

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.3.015.33:621.315
EDN: VDQJIU

А.А. Воршевский, П.А. Воршевский, М.Е. Задорожный, П.С. Яковлев
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СУДОВЫХ КАБЕЛЯХ ПРИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются импульсные напряжения в кабельной трассе, обусловленные электростатическими разрядами (ЭСР). Цель – определение параметров импульсных помех, возникающих на проводниках кабеля относительно корпуса судна.

Материалы и методы. Метод расчета переходных процессов; метод расчета наведенных напряжений; метод распространяющихся волн; эксперименты; измерения.

Основные результаты. Получены аналитические выражения для расчета изменения напряжения на жилах кабеля при ЭСР. Построены графики зависимостей значений параметров импульсных напряжений на жилах кабеля при ЭСР от емкости связи с объекта, подвергающегося ЭСР, от волнового сопротивления кабеля. Произведена оценка максимальной амплитуды наведенного напряжения. Полученные результаты подтверждены измерениями. Экспериментально установлено изменение коэффициента связи цепей при увеличении напряжения разряда выше 15 кВ.

Заключение. Расчет наведенного напряжения проводится по приведенным в работе формулам. Результаты измерений и моделирования дают информацию о возможных параметрах воздействия ЭСР на электронное оборудование, необходимую для корректировки моделей и совершенствования средств и методов защиты от ЭСР.

Ключевые слова: электростатический разряд, кабель, наведенное напряжение, импульсная помеха, электромагнитная совместимость.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP POWERING AND ELECTRIC GENERATION SYSTEMS

UDC 621.3.015.33:621.315
EDN: VDQJIU

A.A. Worshevsky, P.A. Vorshevsky, M.E. Zadorozhny, P.S. Yakovlev
St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

SURGE VOLTAGES IN SHIP CABLING DUE TO ELECTROSTATIC DISCHARGES

Object and purpose of research. This paper discusses surge voltages in cable routes due to electrostatic discharges (ESDs). The purpose of the study was to determine the parameters of surge interference arising on cable conductors with respect to hull.

Materials and methods. Calculation method for transitional processes; calculation method for induced voltages; method of propagating waves; experiments, measurements.

Main results. The study yielded analytical expressions for the changes of voltage on cable wires due to ESD event, as well as the curves of surge voltage parameters on cable wires in case of ESD as functions of cable capacity coupling with the object suffering ESD event, as well as of wave resistance of the cable itself. Maximum amplitude of induced voltage was also estimated.

Для цитирования: Воршевский А.А., Воршевский П.А., Задорожный М.Е., Яковлев П.С. Возникновение импульсных напряжений на судовых кабелях при электростатическом разряде. Труды Крыловского государственного научного центра. 2025; 4(414): 131–142.

For citations: Worshevsky A.A., Vorshevsky P.A., Zadorozhny M.E., Yakovlev P.S. Surge voltages in ship cabling due to electrostatic discharges. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2025; 4(414): 131–142 (in Russian).

The estimate thus obtained was confirmed by measurements. It was experimentally established that charge voltage increase beyond 15 kV results in the change of circuit coupling coefficient.

Conclusion. Induced voltage was calculated as per the expressions given in the text of this paper. The results of measurements and simulation give valuable information on possible parameters of ESD effect upon electronic hardware that could be used to update the models, as well as improve means and methods of ESD protection.

Keywords: electrostatic discharge (ESD), cable, induced voltage, surge interference, electromagnetic compatibility.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Требования Российского морского регистра судоходства включают необходимость проверки судового электротехнического, навигационного, радиотехнического, оборудования и средств автоматизации на устойчивость к электростатическому разряду (ЭСР) напряжением 8 кВ [1–4]. Такие же требования распространяются на оборудование речных судов [5]. Указанные документы соответствуют IEC 60945 [6], а методика испытаний приведена в базовом стандарте IEC 61000-4-2 [7].

Оборудование атомных станций и авиационное оборудование должно выдерживать без сбоев ЭСР до 15 кВ [8, 9]. Аналогичные требования выдвигаются к оборудованию промышленного и бытового назначения, к устройствам, поставляемым на объекты энергетики, железной дороги [8, 10]. Возможны испытания на ЭСР напряжением до 25 кВ, т.к. такие напряжения могут возникать в сухом помещении при трении разнородных материалов. При испытаниях специализированным генератором (имитатором) создаются разряды, имитирующие разряд статического электричества с человека на оборудование. Длительность фронта тока стандартного ЭСР составляет менее 1 нс, а длительность тока – десятки наносекунд [7, 8]. Разряды обеих полярностей проводят во все точки оборудования, которых может касаться человек во время эксплуатации оборудования.

Электростатический разряд в оборудование вызывает на его корпусе импульсное напряжение высокого уровня с фронтом и длительностью, зависящими от особенностей корпуса и его заземления, которое воздействует на внутренние цепи и начинает распространяться по всем экранам кабелей, подключенных к оборудованию [8, 10–12]. При прямом разряде на электрические цепи появляются импульсные напряжения на проводниках относительно земли. Трансформаторы вторичного электропитания не являются барьером для напряжений такого уровня ЭСР, т.к. изоляция между обмотками пробивается. Разряд в соседнее с кабелями оборудо-

дование создает импульсное электромагнитное поле, которое также наводит на кабелях импульсное напряжение [13].

Все эти эффекты обуславливают возможность возникновения сбоев не только в оборудовании, подвергнутом ЭСР, но и в удаленном оборудовании, подключенном к общей кабельной сети. Задача определения возможных параметров импульсных напряжений на кабелях при ЭСР является актуальной. Результаты исследования должны дать необходимую информацию при проведении работ по обеспечению электромагнитной совместимости судового электронного и электротехнического оборудования.

Математическое описание возникновения импульсных помех на кабеле при электростатическом разряде

Mathematical description of surge interference on cable due to electrostatic discharge

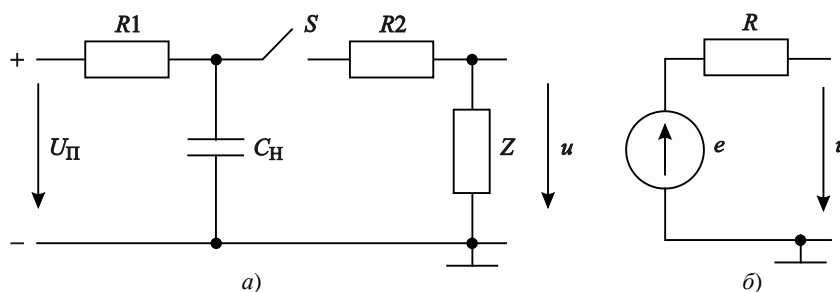
Источник электростатического разряда во время испытаний замещается испытательным генератором, схема которого описана в стандарте [7] и представляет собой конденсатор, заряжаемый до высокого напряжения и разряжаемый через ключ и электрод, имитирующий палец человека, на испытуемое оборудование. Схема основана на исследованиях реальных ЭСР и создает ток разряда определенной усредненной формы и величины. Поэтому в основу расчетов параметров помех, возникающих при ЭСР, имеет смысл положить именно эту стандартную схему. Реальные аттестованные испытательные генераторы ЭСР воспроизводят требуемые параметры ЭСР, что позволяет проверять результаты расчетов и моделирования экспериментально [8, 15].

Прямой разряд в корпус оборудования создает на нем импульсное напряжение относительно корпуса судна и ток, параметры которых рассмотрены в [11, 12]. При ЭСР с напряжением 25 кВ можно ожидать на малогабаритном оборудовании с протяженным заземлением импульс напряжения более 20 кВ с максимальной скоростью изменения напряжения более 200 В/нс. Для расчета создаваемого

Рис. 1. Упрощенная схема имитатора электростатических разрядов:

а) схема, описывающая принцип его действия;
б) простейшая схема

Fig. 1. Simplified layout of ESD simulator: а) principal diagram; б) simplest layout



тока необходимо использовать полную схему замещения, приведенную в [11] и состоящую из девяти элементов.

Для оценки только напряжения на корпусе оборудования относительно корпуса судна предлагается использовать упрощенную схему источника ЭСР (рис. 1). Схема на рис. 1а воспроизводит схему имитатора электростатических разрядов и позволяет упрощенно определить изменение напряжения u на произвольной нагрузке Z , например, на корпусе оборудования, в который происходит ЭСР. При этом длительность фронта зависит от свойств выключателя S , который должен обладать свойствами геркона, используемого в реальном имитаторе, или описывать поведение сопротивления воздушного промежутка при пробое.

Дальнейшее упрощение приводит к схеме на рис. 1б, где источник ЭСР замещается источником ЭДС биэкспоненциальной формы e и внутренним сопротивлением R . Параметры e зависят от разрядной цепи, но могут быть определены, если цепь известна:

$$e(t) = E \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right), \quad (1)$$

где τ_1 – постоянная времени нарастания, τ_2 – постоянная времени спада формируемого импульса напряжения.

При отсутствии нагрузки напряжение u совпадает с ЭДС e , а его амплитуда равна

$$U_m = E \cdot \left(e^{-\frac{tm}{\tau_2}} - e^{-\frac{tm}{\tau_1}} \right),$$

$$\text{где } tm = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \ln \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right).$$

При подключении на выход схемы на рис. 1б нагрузки R_H амплитуда напряжения уменьшается до величины

$$U_{m1} = U_m \frac{R_H}{R + R_H}.$$

При прямом разряде в электрические цепи оборудования напряжение на них также упрощенно описывается формулой (1), а амплитуда – формулой для расчета U_{m1} при условии $R_H = Z_W$, где Z_W – волновое сопротивление проводника или кабеля относительно корпуса судна. Если разряд происходит на внутренние цепи электропитания оборудования, то импульсное напряжение попадет прямо на жилы внешних силовых кабелей.

Длительность фронта напряжения может составлять единицы – десятки наносекунд, что соизмеримо или меньше времени распространения волны напряжения по кабелю. Это делает необходимым рассматривать кабель как длинную линию и учитывать эффекты распространения волны напряжения по нему.

При разряде в корпус оборудования возникающее на нем напряжение создает электрическое поле, в котором оказываются соседние с ним кабели, что приводит к возникновению несимметричного импульсного напряжения на них. Это воздействие может быть описано как передача импульса напряжения с корпуса на кабель через емкость связи C (рис. 2). Кабель замещается длинной линией с волновым сопротивлением Z_W и временем распространения волны напряжения до его конца t_d .

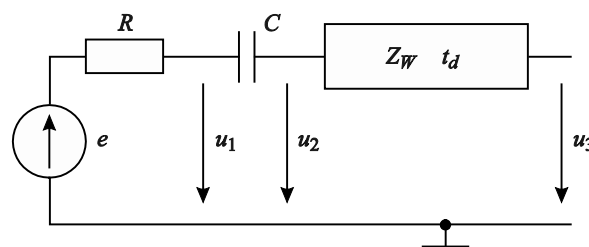


Рис. 2. Схема, описывающая воздействие электростатического разряда на соседний кабель через емкостную связь между кабелем и корпусом оборудования, в которое происходит электростатический разряд

Fig. 2. Effect of electrostatic discharge upon the adjacent cable via capacity coupling between the cable and the frame of the hardware suffering electrostatic discharge

Напряжение u_1 соответствует напряжению на корпусе оборудования, в которое происходит ЭСР, u_2 – напряжению на жилах кабеля на ближнем конце, а u_3 – напряжению на жилах кабеля на дальнем конце относительно корпуса судна.

Напряжение на ближнем конце кабеля до прихода волны, отраженной от дальнего конца кабеля, т.е. при $t < 2t_d$ изменяется по закону:

$$u_2(t) = E \cdot Z_W \cdot C \left(\frac{1}{\tau_1 - T} e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \frac{1}{\tau_2 - T} e^{-\frac{t}{\tau_2}} - \frac{\tau_2 - \tau_1}{(\tau_2 - T)(\tau_1 - T)} e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (2)$$

где $T = C \cdot (R + Z_W)$.

Эта волна распространяется по кабелю, достигает через время t_d его дальнего конца и отражается с определенным коэффициентом, зависящим от соотношения сопротивления аппаратуры на конце кабеля и волнового сопротивления кабеля относительно корпуса судна. Худшему случаю с точки зрения появления максимального напряжения соответствует условие, когда сопротивление аппаратуры по цепи «кабель – земля» много больше волнового сопротивления кабеля. При этом коэффициент отражения равен 1, а на конце кабеля будет удвоение напряжения. Т.е. u_3 может достигать $2u_2$ на время двойного пробега волны по кабелю $2t_d$.

При распространении отраженной волны обратно к началу кабеля ее амплитуда может несколько уменьшаться, а фронт и длительность – увеличиваться за счет потерь. Постоянные времени T и постоянная в описании вернувшейся волны T_r могут несколько различаться. Если рассматривать худший случай, когда изменения амплитуды и временных параметров незначительны, то напряжение пришедшей волны приведет к появлению обратного тока $i(t - 2t_d)$ через сопротивление R , обратному заряду емкости связи C до напряжения $u_C(t - 2t_d)$ и добавит в итоге к напряжению $u_2(t)$ напряжение, вызванной пришедшей волной $u_{22}(t - 2t_d)$.

$$i(t - 2t_d) = \frac{2ECZ_W T_r}{R + Z_W} \left(-\frac{A}{\tau_1} e^{-\frac{t-2t_d}{\tau_1}} + \frac{B}{\tau_2} e^{-\frac{t-2t_d}{\tau_2}} + \frac{D}{T_r} e^{-\frac{t-2t_d}{T_r}} + \frac{A - B - D}{T} e^{-\frac{t-2t_d}{T}} \right), \quad (3)$$

$$u_C(t - 2t_d) = \frac{2EZ_W T_r}{R + Z_W} \left(A e^{-\frac{t-2t_d}{\tau_1}} - B e^{-\frac{t-2t_d}{\tau_2}} - D e^{-\frac{t-2t_d}{T_r}} - (A - B - D) e^{-\frac{t-2t_d}{T}} \right), \quad (4)$$

$$u_{22}(t - 2t_d) = u_C(t - 2t_d) + R i(t - 2t_d), \quad (5)$$

$$\text{где } A = \frac{\tau_1}{(\tau_1 - T)(\tau_1 - T_r)}, \quad B = \frac{\tau_2}{(\tau_2 - T)(\tau_2 - T_r)},$$

$$D = \frac{(\tau_2 - \tau_1)T_r}{(\tau_1 - T_r)(\tau_2 - T_r)(T_r - T)}.$$

Пришедшая волна напряжения отражается от источника импульсов и начинает вновь распространяться в сторону дальнего конца кабеля. Эту волну можно найти по формуле:

$$u_{2r}(t - 2t_d) = u_{22}(t - 2t_d) - u_2(t - 2t_d). \quad (6)$$

Последующие отраженные от аппаратуры и возвращающиеся обратно волны имеют меньшие амплитуды из-за затухания при распространении. Поэтому ограничимся анализом первичного наведенного напряжения и пришедшей волны напряжения, возникающей при первом отражении от аппаратуры. Приведенные математические выражения позволяют найти зависимости параметров импульсного напряжения на кабеле относительно корпуса судна от параметров исходного ЭСР, емкости связи и свойств кабеля.

Математическое моделирование импульсного напряжения на кабеле при электростатическом разряде

Mathematical simulation of surge voltage on cable due to electrostatic discharge

Параметры импульсного напряжения на оборудовании при ЭСР в него зависят от индуктивности заземления, емкости корпуса оборудования относительно земли. При соединении оборудования с корпусом судна проводником минимальной длины длительность напряжения уменьшается до десятков наносекунд. Этот случай может быть описан импульсным напряжением с длительностью фронта 5 нс на уровнях 10–90 % и длительностью 50 нс на уровне 50 % (импульс 5/50 нс).

Такой импульс соответствует стандартной наносекундной импульсной помехе по ИЕС 61000-4-4,

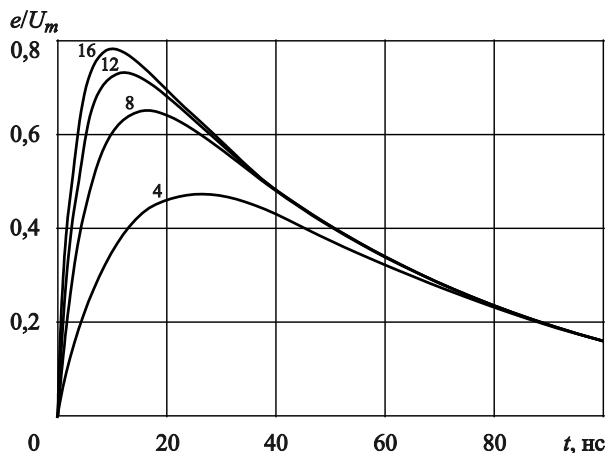


Рис. 3. Изменение напряжения источника во времени в соответствии с формулой (1): при отношениях постоянных времени $\tau_2/\tau_1 = 16, 12, 8, 4$

Fig. 3. Time history of source voltage as per Expression (1) at time constant ratios $\tau_2/\tau_1 = 16, 12, 8, 4$

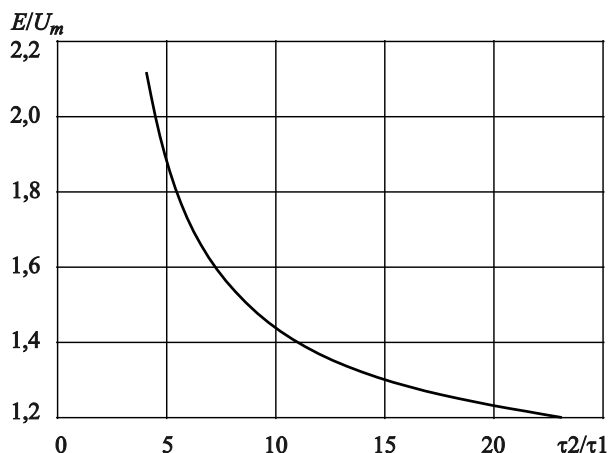


Рис. 4. Значение E для получения $U_m = 1$ при различных соотношениях постоянных времени τ_2/τ_1

Fig. 4. The value of E yielding $U_m = 1$ at different time constant ratios τ_2/τ_1

что позволяет использовать результат моделирования и для оценки воздействия этого вида помех. Импульс требуемой формы получается, если положить в формуле (1) $\tau_1 = 3,3$ нс, $\tau_2 = 55$ нс. При $E = 1$ графики изменения напряжения во времени для разных соотношений τ_2/τ_1 представлены на рис. 3. Для получения единичной амплитуды $U_m = 1$ необходимо скорректировать величину E в соответствии с графиком на рис. 4. Для импульса стандартной формы 5/50 нс это условие достигается

при $E = 1,261$. Выходное сопротивление такого источника $R = 50$ Ом.

Рассчитанные по формуле (2) графики изменения напряжения, наводимого в начале кабеля импульсным напряжением единичной амплитуды $U_m = 1$ на соседнем оборудовании, приведены на рис. 5.

Рост волнового сопротивления Z_W цепи «кабель – земля (корпус судна)», что соответствует увеличению высоты прокладки кабеля, приводит к росту

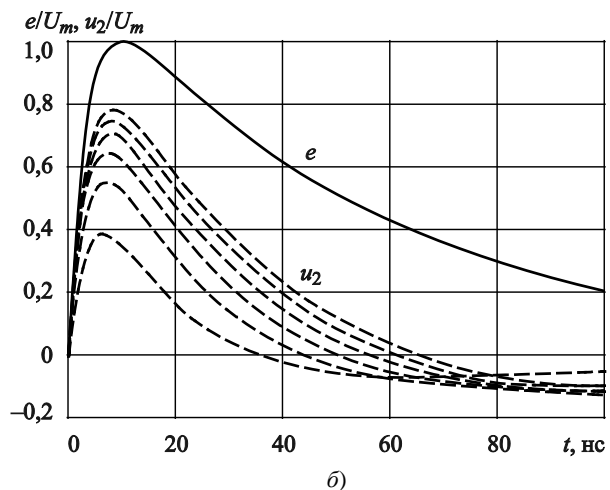
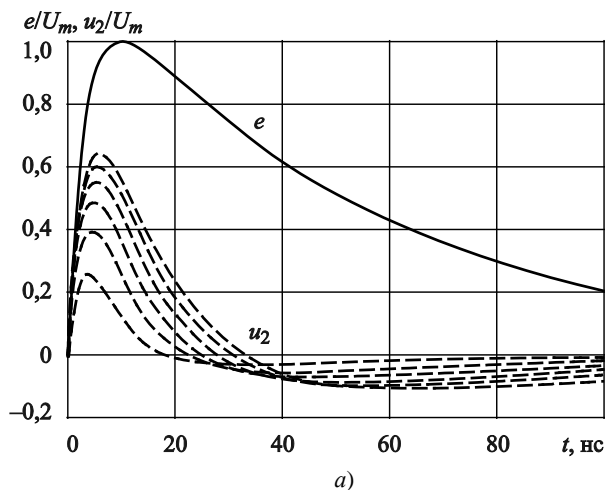


Рис. 5. Графики изменения напряжения $e(t)$ и напряжения $u_2(t)$ на начале кабеля при различных волновых сопротивлениях кабеля (пунктирные кривые, большей амплитуде которых соответствует большее сопротивление $Z_W = 300, 250, 200, 150, 100, 50$ Ом): а) $C = 50$ пФ; б) $C = 200$ пФ

Fig. 5. Time history of electrostatic discharge $e(t)$ and voltage $u_2(t)$ on cable input at different wave resistances (dashed curves, higher amplitude corresponds to higher resistance $Z_W = 300, 250, 200, 150, 100, 50 \Omega$): а) $C = 50$ pF; б) $C = 200$ pF

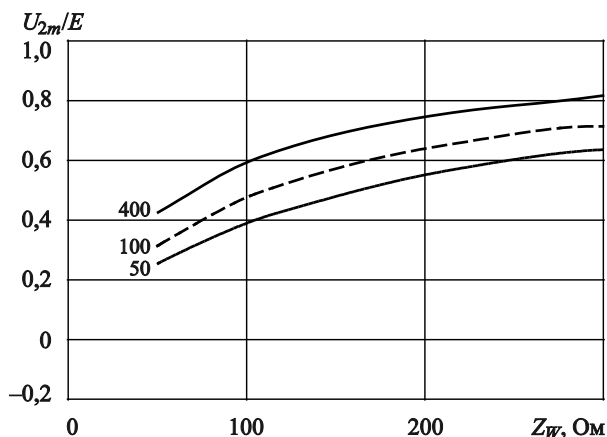


Рис. 6. Зависимость амплитуды напряжения на жилах кабеля относительно земли от волнового сопротивления кабеля при емкости связи $C = 400$ пФ (сплошная кривая), $C = 100$ пФ (пунктир), $C = 50$ пФ (точки)

Fig. 6. Voltage amplitude on cable wires (with respect to the ground) as function of cable wave resistance at coupling capacity $C = 400$ pF (solid curve), $C = 100$ pF (dashed curve), $C = 50$ pF (dots)

амплитуды импульсного напряжения на кабеле (рис. 6).

Формула (2) позволяет построить графики изменения напряжения от времени при широкой вариации исходных данных и получить зависимости амплитуды, длительности импульса и длительности фронта создаваемого на кабеле импульса напряжения от емкости связи (рис. 7, 8).

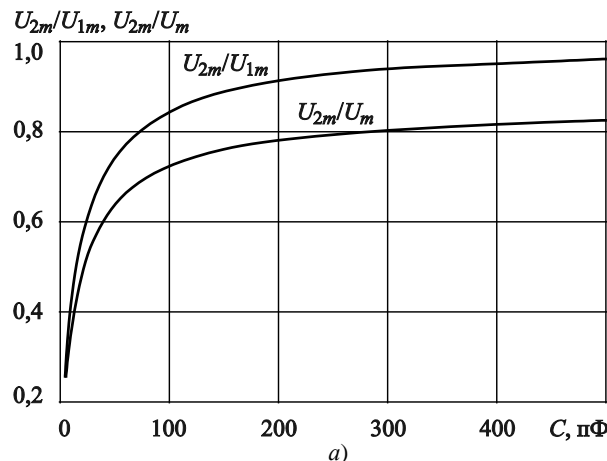


Рис. 8. Графики зависимости амплитуды напряжения и временных параметров импульсного напряжения на жилах кабеля с волновым сопротивлением $Z_W = 300$ Ом от емкости связи с оборудованием C :

а) зависимости амплитуды U_{2m} относительно U_{1m} и относительно U_m ; б) зависимости длительности импульса $t_{и}$ на уровне 50 % от амплитуды U_{2m} и длительности фронта $t_{ф}$ на уровне 10–90 % U_{2m}

Fig. 8. Voltage amplitude and time-related parameters of wave voltage on cable wires with surge resistance $Z_W = 300 \Omega$ as functions of frame coupling capacity C : а) amplitude U_{2m} versus U_{1m} and U_m ; б) pulse duration $t_{и}$ for the level of 50 % U_{2m} and front duration $t_{ф}$ of 10–90 % U_{2m}

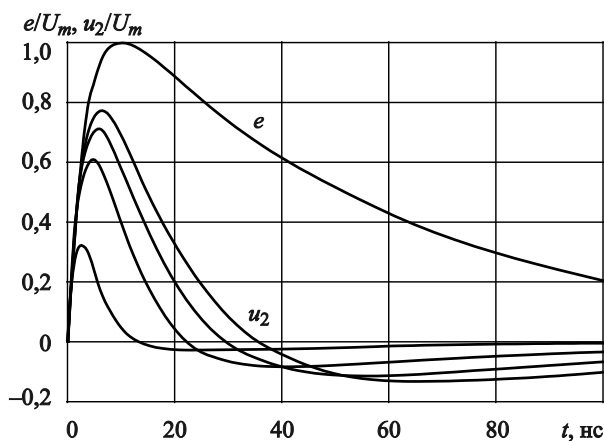
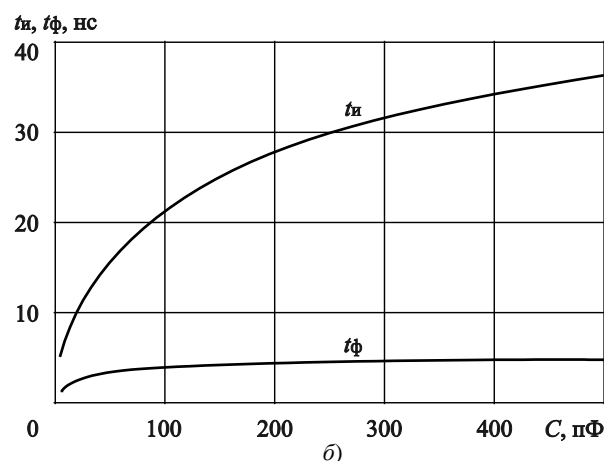


Рис. 7. Графики изменения электростатического разряда $e(t)$ и напряжения $u_2(t)$ на жилах кабеля с волновым сопротивлением $Z_W = 300$ Ом при различных емкостях связи с оборудованием (меньшей амплитуде соответствует меньшая емкость связи $C = 20, 50, 100, 200$ пФ)

Fig. 7. Time history of electrostatic discharge $e(t)$ and voltage $u_2(t)$ on cable wires with wave resistance $Z_W = 300 \Omega$ for frame couplings of different capacities (lower amplitude corresponds to lower capacity $C = 20, 50, 100, 200$ pF)

Формулы (3)–(5) позволяют построить графики изменения напряжения от времени при возвращении волны напряжения, отраженной от цепи в конце кабеля, и проанализировать влияние емкости и волнового сопротивления на амплитуду и временные параметры напряжения.

Результаты расчета изменения напряжения по формуле (2) в момент ЭСР (сплошная линия) и рас-



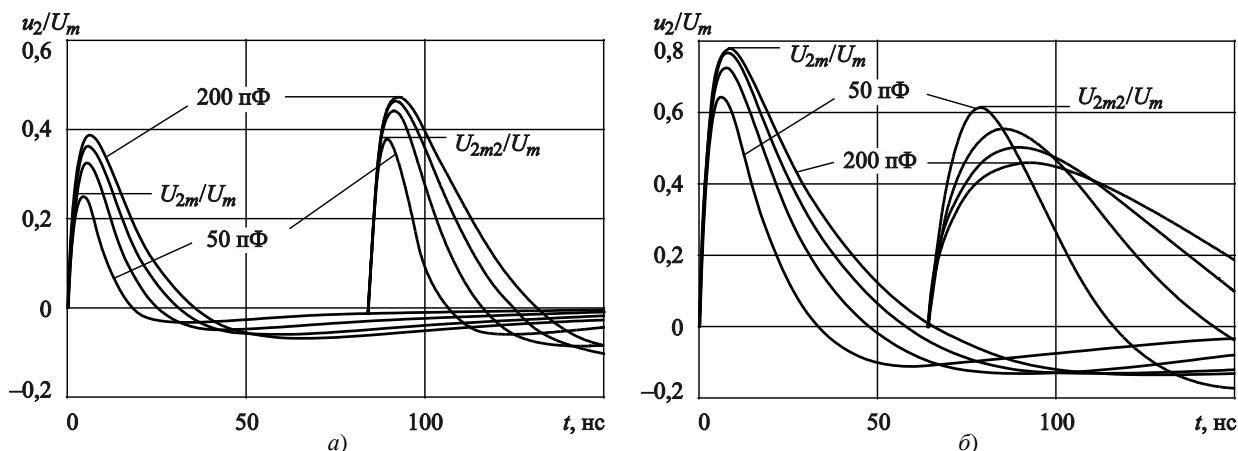


Рис. 9. Графики изменения напряжения $u_2(t)$ на начале кабеля при возникновении разряда на соседнее оборудование для условия $U_m = 1$ (сплошная линия) и при возвращении волны, отраженной от конца кабеля (пунктир) для различных емкостей связи с оборудованием $C = 50, 100, 150, 200$ пФ: а) $Z_W = 50$ Ом; б) $Z_W = 300$ Ом

Fig. 9. Time history of voltage $u_2(t)$ on cable input in case of ESD to adjacent hardware for $U_m = 1$ (solid curve) and for the returning wave reflected from cable output (dashed line) at frame coupling capacities $C = 50, 100, 150, 200$ pF: а) $Z_W = 50 \Omega$; б) $Z_W = 300 \Omega$

чета напряжения (пунктир) по формулам (3)–(5) при возвращении волны для худшего случая, соответствующего полному отражению от конца кабеля и отсутствию затухания при распространении, приведены на рис. 9. Большей емкости C соответствует большая амплитуда исходной волны U_{2m} . Возвращающаяся волна может иметь амплитуду U_{2m2} как больше (рис. 9а), так и меньше амплитуды U_{2m} (рис. 9б). Это явление обусловлено тем, что при передаче импульса с оборудования через емкость C на кабель он, по сути, проходит через дифференцирующую цепь с постоянной времени $C(Z_W + R)$, при

росте которой напряжение исходной волны напряжения (сплошная линия на рис. 9) возрастает.

Возвращающаяся волна создает увеличение напряжения путем заряда этой емкости C , т.е. происходит интегрирование, что приводит к увеличению длительности импульса и его фронта. При малых значениях емкости C она может зарядиться до большего напряжения за время действия импульса пришедшей волны, что и обуславливает возможность превышения амплитудой U_{2m2} амплитуды U_{2m} . Возрастание волнового сопротивления цепи «кабель – корпус» Z_W при увеличении высоты прокладки

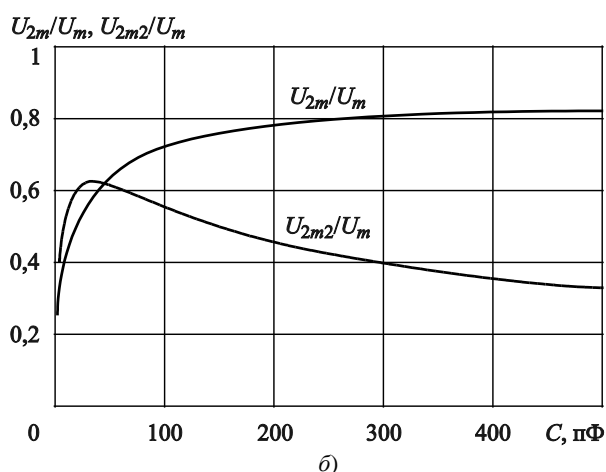
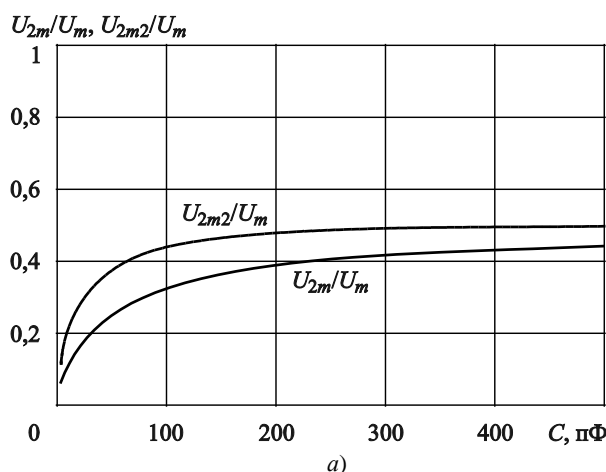


Рис. 10. Графики зависимости амплитуд импульсов напряжения U_{2m} , U_{2m2} относительно U_m на кабеле от емкости связи с оборудованием C : а) $Z_W = 50$ Ом; б) $Z_W = 300$ Ом

Fig. 10. Surge voltage amplitudes U_{2m} , U_{2m2} of the cable with respect to U_m as functions of frame coupling capacity C : а) $Z_W = 50 \Omega$; б) $Z_W = 300 \Omega$

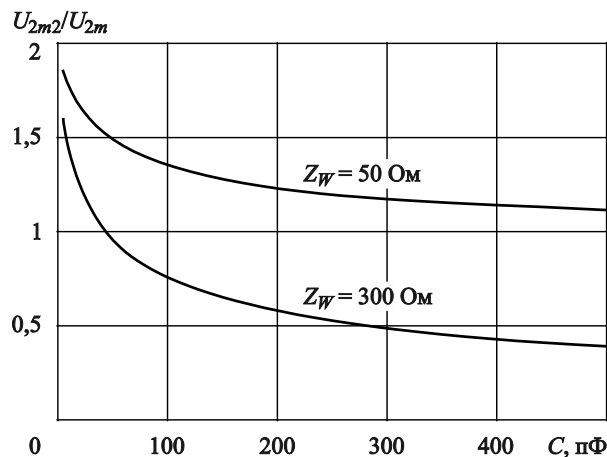
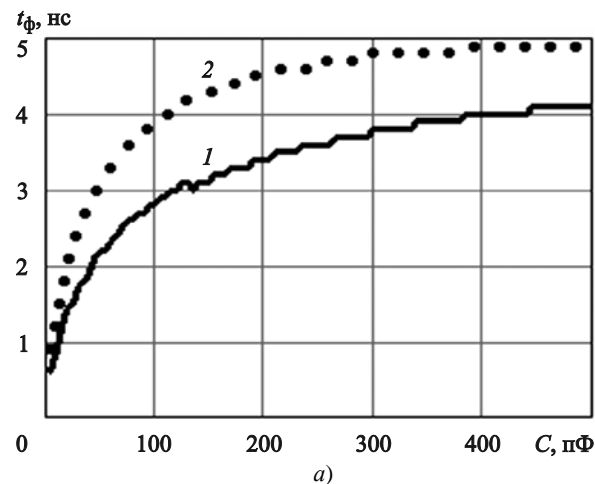


Рис. 11. Графики зависимости амплитуды импульсного напряжения, U_{2m2} относительно U_{2m} на кабеле от емкости связи с оборудованием C для двух значений волнового сопротивления кабеля Z_W

Fig. 11. Surge voltage amplitudes U_{2m} , U_{2m2} of the cable with respect to U_m as functions of frame coupling capacity C for two values of cable wave resistance Z_W

кабеля увеличивает постоянную времени $C(Z_W + R)$, что приводит к увеличению напряжения исходного импульсного напряжения U_{2m} , но к снижению отношения U_{2m2}/U_{2m} .

Расчеты по приведенным формулам позволяют получить зависимости амплитуды создаваемого на кабеле импульса напряжения от емкости связи C (рис. 10, 11).



Результаты расчетов зависимости длительности фронта t_ϕ на уровне 10–90 % и длительности импульса t_i на уровне 50 % от амплитуды U_{2m} для наведенного напряжения $u_2(t)$ и напряжения, обусловленного первой пришедшей волной, отраженной от дальнего конца кабеля, приведены на рис. 12, 13.

График на рис. 12а показывает, что длительность фронта кабель – корпус (земля)» и малых емкостях связи может быть значительно меньше фронта импульсного напряжения на оборудовании, в который происходит ЭСР, при этом амплитуда наведенного напряжения уменьшается (рис. 8а).

При увеличении высоты прокладки кабеля и, соответственно, росте волнового сопротивления длительность фронта наведенного напряжения приближается к длительности фронта импульса на оборудовании 5 нс, а фронт второго импульса может значительно возрасти (рис. 12б). Длительности исходного наведенного импульсного напряжения и импульса от вернувшейся волны возрастают с ростом емкости связи и волнового сопротивления (рис. 13).

Экспериментальное исследование наведенных напряжений, обусловленных электростатическим разрядом

Experimental study of ESD-induced voltages

Для проверки результатов расчетов проведены измерения наведенных напряжений при воздействии

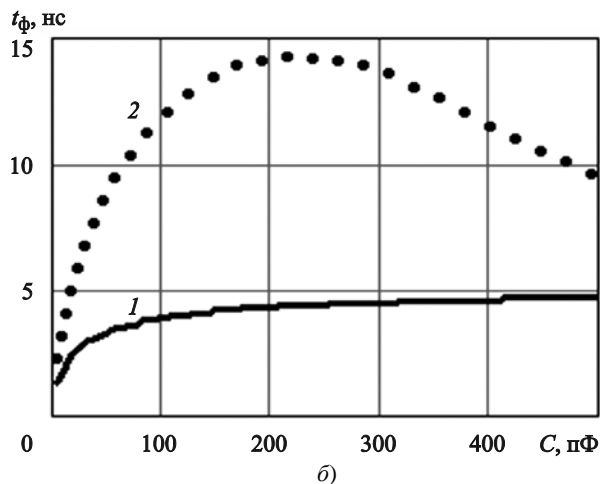


Рис. 12. Графики зависимости длительности фронта t_ϕ на уровне 10–90 % амплитуды U_{2m} от емкости связи C для исходного наведенного импульса (кривая 1) и для напряжения, обусловленного первой пришедшей волной, отраженной от дальнего конца кабеля (кривая 2): а) $Z_W = 50 \text{ Ом}$; б) $Z_W = 300 \text{ Ом}$

Fig. 12. Front duration t_ϕ at 10–90 % U_{2m} versus coupling capacity C for initial induced surge (Curve 1) and for the voltage created by the first returning wave reflected from the far end of the cable (Curve 2): а) $Z_W = 50 \text{ }\Omega$; б) $Z_W = 300 \text{ }\Omega$

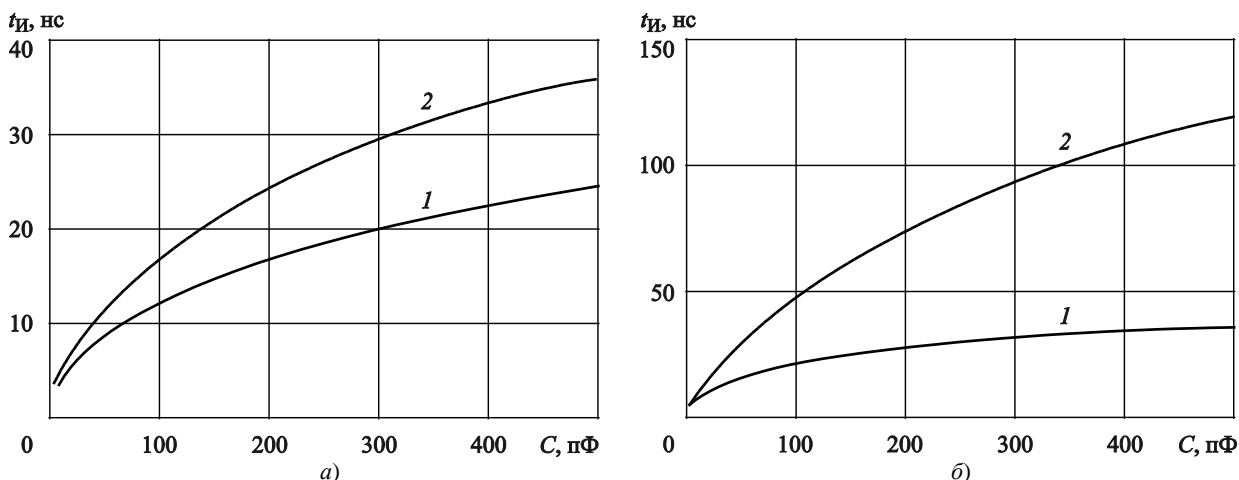


Рис. 13. Графики зависимости длительности импульса t_i на уровне 50 % амплитуды U_{2m} от емкости связи C для исходного наведенного импульса (кривая 1) и для напряжения, обусловленного первой пришедшей волной, отраженной от дальнего конца кабеля (кривая 2): а) $Z_W = 50 \text{ Ом}$; б) $Z_W = 300 \text{ Ом}$

Fig. 13. Pulse duration t_i at 50 % U_{2m} versus coupling capacity C for initial induced surge (Curve 1) and for the voltage created by the first returning wave reflected from the far end of the cable (Curve 2): а) $Z_W = 50 \text{ }\Omega$; б) $Z_W = 300 \text{ }\Omega$

импульсного напряжения на соседнее с кабелем оборудование (рис. 14). В качестве генератора импульсов ГИ используются имитатор ИПП-4000, генерирующий импульсы до 4 кВ по ИЕС 61000-4-4, и имитатор электростатического разряда ЭСР-25000, создающий разряды с напряжением до 25 кВ. Соседнее оборудование замещается металлической трубкой-инжектором И. Осциллограф подключается к цепям через делители, пригодные для измерения напряжения до 38 кВ. Генератор и осциллограф максимально разнесены и соединены с листом заземления металлической лентой минимальной длины. На провода электропитания и измерительные кабели осциллографа надеты ферритовые трубки.

Результаты измерения напряжений в разных точках стенда при имитации ЭСР приведены на рис. 15, 16.

В целом осциллограммы, полученные для различных длин инжекторов и емкостей конденсаторов от 20 до 150 пФ, подтверждают адекватность описанной модели возникновения наведенного напряжения на жилах кабеля при ЭСР до 15 кВ в соседнее оборудование. Приведенные формулы и графики позволяют прогнозировать параметры первого наведенного импульса на кабеле U_{2m} . Амплитуда напряжения на дальнем конце кабеля 8 м и второго импульса, соответствующего вернувшейся к началу кабеля отраженной волны, несколько меньше расчетных значений из-за влияния затухания в кабеле.

Т.е. приведенные графики для определения амплитуды второго импульса U_{2m2} соответствуют худшему случаю.

Проведенные эксперименты для высоких значений напряжения ЭСР, описание которых приведено в [14, 15], выявили эффект повышения наведенного напряжения свыше расчетных значений при ЭСР с уровнем более 15 кВ. Так, наведенное напряжение на одной жиле провода в резиновой изоляции сечением 4 мм^2 , возникающее из-за воздействия импульса амплитудой от 1 до 15 кВ на расположенный на расстоянии 1 см неизолированный проводник, составляет 30 % от этого импульса, но возрастает до 50 % при напряжении 20 кВ. Этот эффект предположи-

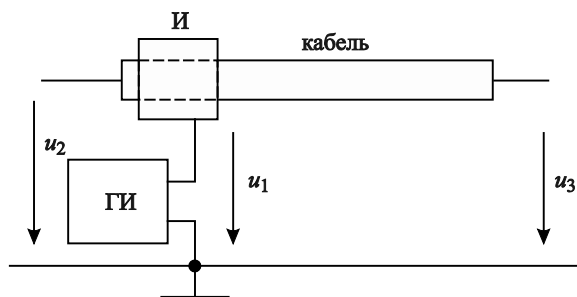


Рис. 14. Схема стенда для экспериментального исследования наведенных напряжений при электростатическом разряде

Fig. 14. Layout of the test rig for experimental studies of ESD-induced voltages

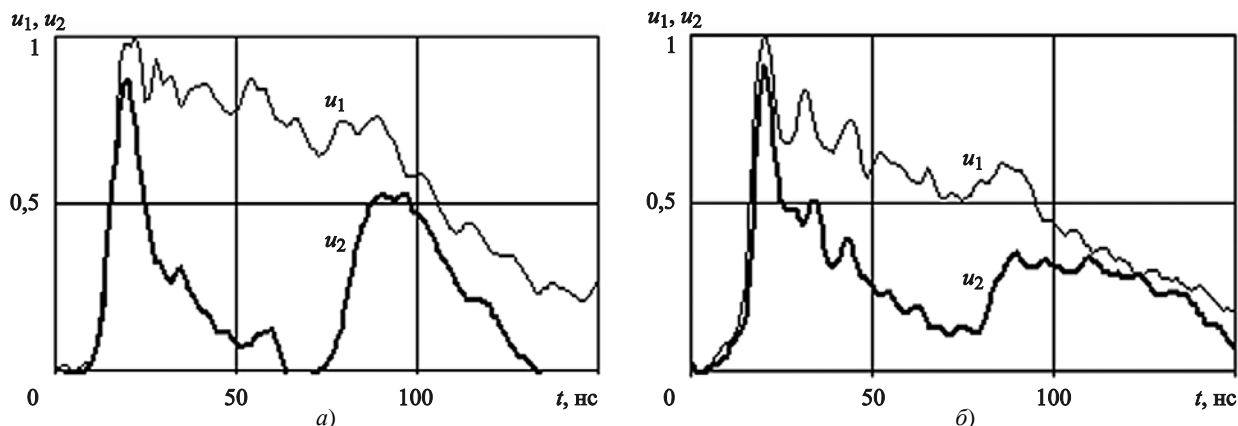


Рис. 15. Изменение напряжения на выходе генератора ИПП-4000 u_1 и напряжения u_2 на жилах кабеля КНР $3 \times 4 \text{ мм}^2$, расположенного на высоте 45 см над полом при воздействии импульсного напряжения с единичной амплитудой относительно заземления: а) на надетую на кабель металлическую трубку-инжектор диаметром 47 мм и длиной 1 м; б) на жилы кабеля через конденсатор емкостью 150 пФ

Fig. 15. Variations of voltage u_1 at the output of IPP-4000 generator and voltage u_2 on cable wires KNR $3 \times 4 \text{ mm}^2$ located 45 cm above the floor due to surge voltage of unit amplitude with respect to the grounding: а) for cable casing (injector tube (metal), diameter 47 mm, length 1 m); б) for cable wires (via 150 pF capacitor)

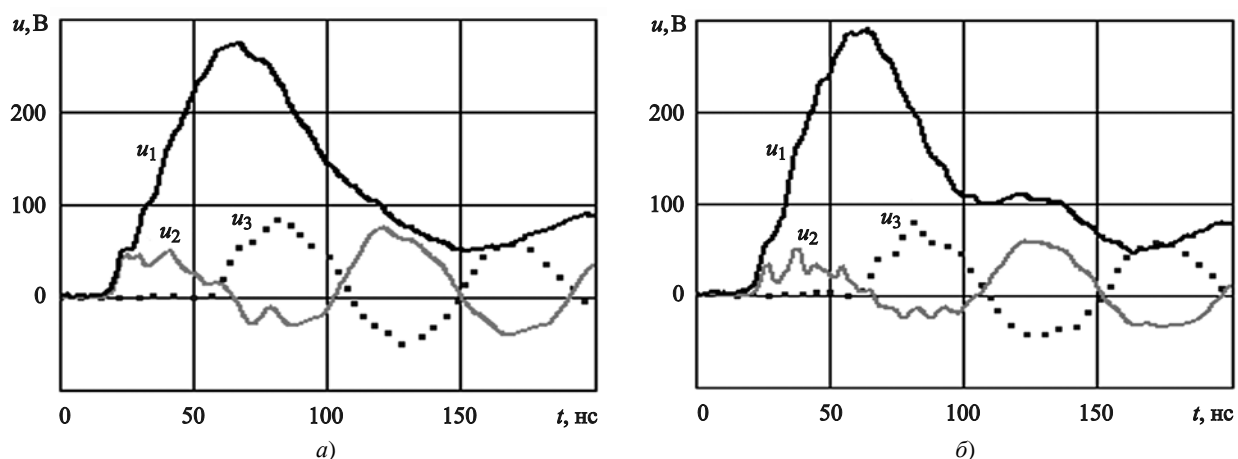


Рис. 16. Изменение напряжения на выходе генератора ИПП-4000 u_1 , напряжения на жилах в начале u_2 и конце u_3 кабеля КНР $3 \times 4 \text{ мм}^2$, проложенного по металлическому листу при подаче импульса относительно листа: а) на надетую на кабель металлическую трубку-инжектор диаметром 47 мм и длиной 1 м; б) на жилы кабеля через конденсатор емкостью 50 пФ

Fig. 16. Variations of voltage u_1 at the output of IPP-4000 generator and voltages u_2 and u_3 at respectively at input and output of KNR cable $3 \times 4 \text{ mm}^2$ resting on the metal plate, in the event of surge with respect to the plate: а) for cable casing (injector tube (metal), diameter 47 mm, length 1 m); б) for cable wires (via 150 pF capacitor)

тельно вызван явлением ионизации (возникновением короны) и требует дальнейшего изучения для различных образцов кабелей.

Выводы

Conclusion

Электростатический разряд воздействует на судовое электронное и электротехническое оборудова-

ние не только через порт корпуса, но и через порты ввода-вывода и питания. Удаленный от оборудования ЭСР может вызвать импульсные напряжения высоких уровней на внешних кабелях.

Наиболее опасен разряд непосредственно на цепи питания и передачи информации. Но разряд в цепи, отделенные от внешнего кабеля трансформатором, может также привести к попаданию высокого напряжения на жилы кабеля из-за пробоя изо-

ляции трансформатора. Разряд в экран кабеля или в расположенный рядом металлический предмет приводит к появлению наведенных импульсных напряжений на жилах кабеля. Расчет наведенного напряжения осуществляется по приведенным в работе формулам, а распространение импульсных напряжений по кабелю необходимо проводить методом распространяющихся волн.

Результаты измерений и моделирования дают информацию о возможных параметрах воздействия ЭСР на электронное оборудование, необходимую для корректировки моделей и совершенствования средств и методов защиты от ЭСР. Наведенное напряжение при наиболее неблагоприятных условиях может приближаться к уровню напряжения на корпусе оборудования, подвергаемому ЭСР. Импульсные напряжения при ЭСР выше 15 кВ могут передаваться в цепи с большим коэффициентом по сравнению с импульсами низких уровней.

Список использованной литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов : НД № 2-020101-174. Ч. XI. Электрическое оборудование / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2025. 420 с.
2. Правила классификации и постройки морских судов : НД № 2-020101-174. Ч. XV. Автоматизация / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2024. 107 с.
3. Правила по оборудованию морских судов : НД № 2-020101-171. Ч. IV. Радиооборудование / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2025. 45 с.
4. Правила по оборудованию морских судов : НД № 2-020101-171. Ч. V. Навигационное оборудование / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2025. 133 с.
5. Правила классификации и постройки морских судов Ч. XI. Электрическое оборудование / Российское классификационное общество. Москва, 2020. 329 с.
6. ГОСТ Р МЭК 60945-2007. Морское навигационное оборудование и средства радиосвязи. Общие требования. Методы испытаний и требуемые результаты испытаний. Москва : Стандартинформ, 2009. III, 61 с.
7. ГОСТ 30804.4.2-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. Москва : Стандартинформ, 2020. II, 45 с.
8. Воршевский А.А., Гальперин В.Е. Электромагнитная совместимость судовых технических средств. Санкт-Петербург : СПбГМТУ. 2010. 317 с.

9. Электростатический разряд // КТ-160G/14G. Квалификационные требования. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (Внешние воздействующие факторы-ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. 2015. Разд. 25.0.
10. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. Москва : Технологии, 2005. 352 с.
11. Worshevsky A., Grishakov E., Dogorov D. Parameters of current and equipment case voltage produced by air electrostatic discharge // Proceedings of 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Piscataway : IEEE, 2020. P. 9245719 (p. 1–4). DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245719.
12. Воршевский А.А., Гришаков Е.С., Жиленков А.А. Формирование воздушного электростатического разряда и его влияние на цифровое промышленное оборудование // Электротехника. 2021. № 5. С. 47–52.
13. Воршевский А.А., Гришаков Е.С. Определение параметров электрического поля, возникающего при непосредственном воздействии электростатического разряда // Энергетические и электротехнические системы: международный сборник научных трудов. Магнитогорск : МГТУ им. Г.И. Носова, 2017. Вып. 4. С. 249–257.
14. Воршевский А.А., Задорожный М.Е., Яковлев П.С. Генератор высоковольтных импульсов для испытаний оборудования на воздействие вторичных эффектов электростатического разряда // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2024. Вып. 3(11). С. 16–21.
15. Задорожный М.Е., Воршевский А.А. Влияние уровня напряжения на коэффициент электромагнитной связи кабелей при оценке наведенных импульсных напряжений // Неделя науки СПбГМТУ-2024 : сборник докладов Всероссийского фестиваля науки «Наука 0+» : [в 2 т.]. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГМТУ, 2024. Т. 1. С. 265–270.

References

1. RS Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships (2025 edition). ND No. 2-020101-174. Part XI. Electric equipment. 420 p. (*in Russian*).
2. RS Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships ND No. 2-020101-174 (2024 edition). Part XV. Automation. 107 p. (*in Russian*).
3. RS Rules for the Equipment of Sea-Going Ships (2025 edition). ND No. 2-020101-171. Part IV. Radio equipment. 45 p. (*in Russian*).
4. RS Rules for the Equipment of Sea-Going Ships (2025 edition). ND No. 2-020101-171. Part V. Navigational equipment. 133 p. (*in Russian*).

5. Russian Class Society Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XI. Electric equipment. Moscow, 2020. 329 p. (*in Russian*).
6. GOST R MEK 60945-2007 / GOST R IEC 60945-2007. Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems. General requirements. Methods of testing and required test results. Moscow: Standartinform, 2009. III, 61 p. (*in Russian*).
7. GOST 30804/4/2-2013. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Immunity to electrostatic discharge. Requirements and test methods. Moscow: Standartinform, 2020. II, 45 p. (*in Russian*).
8. *Vorshevsky A.A., Galperin V.E.* Electromagnetic compatibility of marine technical equipment. St. Petersburg: SMTU, 2010. 317 p. (*in Russian*).
9. Electrostatic discharge // KT-160G/14G. Qualification requirements. Operational and environmental conditions for onboard equipment of aircraft (External factors). Requirements, norms and methods of tests, 2015, Section 25.0 (*in Russian*).
10. *Kechiev L.N., Pozhidaev Ye.D.* Protection of electronic equipment against static electricity. Moscow: Tekhnologii, 2005. 352 p. (*in Russian*).
11. *Worshevsky A., Grishakov E., Dogorov D.* Parameters of current and equipment case voltage produced by air electrostatic discharge // Proceedings of 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Piscataway: IEEE, 2020. P. 9245719 (p. 1–4). DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245719.
12. *Vorshevsky A.A., Grishakov Ye.S., Zhilenkov A.A.* Formation of airborne electrostatic discharge and its effect upon digital industrial equipment // *Elektrotehnika*. 2021. No. 5. P. 47–52 (*in Russian*).
13. *Vorshevsky A.A., Grishakov Ye.S.* Determination of parameters for electric field created by indirect electrostatic discharge // Power and electric engineering systems: International Compendium of Papers. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2017. Vol. 4. P. 249–257 (*in Russian*).
14. *Vorshevsky A.A., Zadorozhny M.Ye., Yakovlev P.S.* High-voltage pulse generator for equipment tests under secondary ESD effects // Transactions of SMTU. 2024. Vol. 3(11). P. 16–21 (*in Russian*).
15. *Zadorozhny M.Ye., Vorshevsky A.A.* Voltage level effect upon electromagnetic coupling coefficient of cables in the assessment of induced surge voltages // SMTU

Science Week 2024: Compendium of Papers, *Nauka 0+* All-Russian Science Festival. In 2 vol. St. Petersburg: SMTU, 2024. Vol. 1. P. 265–270 (*in Russian*).

Сведения об авторах

Воршевский Александр Алексеевич, д.т.н., заведующий кафедрой ФГОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. Тел.: +7 (812) 994-73-43. E-mail: elemcom@smtu.ru.

Воршевский Петр Александрович, к.т.н., доцент ФГОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. Тел.: +7 (812) 494-09-59. E-mail: petekw@rambler.ru.

Задорожный Михаил Евгеньевич, студент ФГОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: misha03kmv@gmail.com.

Яковлев Павел Сергеевич, заведующий лабораторией ФГОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: iakovlevps@gmail.com.

About the authors

Alexander A. Worshevsky, Dr. Sci. (Eng.), Department Chairman, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. Tel.: +7 (812) 994-73-43. E-mail: elemcom@smtu.ru.

Pyotr A. Vorshevsky, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. Tel.: +7 (812) 494-09-59. E-mail: petekw@rambler.ru.

Mikhail Ye. Zadorozhny, Student St. Petersburg State Marine Technical University, address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: misha03kmv@gmail.com.

Pavel S. Yakovlev, Head of Laboratory, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: iakovlevps@gmail.com.