

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1063-1072

ANALYSIS OF NEUTRAL MODES ON SHIP WITH HIGH-VOLTAGE ELECTRIC POWER SYSTEMS

S. Ye. Kuznetsov, D. M. Makarov

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

The article deals with the problems of choosing the neutral mode, as well as controlling the technical condition of electrical insulation associated with the proper provision of electrical fire safety on ships with a high-voltage electric power plant. Based on the ship's documentation, the capacity of the high-voltage electric power plant was calculated. On the basis of the capacitance values found, single-phase short-circuit currents are calculated, the probability of a severe outcome of a person's touching current-carrying parts. Based on these indicators, as well as the advantages and disadvantages of the neutral modes, it is concluded that none of the modes provide the necessary electrical fire safety. This problem is supposed to be solved with the help of zero-sequence current transformers, which are installed at the ends of high-voltage switchboards. In addition, the article presents the requirements of the Russian Maritime Register of Shipping for the neutral modes. An overview of the schemes for the inclusion of measuring devices for monitoring the technical condition of insulation of ship high-voltage electric power systems is given. Using the example of the CORCOVADO tanker, the implementation and principle of the sensitive selective protection of high-voltage consumers in the case of a drop in insulation resistance of high-voltage lines (buses) is shown. The conclusion is drawn that the mode of the resisted neutral implemented on the gas tanker carrier, together with the sensitive selective protection provides the greatest electrical fire safety.

Keywords: ship, high-voltage electric power system, neutral, capacitance, short-circuit current, electrical isolation, gas carrier tanker.

For citation:

Kuznetsov, Sergey Ye., and Daniil M. Makarov. "Analysis of neutral modes on ship with high-voltage electric power systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1063–1072. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1063-1072.

УДК 629.12.066(075.8)

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ НЕЙТРАЛИ В СУДОВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

С. Е. Кузнецов, Д. М. Макаров

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

В статье рассмотрены проблемы выбора режима нейтрали, а также контроля технического состояния электрической изоляции, связанные с надлежащим обеспечением электропожаробезопасности на судах с высоковольтной электроэнергетической системой. На основании судовой документации произведен расчет емкости высоковольтной электроэнергетической системы. По найденным значениям емкостей подсчитаны токи однофазного короткого замыкания, вероятность тяжелого исхода прикосновения человека к токоведущим частям. На основании этих показателей, а также преимуществ и недостатков режимов нейтрали сделан вывод о том, что ни один из режимов не обеспечивает необходимую электропожаробезопасность. Данную проблему предполагается решать с помощью трансформаторов тока нулевой последовательности, которые устанавливаются на концах высоковольтных распределительных щитов. Кроме этого, в статье приведены требования Российского морского регистра судоходства по ре-

жиму нейтрали. Сделан обзор схем включения измерительных установок для контроля технического состояния изоляции судовых высоковольтных электроэнергетических систем. На примере танкера-газовоза "CORCOVADO" показаны реализация и принцип действия чувствительной селективной защиты высоковольтных потребителей в случае падения сопротивления изоляции высоковольтных линий (шин). Доказано, что режим резистированной нейтрали, реализованный на танкере-газовозе, в совокупности с чувствительной селективной защитой обеспечивает наибольшую электропожаробезопасность.

Ключевые слова: судно, высоковольтная электроэнергетическая система, нейтраль, емкость, ток короткого замыкания, электрическая изоляция, танкер-газовоз.

Для цитирования:

Кузнецов С. Е. Анализ режимов нейтрали в судовых высоковольтных электроэнергетических системах / С. Е. Кузнецов, Д. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1063–1072. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1063-1072.

Введение

В связи с ростом энергоооружённости и использованием электродвижения на морских судах увеличивается мощность судовых электроэнергетических систем и возникает необходимость перехода на высоковольтное напряжение (выше 1000 В). При использовании судовых высоковольтных электроэнергетических систем (ВЭЭС) особо важной является проблема обеспечения их электропожаробезопасности. Одной из основных причин электротравм и возгораний на судах являются токи однофазных замыканий (ОЗ) на корпус, которые составляют около 75 % всех электропожароопасных замыканий в судовых электроэнергетических системах [1]. Величина токов ОЗ зависит в основном от емкости ВЭЭС по отношению к корпусу (емкость составляет единицы микрофарад на три фазы) и принятого режима нейтрали ВЭЭС. Трудность выбора режима нейтрали определяется противоречием между двумя важными задачами технического характера, а именно: снижением уровня перенапряжений и уменьшением тока замыкания на корпус [2]. Длительность протекания тока замыкания на корпус, определяющая возможность повреждения электрооборудования и пожароопасность, зависит от быстродействия и селективности защиты. Вероятность возникновения ОЗ в ВЭЭС определяется техническим состоянием электрической изоляции ВЭЭС, поэтому контролю технического состояния изоляции на судах уделяется большое внимание.

В статье сделан анализ и сравнение основных режимов нейтрали (резистированного и изолированного) на примере судна танкера-газовоза «Corcovado» LNG с ВЭЭС. В результате сравнения определено, какой из режимов нейтрали решает проблему обеспечения электропожаробезопасности в совокупности с использованием чувствительной селективной защиты, основанной на применении трансформатора тока нулевой последовательности в паре с контроллером HIMAR BAY. В работе [3] доказана необходимость применения трансформатора тока нулевой последовательности в таких сложных (с многими отходящими линиями, питающимися от главных сборных шин) системах. Изложен принцип нахождения падения сопротивления изоляции в секциях ГРЩ. Приведены схемы измерительных установок для контроля технического состояния изоляции и определено, какая из них используется при контроле состояния изоляции под рабочим напряжением.

Методы и материалы

Режимы нейтрали. В высоковольтных электроэнергетических системах различают следующие основные режимы нейтрали [1], [4]: эффективно заземленная; глухозаземленная; изолированная; резистированная; компенсированная.

Эффективно заземленная нейтраль — это нейтраль трехфазной электрической сети с напряжением 1000 В и выше, соединенная с корпусом через низкоомный резистор с сопротивлением ниже емкостного сопротивления ВЭЭС, в которой коэффициент замыкания на землю не более $K_{\text{зам}} = 1,4$. Одной из основных характеристик режима нейтрали ВЭЭС является коэффициент замыкания на землю (корпус судна). Коэффициент замыкания на землю в трехфазной электрической сети — это отношение разности потенциалов между неповрежденной фазой и землей в точке

замыкания на землю другой фазы или двух других фаз и разности потенциалов между другой фазой и землей в этой точке до замыкания.

Глухозаземленная нейтраль — это нейтраль трансформатора или генератора, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление (например через трансформаторы тока). Глухозаземленная нейтраль является частным случаем эффективно заземленной нейтрали с коэффициентом замыкания на землю $K_{\text{зам}} = 1$.

Изолированная нейтраль — это нейтраль трансформатора или генератора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через приборы сигнализации, измерения, защиты, заземляющие дугогасящие реакторы (ДГР) и подобные им устройства, имеющие большое сопротивление. Для ВЭС с изолированной нейтралью коэффициент замыкания должен находиться в пределах $K_{\text{зам}} = 1,4 - 1,73$.

Резистированная нейтраль — это нейтраль генератора или трансформатора, соединенная с корпусом судна через высокоомный резистор, сопротивление которого находится в пределах от однократной до двукратной величины емкостного сопротивления изоляции трех фаз относительно корпуса.

Компенсированная нейтраль — это нейтраль генератора или трансформатора, соединенная с корпусом через ДГР, настроенный в резонанс с полной емкостью трех фаз относительно корпуса с целью компенсации емкостного тока ОЗ равным по значению индуктивным током ДГР.

При сравнении [4] сделан вывод о том, что наибольшее количество преимуществ и меньше недостатков имеет резистированная нейтраль. Экспериментально подтверждено [5], что при использовании данного режима нейтрали практически полностью устраняются дуговые перенапряжения, а также феррорезонансные явления и уменьшаются токи ОЗ. С резистированной нейтралью конкурирует компенсированная нейтраль, характеризующаяся существенно меньшими токами ОЗ. Однако на современных судах, таких как танкеры-газовозы с достаточно большим количеством мощных приемников и часто меняющейся нагрузкой, возникает необходимость автоматической настройки ДГР в резонанс с судовой электростанцией, поэтому использование резистированной нейтрали в судовых высоковольтных САЭС является более предпочтительным. Окончательный выбор режима нейтрали судовой ВЭС следует производить с учетом соответствующих требований нормативных документов и защиты от ОЗ, так как электропожаробезопасность зависит не только от режима нейтрали, но и от чувствительности, быстродействия и селективности защиты.

Согласно требованиям Российского морского регистра судоходства [6] для судовых ВЭС свыше 1000 В, допускается применение изолированной, резистированной и компенсированной (кроме нефтесборных и нефтеналивных судов) нейтрали, а полное сопротивление нейтрали должно быть таким, чтобы величина тока ОЗ составляла не менее трехкратной величины тока срабатывания каждого из примененных защит от ОЗ. Для контроля состояния электрической изоляции должны использоваться системы пофидерного контроля. Для сетей с напряжением 1000 В и более контроль состояния изоляции следует осуществлять только под напряжением с использованием пассивных методов контроля (например, с использованием трансформаторов тока нулевой последовательности).

Схемы измерительных установок и их включение. Для контроля технического состояния изоляции в состав схем измерительных установок входят: источник напряжения *I*, объект контроля *2*, т. е. электрическая изоляция, средства измерения *3* и шины, соединяющие все три элемента вместе [7]. Схемы измерительных установок могут быть следующими (рис. 1):

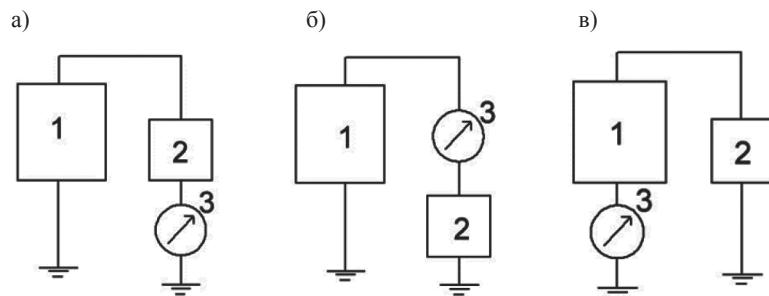


Рис. 1. Схемы включения измерительных установок: *a* — прямая; *б* — перевернутая; *в* — обратная

– прямая (рис. 1, а), в которой средство измерения (СИ) расположено между низкопотенциальным выводом изоляции объекта и заземлением. Данный вид схемы обладает наибольшей помехозащищенностью, а также применим при контроле сопротивления изоляции оборудования, находящегося под рабочим напряжением;

– перевернутая (рис. 1, б), в которой СИ включено в цепь высокого напряжения между источником и объектом. Данная схема позволяет производить измерения на оборудовании с одним заземленным выводом. Недостатком схемы является нахождение СИ под высоким напряжением;

– обратная (рис. 1, в), в которой СИ включается в цепь заземления источника напряжения. Обратная схема, как и перевернутая, позволяет производить измерения на объектах с одним заземленным выводом. Широкого применения обратная схема не получила.

При контроле состояния изоляции высоковольтной части судовой электроэнергетической системы под рабочим напряжением может быть использована только прямая схема включения, так как контроль состояния изоляции в ВЭЭС возможен лишь при наличии на объекте низкопотенциального вывода (измерительные выводы трансформаторов тока) или при изоляции нижней части конструкции от корпуса.

Контроль состояния изоляции судовой высоковольтной электроэнергетической системы на танкере-газовозе «Corcovado» LNG. Для контроля состояния изоляции высоковольтной части ВЭЭС на танкере-газовозе «Corcovado» LNG [8] применена чувствительная селективная защита, которая срабатывает при токе ОЗ 133 мА. Данная уставка по току ОЗ применена ко всем высоковольтным приемникам, кроме синхронных генераторов. Для синхронных генераторов уставка по току ОЗ составляет 267 мА. При более высоких значениях соответствующий фидер будет отключен и изолирован от других.

Устройства, при помощи которых осуществляется контроль изоляции:

Контроллер HIMAP BAY (рис. 2). Реле применяется для защиты генераторов, электродвигателей, трансформаторов, а также целых секций ГРЩ и может быть использовано при низких, средних и высоких напряжениях. С помощью контроллера HIMAP BAY задаются уставки значения тока, соответствующие заданному уровню состояния изоляции, при превышении которых срабатывает сигнализация либо происходит отключение соответствующего электрооборудования пофидерно.

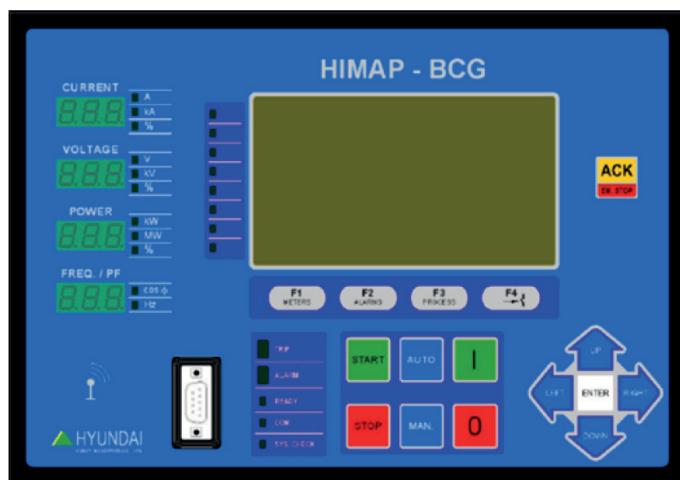


Рис. 2. Контроллер HIMAP BAY

Трансформатор нулевой последовательности, с помощью которого определяется появление тока нулевой последовательности. Первичная обмотка трансформатора соединена звездой с нулевым проводом, соединенным с корпусом. Вторичная обмотка трансформатора соединена треугольником, в ее цепь включен резистор для снижения тока короткого замыкания (рис. 3).

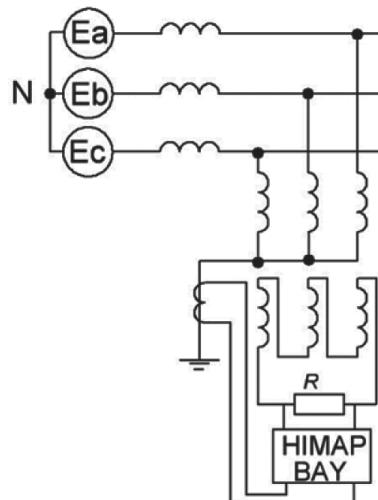


Рис. 3. Схема подключения трансформатора тока нулевой последовательности к шинам ВЭЭС

Принцип действия защиты по низкому уровню сопротивления изоляции основан на использовании реле ANSI 67, включенного в состав защит блока HIMAP BAY, с трансформатором тока нулевой последовательности. В случае замыкания фазы на корпус ОЗ суммарное значение токов в обмотке, соединенной звездой, будет не равно нулю, и появится напряжение (U_o) и ток (I_o) во вторичной обмотке трансформатора. Поврежденный фидер будет отключен. Резистор (R) используется для ограничения тока до 100 — 500 мА и выявления снижения сопротивления изоляции.

Контроль уровня технического состояния изоляции осуществляется при помощи трансформаторов нулевой последовательности в совокупности с принципом получения сигнала (падение уровня сопротивления изоляции) от разности по времени (Time of Arrival). Обычно производители главных распределительных щитов (ГРЩ) устанавливают два трансформатора нулевой последовательности, по одному в концах каждой секции ГРЩ (например, в точке 1 и 2 на рис. 4). При снижении уровня сопротивления изоляции, определяемом в точке 1, уровень старения сопротивления изоляции будет фиксироваться по всей секции ГРЩ от точки 1 к точке 2. Тем самым трансформатор нулевой последовательности, установленный в точке 1, при точке короткого замыкания, показанной на рис. 4, получит изменение уровня сопротивления изоляций первым. Исходя из этого, контроллер HIMAP BAY укажет, в какой секции ГРЩ произошло снижение уровня состояния изоляции. Далее локализация места снижения сопротивления изоляции осуществляется методом пофидерного отключения приемников от поврежденной секции ГРЩ.

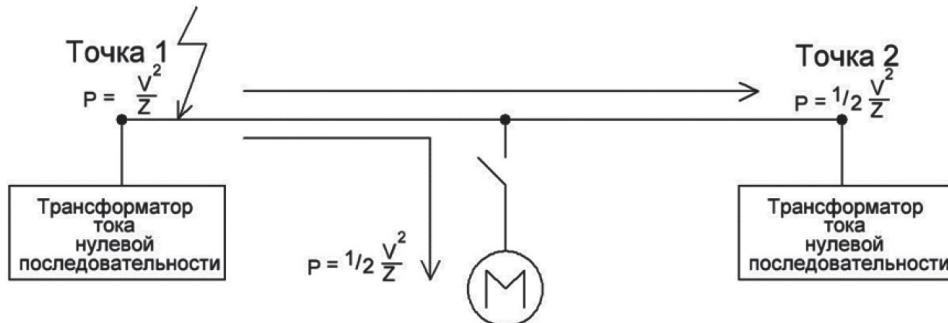


Рис. 4. Поиск падения уровня сопротивления изоляции на примере секции ГРЩ

Расчёт емкости высоковольтного судового электрооборудования судна «Corcovado» LNG. В состав единой электроэнергетической установки судна «Corcovado» LNG входят четыре дизель-генератора, в состав высоковольтной части ВЭЭС — высоковольтный ГРЩ, состоящий

из двух секций: ГРЩ 1 и ГРЩ 2, которые могут быть объединены с помощью межсекционных перемычек, а также высоковольтный грузовой распределительный щит (РЩ), состоящий из двух секций: РЩ 1 и РЩ 2, которые тоже могут быть объединены.

К ГРЩ 1 подключены: генераторы 1 и 2 ($P_{\text{нг}} = 9,389 \text{ МВт}$); главный трансформатор 1 ($P_{\text{нг}} = 3,5 \text{ МВт}$); трансформаторы электродвижения 1 и 2 ($P_{\text{нэ}} = 7,7 \text{ МВт}$); балластный насос 1 ($P_{\text{нн}} = 400 \text{ МВт}$); носовое подруливающее устройство ($P_{\text{нппу}} = 2,2 \text{ МВт}$).

К ГРЩ 2 подключены: генераторы 3 и 4 ($P_{\text{нг}} = 9,389 \text{ МВт}$); главный трансформатор 2 ($P_{\text{нг}} = 3,5 \text{ МВт}$); трансформаторы электродвижения 3 и 4 ($P_{\text{нэ}} = 7,7 \text{ МВт}$); балластные насосы 2 и 3 ($P_{\text{нн}} = 400 \text{ МВт}$).

К высоковольтному грузовому РЩ 1 подключены: грузовой трансформатор 1 ($P_{\text{нг}} = 0,7 \text{ МВт}$); грузовые насосы 1а – 4а ($P_{\text{нгр.н}} = 0,6 \text{ МВт}$); грузовой компрессор низкой производительности 1 ($P_{\text{нгр.к}} = 0,94 \text{ МВт}$); грузовой компрессор высокой производительности 1 ($P_{\text{нк.в}} = 1 \text{ МВт}$).

К высоковольтному грузовому РЩ 2 подключены: грузовой трансформатор 2 ($P_{\text{нг}} = 0,7 \text{ МВт}$); грузовые насосы 1б – 4б ($P_{\text{нгр.н}} = 0,6 \text{ МВт}$); грузовой компрессор низкой производительности 2 ($P_{\text{нгр.к}} = 0,94 \text{ МВт}$); грузовой компрессор высокой производительности 2 ($P_{\text{нк.в}} = 1 \text{ МВт}$).

По известным номинальным значениям мощностей можно рассчитать емкость каждого приемника с учетом емкости кабеля, проложенного от приемника до главного выключателя. Для этого, согласно судовой документации, были взяты параметры применяемого высоковольтного кабеля [9], а также емкости электрооборудования, которые сведены в табл. 1.

Таблица 1

Емкость кабеля от потребителя (источника) до главного выключателя

Наимено- вание	Емкость одного метра, мкФ/м	Сечение кабеля, мм^2	Длина кабеля, м	Количе- ство кабелей в фазе	Общая емкость кабеля, мкФ	Емкость электро- оборудо- вания с учетом кабеля, мкФ	Емкость элек- тробору- дования с учетом кабеля, мкФ
Высоковольтный ГРЩ 1							
Генератор 1	0,00045	120	30	4	0,054	0,17	0,224
Генератор 2	0,00045	120	31	4	0,0558	0,17	0,225
Главный трансфор- матор 1	0,000365	70	13	2	0,0095	0,000139	0,00963
Трансфор- матор электро- движения 1	0,00045	120	32	4	0,0576	0,0048	0,0624
Трансфор- матор электро- движения 2	0,00045	120	30	4	0,054	0,0048	0,0588
Балластный насос 1	0,000228	16	33	1	0,0075	0,04656	0,05406
Носовое подруливаю- щее устройство	0,00045	120	310	1	0,1395	0,15	0,2895
Общая емкость всех носителей					0,3779	0,54	0,9179

Таблица 1
(Окончание)

Высоковольтный грузовой РЩ 1							
Грузовой трансформатор 1	0,000228	16	14	1	0,0032	0,000089	0,00328
Грузовой насос 1а	0,000261	25	196	1	0,0512	0,0122	0,0634
Грузовой насос 2а	0,000261	25	145	1	0,0378	0,0122	0,05
Грузовой насос 3а	0,000261	25	89	1	0,0232	0,0122	0,0354
Грузовой насос 4а	0,000261	25	36	1	0,0094	0,0122	0,0216
Грузовой компрессор низкой производительности 1	0,000287	35	37	1	0,0106	0,028	0,0386
Грузовой компрессор высокой производительности 1	0,000321	50	39	1	0,0125	0,028	0,0405
Общая емкость всех носителей				0,148	0,104	0,252	

Для определения общей емкости кабеля относительно корпуса судна с учетом его длины от электрооборудования до главного выключателя используется формула

$$C_{\text{общ}} = 3C_k \cdot l \cdot n, \quad (1)$$

где $3C_k$ — емкость одного метра кабеля; l — длина кабеля; n — количество кабелей в фазе.

Формула для расчета емкости высоковольтного электрооборудования с соответствующими участками кабеля:

$$C = C_3 + C_{\text{общ}}, \quad (2)$$

где C_3 — емкость электрооборудования (без учета емкости кабеля).

Расчет тока однофазного замыкания. На танкере-газовозе «Corcovado» LNG нейтраль синхронных генераторов соединена с корпусом через трансформатор нулевой последовательности ($P = 350$ кВт) — см. рис. 3. Первичная обмотка трансформатора заземлена, а во вторичную обмотку включен резистор 10,6 Ом. Коэффициент трансформации равен 60,26. Несмотря на то, что резистор включен во вторичную обмотку, режим нейтрали ВЭЭС можно считать резистивенным, так как сопротивление нейтрали существенно выше емкостного сопротивления изоляции трех фаз сети.

В ВЭЭС с четырьмя раздельными высоковольтными распределительными щитами возможны следующие варианты однофазного короткого замыкания: замыкание в секции ГРЩ 1; замыкание в секции ГРЩ 2; замыкание в секции грузового РЩ 1; замыкание в секции грузового РЩ 2; замыкание в любой секции ГРЩ в то время, когда три межсекционных выключателя замкнуты, образуя единый ГРЩ.

Для высоковольтной части ВЭЭС последний вариант — наихудший из возможных, поэтому ток ОЗ рассчитывается только для него.

При расчете тока короткого замыкания для двух основных режимов используем формулу (3) для резистированной и формулу (4) для изолированной нейтрали [2]. Расчет значений тока для компенсационной нейтрали не рассматривался ввиду того, что в современных ВЭЭС с большим количеством мощных потребителей и с постоянно меняющейся нагрузкой (емкостью) обеспечить точную настройку в резонанс с емкостью ($X_C = X_L$) не представляется возможным. Возникает либо недокомпенсация, либо перекомпенсация, которая на практике достигает иногда 15 %:

$$I_3 = \frac{U_\phi}{\sqrt{(r_3 + r_0 \cdot x_c^2 / r_0^2 + x_c^2)^2 + (r_0^2 \cdot x_c / r_0^2 + x_c^2)}}, \quad (3)$$

$$I_3 = U_\phi / \sqrt{r_3^2 + x_c^2}, \quad (4)$$

где U_ϕ — фазное напряжение; r_3 — активное сопротивление в месте ОЗ; r_0 — активное сопротивление нейтрали; x_c — емкостное сопротивление;

Согласно судовой документации, значение активного сопротивления нейтрали $r_0 = 4271$ Ом. Рассчитаем емкостное сопротивление с учетом полученных значений (см. табл. 1) по формуле и получим $x_c = 1504$ Ом:

$$x_c = 1 / (2 \pi f C_c). \quad (5)$$

При расчете полагаем, что ОЗ может быть следующим: металлическое ($r_3 = 0$ Ом); замыкание через электрическую дугу ($r_3 = 50$ Ом); через тело человека ($r_3 = 850$ Ом). Результаты расчетов для двух режимов нейтрали по формулам (3) и (4) сведем в табл. 2.

Таблица 2

Ток однофазного замыкания при разных режимах нейтрали

Вид замыкания	Режимы нейтрали	
	резистивный I_3 , А	изолированный I_3 , А
Металлическое	8,07	2,53
Через электрическую дугу	7,3	2,53
Через тело человека	2,71	2,1

Расчёт вероятности смертельного поражения электрическим током. Определение полной вероятности смертельного поражения электрическим током при случайном прикосновении к находящимся под напряжением частям электрооборудования затруднено, так как полная вероятность должна включать в качестве сомножителя и саму вероятность случайного прикосновения. Поэтому существуют методы определения вероятности смертельного электропоражения при условии свершившегося факта случайного прикосновения.

Одним из способов определения вероятности $P(A)$ тяжелого исхода прикосновения человека к токоведущим частям электрооборудования в сетях 6 кВ является ее определение в зависимости от действующего значения полного тока. Для этого по приведенным значениям тока [1] получаем вероятность $P(A)$ для каждого из режима нейтрали в зависимости от времени срабатывания селективной защиты t_1 . Значения вероятности $P(A)$ от тока I_3 сведены в табл. 3.

Таблица 3

Вероятность тяжелого исхода прикосновения человека к токоведущим частям электрооборудования в зависимости от времени t_1

Режим нейтрали	$P(A)$ при $t_1 = 0,1$ с	$P(A)$ при $t_1 = 0,02$ с	$P(A)$ при $t_1 = 0,01$ с
Резистивный	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$3,85 \cdot 10^{-2}$
Изолированный	$0,3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$

Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведены значения емкостей подробно для высоковольтного ГРЩ 1 и высоковольтного грузового РЩ 1, а для ГРЩ 2 и РЩ 2 значения общей емкости кабеля, емкости электрооборудования, емкости электрооборудования с учетом кабеля можно рассчитать аналогично — для ГРЩ 2 они будут равны 0,227 мкФ; 0,4428 мкФ и 0,6698 мкФ; для РЩ 2 — 0,1726 мкФ, 0,1048 мкФ и 0,2774 мкФ соответственно.

По приведенным данным общая емкость высоковольтного электрооборудования и кабелей судна составляет $C_c = 2,117$ мкФ.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- при использовании резистированного или изолированного режима нейтрали электробезопасность должным образом не обеспечивается, так как по ГОСТ [10] максимальное значение тока не должно превышать 650 мА;

- из табл. 3 видно, что вероятность тяжелого исхода от прикосновения человека к токоведущим частям особенно высока в резистированном режиме, что является недопустимым. Поэтому, чтобы обеспечить электропожаробезопасность в соответствии с ГОСТ [10], необходимо применение быстродействующей чувствительной защиты, основанной на трансформаторах тока нулевой последовательности;

- несмотря на то, что режим изолированной нейтрали обладает меньшими значениями тока при любом из видов замыкания, а вероятность тяжелого исхода прикосновения человека к токоведущим частям электрооборудования тоже невелика, его использование не рекомендуется ввиду возрастания дуговых перенапряжений при однофазном коротком замыкании с последующим переходом в двухфазное.

Заключение

Для окончательного выбора нейтрали в каждой ВЭЭС необходимо руководствоваться рекомендациями классификационного общества (Российский морской регистр судоходства) и учитывать сочетание выбранного режима нейтрали с принципом защиты, чтобы обеспечить максимальную электропожаробезопасность. Для танкера-газовоза «Corcovado» LNG значение тока короткого замыкания через тело человека и вероятность тяжелого исхода прикосновения человека к токоведущим частям электрооборудования при изолированной нейтрали меньше, чем при резистированной. Однако при изолированном режиме нейтрали, при наиболее вероятном однофазном коротком замыкании, напряжение в двух неповрежденных фазах возрастет с номинального фазного до линейного значения и может привести к пробою изоляции с последующим переходом в двухфазное короткое замыкание, возрастанию емкостного тока в $\sqrt{3}$ раз больше номинального значения. При резистированном режиме произойдет снижение уровня дуговых перенапряжений, вплоть до их устранения и невозможности перехода ОЗ в двух- и трехфазные замыкания. Таким образом, режим резистированной нейтрали в совокупности с чувствительной селективной защитой, реализованной на танкере-газовозе, обеспечивает наибольшую электропожаробезопасность. В качестве альтернативы метода контроля сопротивления изоляции в высоковольтных системах на судах можно рассматривать метод, основанный на использовании частичных разрядов, что уже было частично рассмотрено автором [11]. Однако данный способ малоизучен и требует более детального рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Граве В. И. Электропожаробезопасность высоковольтных судовых электроэнергетических систем / В. И. Граве, В. В. Романовский, В. М. Ушаков. — СПб.: Элмор, 2003. — 159 с.
2. Ясаков Г. С. Проблемы выбора режима заземления нейтрали в высоковольтных сетях единых электроэнергетических систем кораблей и судов / Г. С. Ясаков, Д. Б. Яковлев // Морской вестник. — 2013. — № 4 (48). — С. 057–058.
3. Борковский С. О. Проблема диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю / С. О. Борковский, Т. С. Горева, Т. И. Горева // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 9–5. — С 954–959.

4. Манойлов В. Е. Основы электробезопасности / В. Е. Манойлов. — Л.: Энергоатомиздат, 1991. — 480 с.
5. Благинин В. А. Дуговые перенапряжения в судовых электросистемах с различными режимами нейтрали / В. А. Благинин, В. И. Лозовенко, И. Е. Кажекин // Известия КГТУ. — 2008. — № 13. — С. 118–121.
6. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: PMPC, 2015. — 807 с.
7. Сви П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 233 с.
8. Grounding strategy by means of ground protection transformer for Corcovado LNG. — «GE Energy», 2014. — 7 p.
9. Technical data of high voltage cable for Corcovado LNG. — «GE Energy», 2014. — 15 p.
10. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. — М.: ССБТ, 1982. — 5 с.
11. Горева Т. С. Метод анализа импульсных помех в системах электроснабжения с идентификацией структурных компонент в ортогональном вейвлете базисе / Т. С. Горева, С. Е. Кузнецов, Н. Н. Портнягин // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. — 2011. — Т. 3. — № 2. — С. 50–57.

REFERENCES

1. Grave, V. I., V. V. Romanovskii, and V. M. Ushakov. *Elektropozharobezopasnost' vysokovol'tnykh sudovykh elektroenergeticheskikh sistem*. SPb.: Elmor, 2003.
2. Yasakov, G. S., and D. B. Yakovlev. “Problemy vybora rezhima zazemleniya neutrali v vysokovol'tnykh setyakh edinykh elektroenergeticheskikh sistem korablei i sudov.” *Morskoi vestnik* 4(48) (2013): 057–058.
3. Borkovskiy, S. O., T. S. Goreva, and T. I. Goreva. “Problem of diagnostics of single-phase short circuits to earth in networks with small currents of short circuit to earth.” *Fundamental research* 9-5 (2014): 954–959.
4. Manoilov, V. E. *Osnovy elektrobezopasnosti*. L.: Energoatomizdat, 1991.
5. Blaginin, V. A., V. I. Lozovenko, and I. E. Kazhekin. “Arc an overvoltage in ship electrosystems with different modes of a neutral.” *Izvestiya KGTU* 13 (2008): 118–121.
6. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov*. SPb.: Izd-vo RMRS, 2015.
7. Svi, P. M. *Metody i sredstva diagnostiki oborudovaniya vysokogo napryazheniya*. M.: Energoatomizdat, 1992.
8. *Grounding strategy by means of ground protection transformer for Corcovado LNG*. “GE Energy”, 2014.
9. *Technical data of high voltage cable for Corcovado LNG*. “GE Energy”, 2014.
10. Russian Federation. State Standard GOST 12.1.038-82. *Elektrobezopasnost'*. Predel'no dopustimye znacheniya napryazhenii prikosnoveniya i tokov. M.: SSBT, 1982.
11. Goreva, Tatyana Sergeevna, Sergey Emelyanovich Kuznetsov, and Nikolay Nikolaevich Portnjagin. “Method of the analysis of pulse hindrances in systems of the electrical supply with identification structural the component in orthogonal wavelet basis.” *Bulletin KRASEC. Physical and mathematical sciences* 3.2 (2011): 50–57.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Сергей Емельянович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kuznecovse@gumrf.ru

Макаров Даниил Михайлович — аспирант
Научный руководитель:
Кузнецов Сергей Емельянович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: daniil.makarov.think.tank@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Sergey Ye. —
Doctor of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kuznecovse@gumrf.ru

Makarov, Daniil M. — Postgraduate
Supervisor:
Kuznetsov, Sergey Ye.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: daniil.makarov.think.tank@gmail.com