // Вестник МГТУ. – 2011. – Т. 14, № 4. – С. 728–732.
8. Благинин, В. А. Дуговые перенапряжения в низковольтных электросистемах с компенсацией тока однофазного замыкания / В. А. Благинин, И. Е. Кажекин // Инновации в науке и образовании – 2011: IX Междунар. науч. конф.: в 2-х ч.: сб. тр. – Ч. 1. – 2011. – С. 424–427.

RESEARCH OF THE IMPACT ELECTRICAL INSTALLATION PARAMETERS ON STEADY-STATE CURRENT OF ONE-PHASE SHORT CIRCUIT

A. V. Lobanova, four-year student,
Kaliningrad State Technical University
e-mail: a.lobanova199708@mail.ru

The article considers the impact of interphase capacitance on steady-state current value of one-phase short circuit through transient resistance. Research has been done on basis of equivalent generator technique. Given data allow to do analysis of influence of numerous factors on electric current of one-phase short circuit, including short-circuit reactance.

Single-phase short, neutral mode, steady-state transients, electric current, fire hazard