

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-106-114
УДК 621.316.97

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

А. А. Воршевский, Е. С. Гришаков

*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости при электростатическом разряде (ЭСР) наиболее остро стоит для судов, где все системы являются высокоавтоматизированными, выполненными на базе цифровой техники, которая по своему принципу действия восприимчива к ЭСР. Результаты испытаний на воздействие ЭСР судовых систем после их установки на судно позволяют сделать вывод, что для обеспечения электромагнитной совместимости недостаточно выполнять только существующие требования Российского морского регистра судоходства по устойчивости электрооборудования (ЭО) к ЭСР, которые в настоящее время подтверждаются испытаниями образцов ЭО в лаборатории. Проанализированы способы и причины возникновения ЭСР, представлены возможные накопленные потенциалы и параметры возникающих токов, напряжений и напряженностей поля при разряде. Рассматриваются существующие стандарты, предписывающие испытания на воздействие ЭСР на ЭО. Представлена схема разработанного и аттестованного генератора электростатических разрядов ЭСР-25000. Приведены наиболее частые дефекты при воздействии ЭСР. Определены эквивалентные схемы корпуса ЭО при разных длинах заземления корпуса, способах соединения крышки с корпусом. Сформулированы результаты измерений напряжений, напряженностей электрического поля и магнитного поля, проведено сравнение результатов моделирования и экспериментов. Исследуются разработанные датчики, методы их калибровки и полученные технические характеристики. Проведено исследование параметров и формы напряжения и тока ЭСР. Представлены экспериментальные исследования вторичных эффектов, возникающих при ЭСР в корпус ЭО, в соседнее оборудование, разрядах в судовой кабель, попадании помехи в питающую сеть через вторичные источники питания. Проанализированы наиболее эффективные конструктивные и схемотехнические методы защиты от воздействия ЭСР.

Ключевые слова: электростатический разряд, электромагнитная совместимость, моделирование, импульсное напряжение, датчики, калибровка, электрическое поле, магнитное поле.

Для цитирования: Воршевский А. А., Гришаков Е. С. Обеспечение электромагнитной совместимости морской техники при возникновении электростатических разрядов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 1. С. 106–114. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-106-114.

Введение

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) является научно-техническим направлением, включающим исследование возникновения, распространения, воздействия помех, разработку требований к электрооборудованию (ЭО), методов и средств их выполнения. Применение ЭО является основой в любой отрасли, но сбои ЭО из-за электромагнитной несовместимости способны привести к значительному экономическому ущербу и даже к катастрофи-

ческим последствиям. Разряды статического электричества вызывают сбои в работе ЭО и могут привести к выходу его из строя. Возможно возникновение и скрытых повреждений, которые приводят к периодической ложной работе ЭО. Достаточно одного воздействия электростатического разряда (ЭСР), чтобы вывести из строя дорогостоящий электронный прибор или уничтожить базу данных. Сбои в ответственных системах промышленных предприятий, электростанций, транспорта представляют опасность для жизни.

Материалы исследования

Статическое электричество на судне возникает при контакте с пластмассовыми изделиями, перемещении непроводящих предметов, заполнении отсеков танкеров, баков пластмассовых канистр, а также при движении обслуживающего персонала по синтетическому покрытию. Разряд накопленного заряда на металлические объекты вызывает импульсный ток и напряжение, электрическое поле (ЭП) и магнитное поле (МП), создающие в цепях оборудования наведенные напряжения, которые воздействуют на ЭО. При исследованиях ЭСР следует принимать во внимание, что напряжение разряда может составлять 2–25 кВ, напряженность МП – до 200 А/м и напряженность ЭП – до 60 кВ/м. Минимальной длительностью фронта тока считается 1 нс, но параметры реального воздушного разряда могут значительно отличаться от стандартных [1]. Необходимо исследовать формирование фронта тока при воздушных разрядах, скорости изменения тока и напряжения на металлических конструкциях.

Возникающее ЭП от заряженного объекта может также наводить напряжение между дорожками печатной платы (ПП) ЭО при открытой крышке корпуса, вызывать разряды между дорожками и нарушать работу ЭО. Токи разряда и наведенные напряжения приводят к сбоям цифровых схем [2]; ЭСР в соседние с ЭО металлические объекты создают электромагнитное поле (ЭМП), которое также влияет на схемы ЭО. Для оценки возможных напряжений и токов на металлическом корпусе ЭО необходимо разработать модель источника ЭСР, элементов корпуса, заземления, исследовать влияние вторичных эффектов от ЭСР в кабелях и конструкции ЭО.

Международная электротехническая комиссия (МЭК) устанавливает в стандарте IEC 61000-4-2 требования по проведению испытаний к ЭСР до 15 кВ. Авиационный регистр межгосударственного авиационного комитета в квалификационных требованиях КТ-160D также регламентирует испытания бортового авиационного оборудования на устойчивость к ЭСР до 15 кВ. Военные стандарты США и требования к космическому оборудованию предусматривают испытания воздействием свыше 25 кВ [3]. Российский морской регистр судоходства (РС) и Российский речной регистр (РРР) требуют проводить испытания оборудования, изготовленного для установки на морские и речные суда, на воздействие контактного разряда амплитудой 6 кВ и воздушного разряда 8 кВ. В соответствии с этими требованиями разработан, изготовлен и аттестован имитатор электростатического разряда ЭСР-25000 (рис. 1) для инициирования воздушных разрядов до 25 кВ.

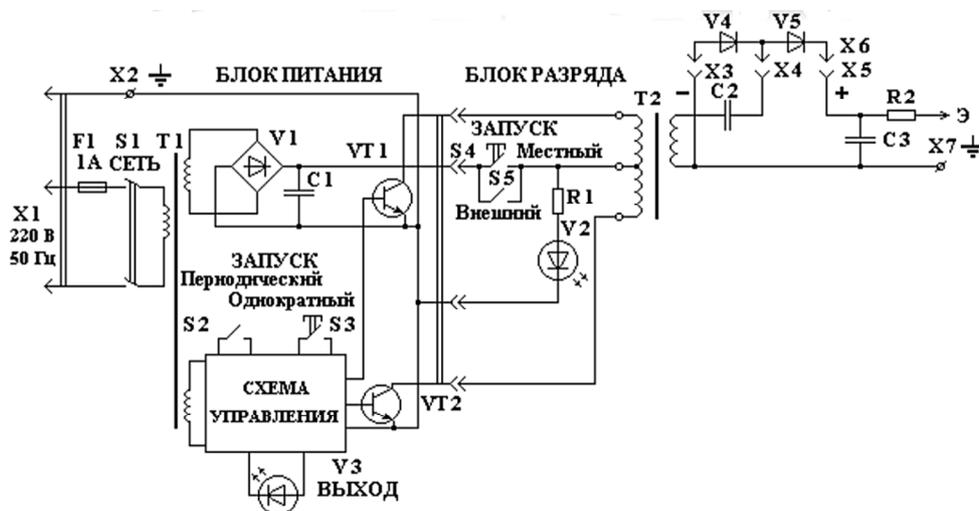


Рис. 1. Схема имитатора электростатических разрядов ЭСР-25000

Имитатор ЭСР-25000 позволяет проводить испытания изделий на устойчивость к ЭСР не только по судовым и общепромышленным требованиям, но и по специальным. ЭСР-25000 используется уже на нескольких предприятиях для испытаний и пригоден для экспериментального исследования формирования ЭСР в воздухе и влияния ЭСР на оборудование.

Результаты испытаний на устойчивость к ЭСР с 2012 по 2019 гг. более 100 образцов судового оборудования отечественных производителей с помощью разработанных имитаторов позволяют утверждать, что без учета рекомендаций и принятия мер по защите от ЭСР около 20 % оборудования не соответствует требованиям РС [4]. ЭСР-25000 подтвердил удобство в работе и эффективность при испытаниях.

Возможно разрушение узлов и комплектующих ЭО из-за теплового вторичного пробоя, расплавления металлизации, объемного пробоя, пробоя диэлектрика, поверхностного пробоя. На рис. 2 приведены разрушения радиометок после воздействия ЭСР.

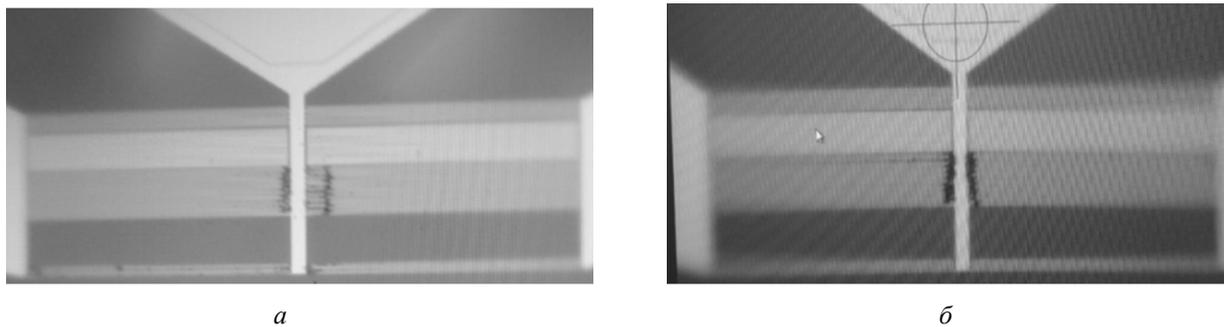


Рис. 2. Дефекты чипа радиометок после испытаний ЭСР амплитудой 4 кВ: *а* – частичный пробой диэлектрика; *б* – нарушение целостности канала при поверхностном пробое

В течение нескольких недель после воздействия ЭСР еще регистрировались периодические отказы при считывании радиометок и последующий выход их из строя.

Для прогнозирования результатов воздействия ЭСР проведено моделирование напряжения и тока на корпусе ЭО и напряженности полей внутри корпуса. На рис. 3 представлена эквивалентная схема для моделирования изменения напряжения на корпусе ЭО при ЭСР.

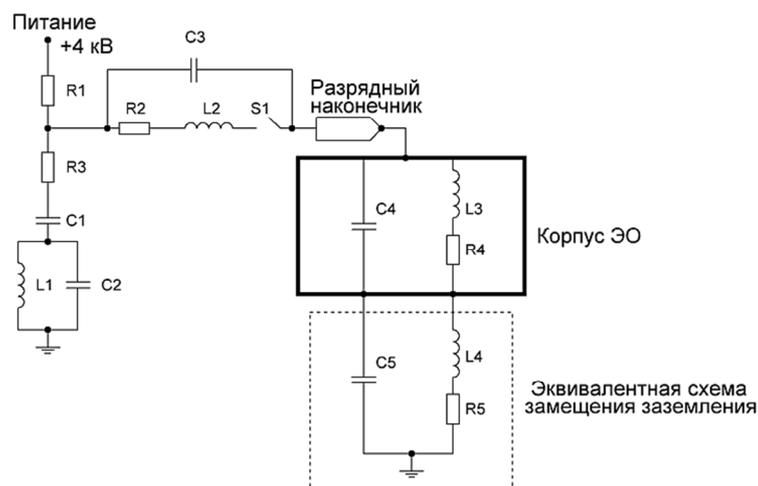


Рис. 3. Эквивалентная схема для моделирования изменения напряжения на корпусе ЭО при ЭСР

Корпус и цепь заземления моделируются конденсаторами $C4 = 40\text{--}150$ пФ, $C5 = 5\text{--}15$ пФ; индуктивностями $L3$, $L5$, составляющими от 10 нГн до 1 мкГн; резисторами $R4 = 0,01\text{--}0,1$ и $R5 = 0,1\text{--}1$ Ом.

Графики зависимости амплитуды напряжения на корпусе ЭО от возможных значений индуктивности проводника заземления представлены на рис. 4.

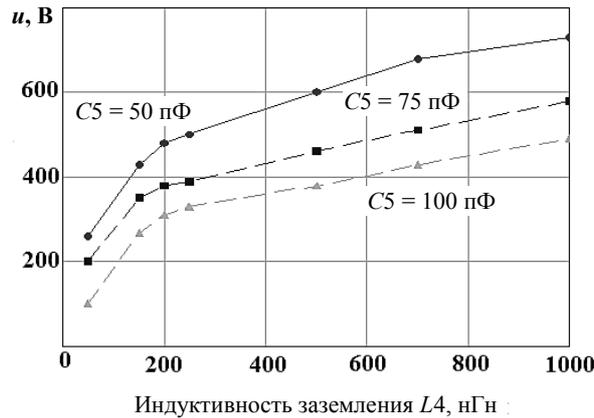


Рис. 4. Зависимости напряжения на корпусе ЭО при ЭСР от возможных значений индуктивности проводника заземления при различной емкости корпуса ЭО относительно листа заземления

Для корпуса с размерами $480 \times 360 \times 180$ мм $C_4 = 8$ пФ, $C_5 = 68$ пФ, а для длины заземления – 20 см $L_4 = 50$ нГн. Для уменьшения амплитуды напряжения на корпусе более чем в 10 раз необходимо, чтобы индуктивность заземления не превышала 0,1 мкГн.

На рис. 5 представлены возможные варианты соединения верхней крышки с основанием корпуса ЭО и зависимость напряженности ЭП внутри корпуса ЭО для разных типов соединения крышки с корпусом.

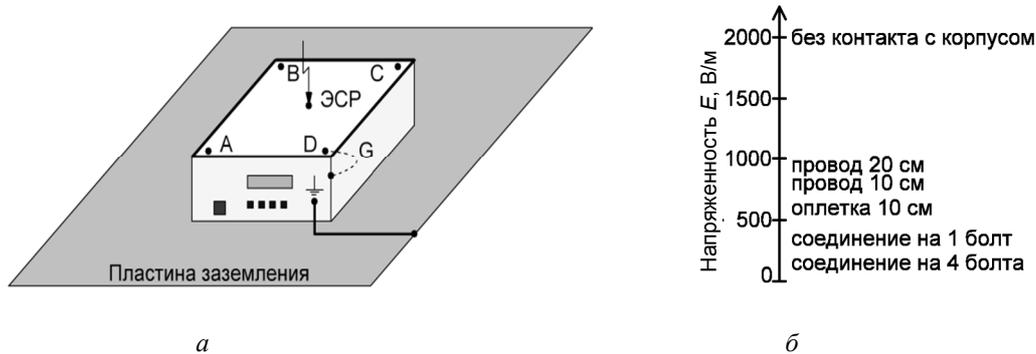


Рис. 5. Возможные варианты соединения верхней крышки с основанием корпуса ЭО (а) и зависимость напряженности E внутри корпуса от качества соединения крышки с корпусом (б)

Напряжение на корпусе и напряженности ЭП внутри корпуса при ЭСР могут быть рассчитаны с помощью модели изменения напряжения на корпусе ЭО при ЭСР, а напряженность ЭП рекомендуется рассчитывать методом конечных элементов. Представленные математические модели воздействия ЭСР на корпус ЭО с различной длиной заземления и соединения верхней крышки с корпусом позволяют выбрать наиболее подходящий корпус для насыщения электроники, ножки для корпуса и длину проводника заземления, тип соединения крышки корпуса с основной частью корпуса.

Разработанные бесконтактные датчики напряжения, датчики МП, датчики ЭП позволяют снимать осциллограммы напряжения до 50 кВ, напряженности магнитного поля амплитудой до 1 000 А/м, напряженности электрического поля до 150 кВ/м при длительностях от 5 нс до 100 мкс.

Созданы установки для калибровки каждого типа датчиков. В частности, для датчиков МП и ЭП производится цифровое интегрирование результатов. Установка для калибровки датчика ЭП и результаты калибровки представлены на рис. 6.

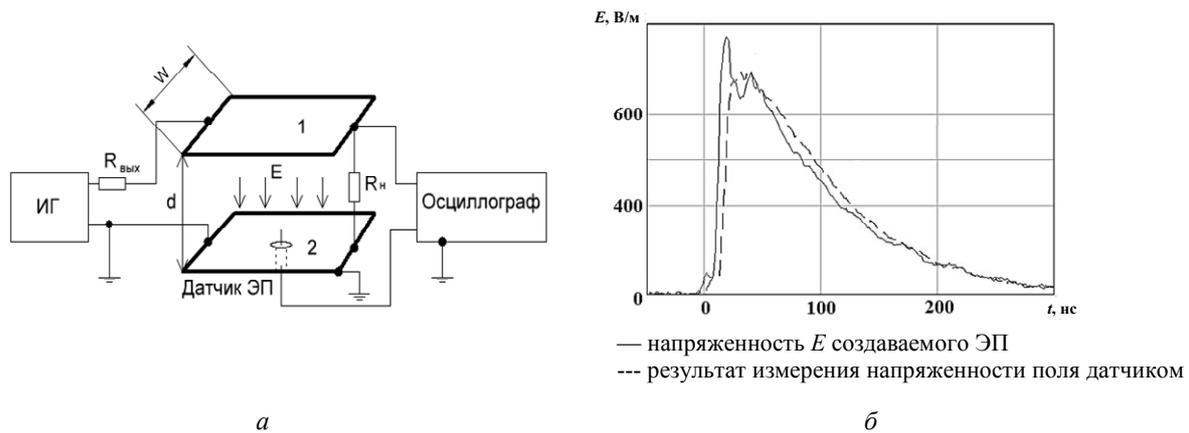


Рис. 6. Установка для калибровки датчика ЭП: *а* – схема лабораторной установки; *б* – результаты калибровки

В ходе калибровок получены коэффициенты, необходимые для построения осциллограмм.

Для исследования формирования ЭСР разработана установка, в которой разрядник выполнен в виде электродов из нержавеющей стали с регулируемым расстоянием, в качестве источника напряжения используется ЭСР-25000, а осциллограф располагается в экранированной от разрядных цепей отдельной комнате, и приняты меры по подавлению наводок в измерительных кабелях. Разработанный делитель пригоден для измерений напряжения до 50 кВ с фронтом от 20 нс. При воздушных разрядах с увеличением напряжения источника ЭСР амплитуда второго максимума тока начинает увеличиваться (рис. 7, *а*), а формирование напряжения на объекте происходит в две ступени.

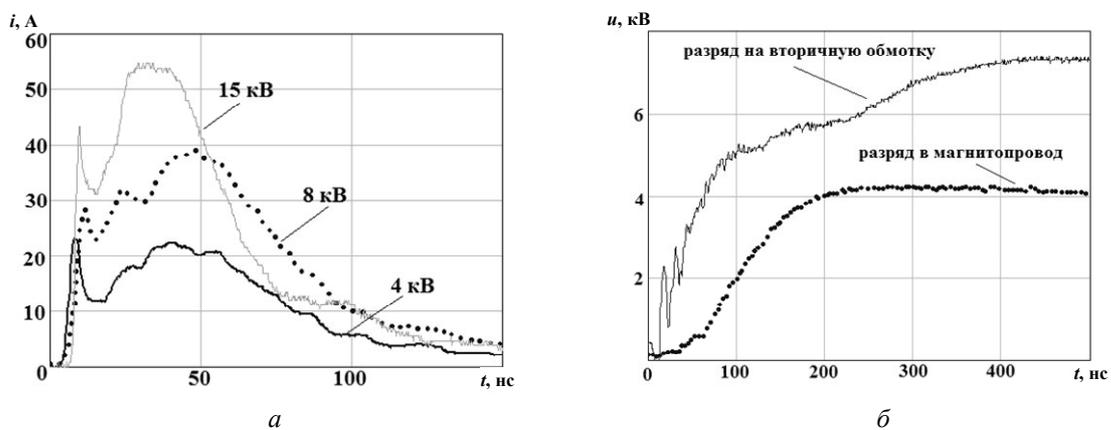


Рис. 7. Результат исследования формирования ЭСР: *а* – изменение формы тока воздушного разряда при увеличении испытательного напряжения; *б* – осциллограмма напряжения на первичной обмотке при воздействии ЭСР амплитудой 25 кВ на вторичную обмотку (магнитопровод трансформатора ТА14)

С ростом напряжения и увеличением разрядного промежутка увеличивается длительность фронта тока и напряжения. Полученные данные о напряжении, скорости его изменения при разрядах от 2 до 25 кВ при изменении сопротивления и емкости разрядной цепи позволяют оценить степень опасности ЭСР.

Исследование пробоя изоляции трансформатора (рис. 7, *б*) при ЭСР 25 кВ проводится на той же установке. При напряжении 6–12 кВ происходит пробой изоляции и импульсное напряжение попадает в судовую сеть.

Пример результата измерения напряженности ЭП с помощью датчика при изменении расстояния до корпуса ЭО, в который производится ЭСР, представлен на рис. 8.

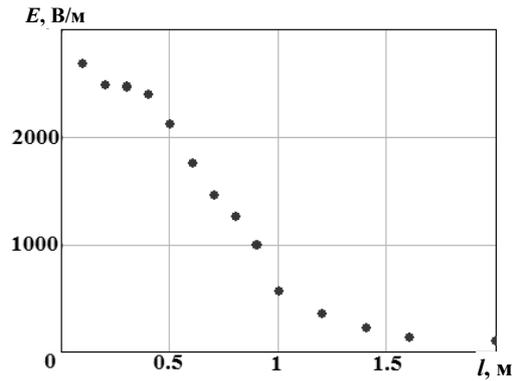


Рис. 8. Значения напряженности ЭП, полученные при ЭСР в вертикальную пластину связи

Распространение ЭСР по судовому кабелю экспериментально исследуется с помощью установки (рис. 9).

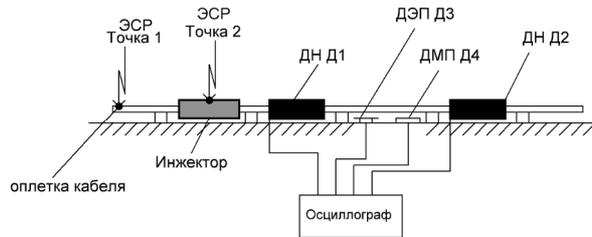


Рис. 9. Схема установки для исследования воздействия ЭСР амплитудой 25 кВ на судовой кабель

Разряды подаются на экран и жилы одного, двух и трех кабелей, расположенных в трассе длиной от 4 до 50 м. Осциллограммы напряжения, напряженности ЭП и МП снимаются с помощью соответствующих датчиков ДН, ДЭП и ДМП, устанавливаемых в выбранных точках вдоль прокладки кабелей. Некоторые осциллограммы представлены на рис. 10, *а*.

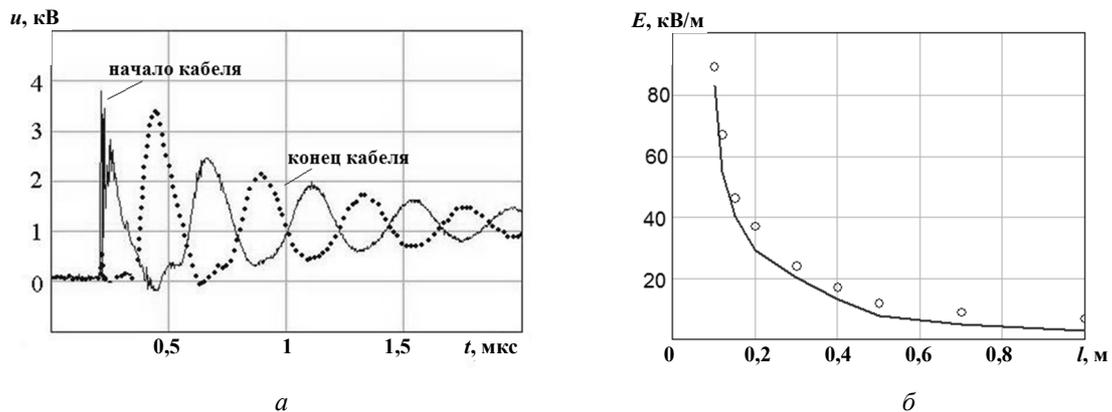


Рис. 10. Результаты исследования воздействия ЭСР на кабель длиной 50 м:
а – изменение напряжения во времени при воздействии ЭСР амплитудой 25 кВ на оплетку кабеля;
б – зависимость напряженности ЭП от расстояния до кабеля, на который воздействует ЭСР 25 кВ;
 круги – экспериментальные данные; линия – расчет

Импульсное напряжение от ЭСР на экран кабеля через 50 м практически не затухает, падает на соседние кабели и вызывает наведенное напряжение на внутренних жилах. Доказано, что ЭСР в кабель является очень опасным путем воздействия на ЭО.

На рис. 10, б приведена зависимость напряженности ЭП от расстояния при ЭСР 25 кВ в кабель, полученная экспериментальным путем и с помощью моделирования в программе ELCUT.

Проектирование ЭО необходимо начинать с выбора корпуса. Наиболее удачным является корпус, обеспечивающий непрерывность экранирования. Если корпус уже изготовлен, то для обеспечения устойчивости к ЭСР применяется внутреннее экранирование элементов, подверженных наибольшему влиянию. На стадии проектирования ЭО необходимо выбирать соответствующую элементную базу, применять элементы защиты и помехоустойчивые схемы, выполнять требования по разводке печатной платы, подробно описанные в работах Л. Н. Кечиева. Для подавления импульсных напряжений, распространяющихся по кабелю, актуально применять средства защиты от перенапряжений. Опыт испытаний подтверждает, что при доработке изделия применение экранирования не всегда возможно, т. к. требуются изменения конструкторской документации и прохождения всех испытаний (климатических, вибрационных и т. д.) заново, поэтому необходимо выявить подверженные ЭСР элементы и минимизировать длины выводов сигнальных проводов и заземления, применить экранирование проводов внутри корпуса ЭО. Для сохранения высоких скоростей передачи данных хорошим способом является применение гальванической изоляции, оптических каналов связи, инфракрасных, и радиочастотных. Использование программных методов (установка задержек на обработку сигнала и увеличение его уровня) и корректировка ошибок в передаче данных помогают в 30 % случаев получить требуемую устойчивость к ЭСР. Комплексное применение перечисленных методов и средств обеспечивают соответствие ЭО требованиям по устойчивости к ЭСР.

Заключение

Электростатические разряды могут приводить к некорректной работе судового оборудования и способны создавать импульсные помехи в цепях питания, передачи информации, измерительных каналах амплитудой в тысячи вольт. Значения напряженности ЭП от расстояния до кабеля, полученные экспериментально и при моделировании в программе ELCUT, имеют расхождения не более 15 %, что позволяет использовать программу для расчета ЭП ЭСР на расстояниях до 1 м. Полученные графики можно учитывать при проектировании судовых кабельных трасс. Разработанные датчики, установки для их калибровки, установки для исследования формирования ЭСР, их воздействия на корпуса ЭО, судовые кабели обеспечивают возможность экспериментального изучения ЭСР и могут быть использованы для продолжения исследований в этой области. Результаты эксперимента подтверждают адекватность модели изменения напряжения на корпусе ЭО при ЭСР. Разряд статического электричества может привести к попаданию импульсного напряжения в судовую кабель через трансформатор питания или экран кабеля. Волна напряжения от ЭСР распространяется по кабелю с небольшим затуханием. Наблюдается лишь увеличение длительности фронта по мере распространения. Прямой разряд в экран судового кабеля приводит к распространению импульсного напряжения по экрану и появлению напряжения на внутренних жилах. Вторичные эффекты от ЭСР не менее опасны, чем прямой разряд в корпус ЭО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воршевский А. А., Гальперин В. Е. Электромагнитная совместимость судовых технических средств. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2006. 317 с.
2. Воршевский А. А., Гришаков Е. С. Влияние электростатического разряда на устойчивость электронного и электротехнического оборудования // Электротехника. 2017. № 12. С. 35–39.
3. Кечиев Л. Н., Балюк Н. В. Зарубежные военные стандарты в области ЭМС / под ред. Л. Н. Кечиева. М.: Грифон, 2014. 448 с.
4. НД № 2-020101-118: Техническое наблюдение за изготовлением изделий // Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов Российского морского регистра судоходства. СПб.: Изд-во РМРС, 2019. Ч. IV. 463 с.

Статья поступила в редакцию 26.11.2019

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Воршевский Александр Алексеевич – Россия, 190121, Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; д-р техн. наук, доцент; зав. кафедрой электротехники и электрооборудования судов; elemcom@smtu.ru.

Гришаков Евгений Сергеевич – Россия, 190121, Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; аспирант кафедры электротехники и электрооборудования судов; grishakove@mail.ru.



OBTAINING ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF MARINE EQUIPMENT UNDER ELECTROSTATIC DISCHARGES

A. A. Worshevsky, E. S. Grishakov

*Saint-Petersburg State Marine Technical University,
Saint-Petersburg, Russian Federation*

Abstract. The paper describes the problem of electromagnetic compatibility for electrostatic discharge (ESD), which is most actual for ships where all systems are highly automated and susceptible to ESD digital technology. The results of electromagnetic compatibility tests of ship systems after their installation on the vessel allow to conclude that it is not enough to fulfill only the existing ESD immunity requirements of the Russian Maritime register of shipping which are currently confirmed by ESD tests in the laboratory. ESD methods and reasons have been analyzed. The possible accumulated potentials and parameters of currents, voltages and field strengths during discharge are presented. The existing ESD immunity standards are being considered. The scheme of the developed and certified generator of electrostatic discharges ESD – 25000 is presented. The most frequent defects under the influence of ESD are given. There have been formulated the equivalent schemes of the electric equipment housing at different lengths of grounding of the housing and the methods of connecting the cover with the housing. The results of measurements of electric field and magnetic field parameters are presented. The results of modeling and experiments are compared. The developed sensors, methods of their calibration and obtained technical characteristics are being tested. There are given the parameters and forms of ESD voltage and current, experimental data of ESD secondary effects in the EE hull and adjacent equipment, results of discharges in the ship's cable, interference in the supply network through secondary power sources. The most effective design and ESD protection methods have been analyzed.

Key words: electrostatic discharge, electromagnetic compatibility, modeling, pulse voltage, sensors, calibration, electric field, magnetic field.

For citation: Worshevsky A. A., Grishakov E. S. Obtaining electromagnetic compatibility of marine equipment under electrostatic discharges. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;1:106-114. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-106-114.

REFERENCES

1. Vorshevskij A. A., Gal'perin V. E. *Elektromagnitnaya sovместimost' sudovyh tekhnicheskikh sredstv* [Electromagnetic compatibility of marine technical equipment]. Saint-Petersburg, Izd-vo SPbGMTU, 2006. 317 p.
2. Vorshevskij A. A., Grishakov E. S. Vliyanie elektrostatičeskogo razryada na ustojčivost' elektronogo i elektrotekhnicheskogo oborudovaniya [Influence of electrostatic discharge on stability of electronic and electrical equipment]. *Elektrotekhnika*, 2017, no. 12, pp. 35-39.
3. Kechiev L. N., Balyuk N. V. *Zarubezhnye voennye standarty v oblasti EMS* [Foreign military standards of electromagnetic compatibility]. Pod redakciej L. N. Kechieva. Moscow, Grifon Publ., 2014. 448 p.

4. ND № 2-020101-118: Tekhnicheskoe nablyudenie za izgotovleniem izdelij [ND No. 2-020101-118: Technical supervision of the manufacture of products]. *Pravila tekhnicheskogo nablyudeniya za postrojkoj sudov i izgotovleniem materialov i izdelij dlya sudov Rossijskogo morskogo registra sudohodstva*. Saint-Petersburg, Izd-vo RMRS, 2019. Part IV. 463 p.

The article submitted to the editors 26.11.2019

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Worshevsky Alexander Alekseevich – Russia, 190121, Saint-Petersburg; Saint-Petersburg State Marine Technical University; Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment; elemcom@smtu.ru.

Grishakov Evgenii Sergeevich – Russia, 190121, Saint-Petersburg; Saint-Petersburg State Marine Technical University; Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment; grishakove@mail.ru.

