

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_04_XX

EDN: BHILUI

УДК 621.373.1

Оценка импульсных помех на кабеле при косвенном электростатическом разряде

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Международные и отечественные стандарты требуют обеспечения устойчивости технических средств к электростатическому разряду. Опыт проведения испытаний показывает, что аппаратура, спроектированная без учета этих требований, сбивается при таких воздействиях. Стандарт IEC 61000-4-2 дает методику испытаний и предусматривает разряды в корпус технических средств и в расположенные рядом металлические листы. Между тем возможны электростатические разряды и в удаленное оборудование, расположенное вблизи кабельных трасс, связанных с аппаратурой. Важно уметь прогнозировать эффекты воздействия удаленных разрядов через внешние кабели технических средств.

Цель — дать математическую модель для оценки наведенных напряжений в кабелях при удаленном электростатическом разряде, что позволит прогнозировать результат воздействия и такого вида разряда на различное оборудование.

Материалы и методы. Результаты работы базируются на требованиях Российского морского регистра судоходства по электромагнитной совместимости, стандарта IEC 61000-4-2. Использовано математическое

описание воздействия разряда через емкостную связь между объектом и кабелем, который рассматривается как цепь с распределенными параметрами. Расчеты выполнены с использованием математического пакета и проверены сравнением с результатами моделирования SPICE-программой и с экспериментальными данными.

Результаты. Даны аналитические выражения для расчета наведенного напряжения в кабелях, вызванного электростатическим разрядом в соседний объект, результаты расчета при широкой вариации исходных данных. Приведены графики изменения напряжения, полученные моделированием и в ходе натурных экспериментов. Описана установка, в которой в качестве источника разрядов использовались аттестованные испытательные генераторы. Представлены полученные зависимости для определения амплитуды, длительности фронта и длительности наведенного напряжения на кабеле от емкости связи и длительности фронта напряжения на объекте, в который произошел разряд.

Выводы. Приведенные выражения для расчета наведенного напряжения на кабелях и результаты проведенных расчетов рекомендуются к использованию при прогнозировании возможных уровней помех на кабелях при косвенном электростатическом разряде. Полученные зависимости амплитуды, длительности фронта, длительности наведенного напряжения на кабеле от емкости связи и длительности фронта напряжения на оборудовании пригодны для оперативной оценки ожидаемых параметров помех на кабелях при проведении работ по обеспечению электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: косвенный электростатический разряд; кабель; импульсная помеха; электромагнитная совместимость.

КАК ЦИТИРОВАТЬ

Воршевский А.А., Воршевский П.А., Задорожный М.Е., Яковлев П.С. Оценка импульсных помех на кабеле при косвенном электростатическом разряде //

Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 4. С. XX–XX. DOI: 10.52899/24141437_2025_04_XX
EDN: BHILUI

РУКОПИСЬ ПОЛУЧЕНА: 16.03.2025

РУКОПИСЬ ОДОБРЕНА: 09.09.2025

ОПУБЛИКОВАНА ONLINE: 03.11.2025

EVALUATION OF PULSE INTERFERENCE ON A CABLE DURING INDIRECT ELECTROSTATIC DISCHARGE

Alexander A. Worshevsky, Petr A. Vorshevskii, Mihail E. Zadorozhny, Pavel S. Yakovlev

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: International and domestic standards require that technical equipment be resistant to electrostatic discharge. Testing experience shows that equipment designed without these requirements is disrupted by the discharge. The IEC 61000-4-2 standard provides a test method and includes discharges into the equipment enclosure and nearby metal sheets. However, electrostatic discharges can also occur in remote equipment located near cable routes connected to the equipment. It is important to be able to predict the effects of remote discharges through external cables of technical equipment.

The purpose of this work is to provide a mathematical model of induced voltages process in cables during remote electrostatic discharge, which will allow us to predict the effects of this type of discharge on various equipment.

MATERIALS AND METHODS: The results of the work are based on the requirements of the Russian Maritime Register of Shipping for electromagnetic compatibility, the IEC 61000-4-2 standard. It is used the mathematical description of the effect of a discharge through a capacitive connection between an object and a

cable, which is considered as a distributed parameter circuit. The calculations are performed using a mathematical package and verified by comparing the results with those obtained from the SPICE program and experimental data.

RESULTS: Analytical expressions for calculating the induced voltage in cables caused by electrostatic discharge into an adjacent object are given, as well as the results of calculations with a wide variation of initial data. Graphs of voltage changes obtained by modeling and during field experiments are presented. Certified test generators are used as a source of discharges in experimental setup. The obtained dependencies are presented for determining the amplitude, front duration, and induced voltage duration on the cable, depending on the coupling capacitance and the voltage front duration on the object where the discharge occurred.

CONCLUSIONS: The given expressions for calculating the induced voltage on cables and the results of the calculations are recommended for use in predicting possible levels of interference on cables during indirect electrostatic discharge. The obtained dependences of the amplitude, the duration of the front, the duration of the induced voltage on the cable from the capacitance of the connection and the duration of the voltage front on the equipment are suitable for an operational assessment of the expected parameters of interference on cables during the implementation of electromagnetic compatibility work.

Keywords: indirect electrostatic discharge; cable; pulse interference; electromagnetic compatibility.

To cite this article

Worshevsky AA, Vorshevskii PA, Zadorozhny ME, Yakovlev PS. Evaluation of pulse interference on a cable during indirect electrostatic discharge. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025; 4(4):XX–XX. DOI: 10.52899/24141437_2025_04_XX EDN: BHILUI

SUBMITTED: 16.03.2025

ACCEPTED: 09.09.2025

PUBLISHED ONLINE: 03.11.2025

Accepted for publication

ВВЕДЕНИЕ

Технические средства (ТС) различного назначения, в том числе поставляемые на суда и промышленные предприятия, должны быть устойчивы к электростатическому разряду (ЭСР) со стандартными параметрами. Методика проведения испытаний на воздействие ЭСР приведена в базовом стандарте ГОСТ 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2) [1]. При испытаниях проводятся прямые разряды в корпус ТС и косвенные разряды в рядом расположенные металлические листы, имитирующие соседнее оборудование, в которое может произойти разряд в ходе эксплуатации. Используется испытательное напряжение 8 кВ для судового и промышленного оборудования, 15 кВ для оборудования электростанций и атомных станций, есть требования испытаний напряжением до 25 кВ. Ток стандартного разряда имеет время нарастания (фронт) менее 1 нс, длительность в десятки наносекунд и амплитуду в десятки ампер. Параметры напряжения, появляющегося на ТС при испытаниях стандартным разрядом заданного напряжения, не регламентируются и зависят от его габаритов, расположения относительно земли, параметров цепи заземления. При прямом разряде на металлический корпус ТС на нем может появиться в зависимости от испытательного воздействия импульсное напряжение от 1 до 20 кВ с фронтом от единиц до сотен наносекунд с длительностью, в основном определяемой цепью заземления. Эта длительность может принимать значение от десятков наносекунд до миллисекунд. С увеличением габаритов оборудования растет его емкость относительно земли, что приводит к увеличению длительности фронта и уменьшению амплитуды импульса напряжения. При уменьшении сопротивления и индуктивности заземления уменьшается амплитуда и длительность импульсного напряжения. Ток разряда и напряжение на корпусе приводят к появлению наведенных импульсов в цепях, расположенных внутри корпуса, что вызывает сбои в работе ТС. Возможные параметры напряжения на корпусе при различных условиях и его влияние на работу оборудования рассмотрены в [2–4]. Косвенный разряд создает импульсное электромагнитное поле, которое

воздействует на ТС не только через корпус, но и через подключенные к ТС кабели. Целью настоящей работы является оценка амплитуды импульсных помех, возникающих на кабелях, проложенных вблизи от корпуса оборудования, на которое воздействует электростатический разряд.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ НА КАБЕЛЯХ ПРИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ НА СОСЕДНЕМ С НИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Источник электростатического разряда И (заряженный статическим электричеством человек, а при испытаниях — генератор ЭСР, содержащий заряжаемый от источника высокого напряжения накопительный конденсатор) разряжается на оборудование О через воздушный промежуток между электродом Э и оборудованием (рис. 1). Электрод Э имитирует палец человека. В результате на корпусе оборудования возникает импульсное напряжение u_1 с параметрами, описанными в [2–4]. Электрическое поле, создаваемое корпусом, находящимся под напряжением, наводит напряжение u_2 на кабеле-рецепторе.

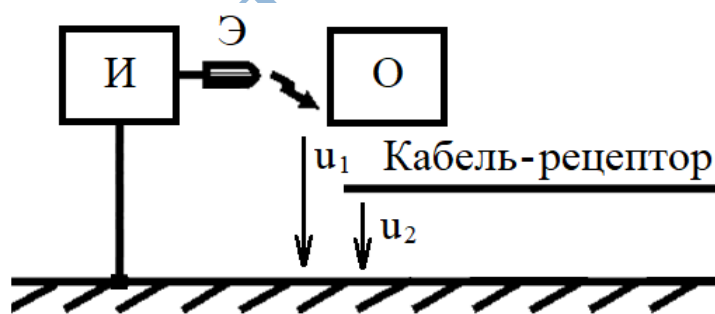


Рис. 1. Схема, поясняющая возникновение импульсного напряжения на оборудовании и кабеле.

Fig. 1. Diagram explaining the occurrence of pulse voltage on equipment and cable.

Влияние электрического поля может быть описано как воздействие напряжения u_1 на кабель через емкость связи C между корпусом оборудования О и кабелем (рис. 2) [5]. Длительность фронта напряжения

меньше времени распространения волны напряжения по кабелям судовой длины, что требует рассмотрения кабеля как длинной линии с распределенными параметрами. Волновое сопротивление кабеля Z для распространения несимметричных помех (проводник–земля) зависит от высоты прокладки кабеля над землей (корпусом судна), размеров проводников, свойств изоляционного материала и может быть определено расчетным путем по формулам, приведенным в [5], или измерено экспериментально с помощью измерителя неоднородностей линии (импульсного рефлектометра). Эквивалентная схема реального испытательного генератора (ГИ) описана в [2]. На данном этапе оценки амплитуды напряжения на кабеле используем упрощенную схему (рис. 2, *b*), где реальный источник ЭСР эквивалентруется идеальным источником электродвижущей силы (ЭДС) e биэкспоненциальной формы и активным сопротивлением R_1 .



Рис. 2. Схема расчета напряжения на кабеле при воздействии косвенного электростатического разряда: *a* — расположение элементов; *b* — упрощенная схема замещения.

Fig. 2. Calculation scheme of the voltage on the cable under the influence of indirect electrostatic discharge: *a* — arrangement of elements; *b* — simplified replacement scheme.

Изменение ЭДС во времени может быть описано формулой:

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

где τ_1 — постоянная времени нарастания, τ_2 — постоянная времени спада формируемого импульса напряжения. При отсутствии кабеля-нагрузки Z напряжение u_1 совпадает с ЭДС e , а амплитуда импульсного напряжения u_1 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 наличии конденсатора и кабеля амплитуда напряжения u_1 уменьшается, но превышает значение

$$U_{m1} = U_m \frac{Z}{R_1 + Z}.$$

В соответствии со стандартами по электромагнитной совместимости, например в ИЕС 61000-4-4, время нарастания (длительность фронта) импульсов напряжения определяется на уровнях 10–90% от амплитуды, а длительность определяется на уровне 50% от амплитуды. Для получения длительности фронта 5 нс, длительности импульса 50 нс и единичной амплитуды $U_m=1$ следует положить $E=1,261$, $\tau_1=3,3 \cdot 10^{-9}$ с, $\tau_2=56 \cdot 10^{-9}$ с

Появившийся на кабеле импульс напряжения начинает распространяться по кабелю, отражается и преломляется в точках изменения волнового сопротивления, в результате чего формируется изменение напряжения в интересующих разработчика ТС точках, в частности на информационном входе ТС. В тему данной работы не входит рассмотрение эффектов распространения импульсных напряжений в кабельной сети, а ставится задача прогнозирования амплитуды напряжения в точке возникновения.

Напряжение на кабеле до прихода отраженных волн изменяется по закону:

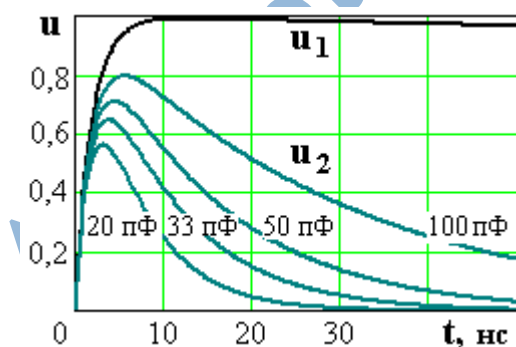
$$u_2(t) = E \cdot R_2 \cdot C \left(\frac{1}{\tau_1 - T} e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \frac{1}{\tau_2 - T} e^{-\frac{t}{\tau_2}} - \frac{\tau_2 - \tau_1}{(\tau_2 - T)(\tau_1 - T)} e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (2)$$

где $T=C \cdot (R1+Z)$.

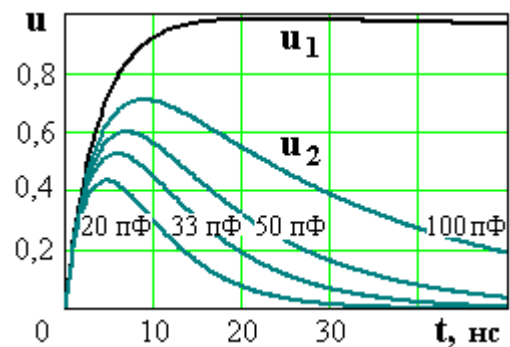
РЕЗУЛЬТАТ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ НА КАБЕЛЕ ПРИ КОСВЕННОМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ

Расчеты изменения напряжения в начале кабеля, выполняемые по формуле (2) с помощью обычных математических пакетов при широкой вариации исходных данных, позволяют получить зависимости параметров импульса от различных условий.

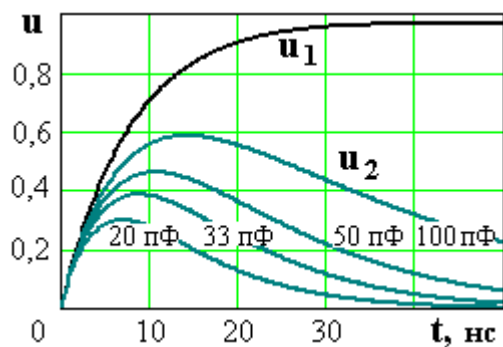
Влияние емкости связи C и длительности фронта t_f , создаваемого источником помех, на форму напряжения на кабеле может быть продемонстрировано графиками на рис. 3. Напряжение u_1 создается в схеме на рис. 2, b при воздействии ЭДС e , описываемой формулой (1), длительностью 1 мкс при $E=1$. Длительности фронта взяты минимально возможной величины 5, 10, 20, 30 нс при длительности импульса 1 мкс. С уменьшением фронта амплитуда напряжения u_2 на кабеле с волновым сопротивлением Z растет и превышает 80% от амплитуды напряжения на соседнем оборудовании при емкости связи между этим оборудованием и кабелем 100 пФ и длительности фронта 5 нс (рис. 4).



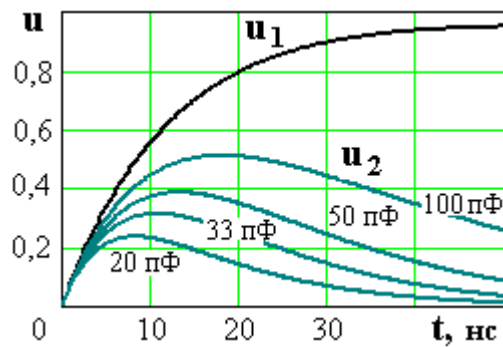
a



b



c



d

Рис. 3. Изменение напряжения на выходе генератора u_1 длительностью $t_{И}=1$ мкс с разной длительностью фронта $t_{Ф}$ и создаваемое им изменение напряжения на кабеле u_2 при $R_1=10$ Ом, $Z=283$ Ом, $E=1$, различных емкостях связи $C=20; 33; 50; 100$ пФ для следующих длительностей фронта: а — $t_{Ф}=5$ нс; б — $t_{Ф}=10$ нс; в — $t_{Ф}=20$ нс; д — $t_{Ф}=30$ нс.

Fig. 3. Voltage change at the output of the generator u_1 with a duration of $t_I = 1$ microsecond with different edge lengths t_F and the voltage change created by it on the cable u_2 at $R_1 = 10$ ohms, $Z = 283$ ohms, $E = 1$, various communication capacitances $C = 20; 33; 50; 100$ pF for the following edge lengths: а — $t_F = 5$ ns; б — $t_F = 10$ ns; в — $t_F = 20$ ns; д — $t_F = 30$ ns.

При емкости связи 20 пФ можно ожидать на кабеле амплитуды импульсного напряжения до 50% от напряжения на оборудовании. Короткие фронты тока и напряжения при ЭСР дают значительно более высокие значения наведенного напряжения по сравнению с импульсными помехами с микросекундными длительностями фронта. В последнем случае наведенное напряжение определяется отношением $u_2/u_1 = C/(C+C_2)$ [5], где C_2 — полная емкость кабеля относительно земли, которая во много раз больше емкости C .

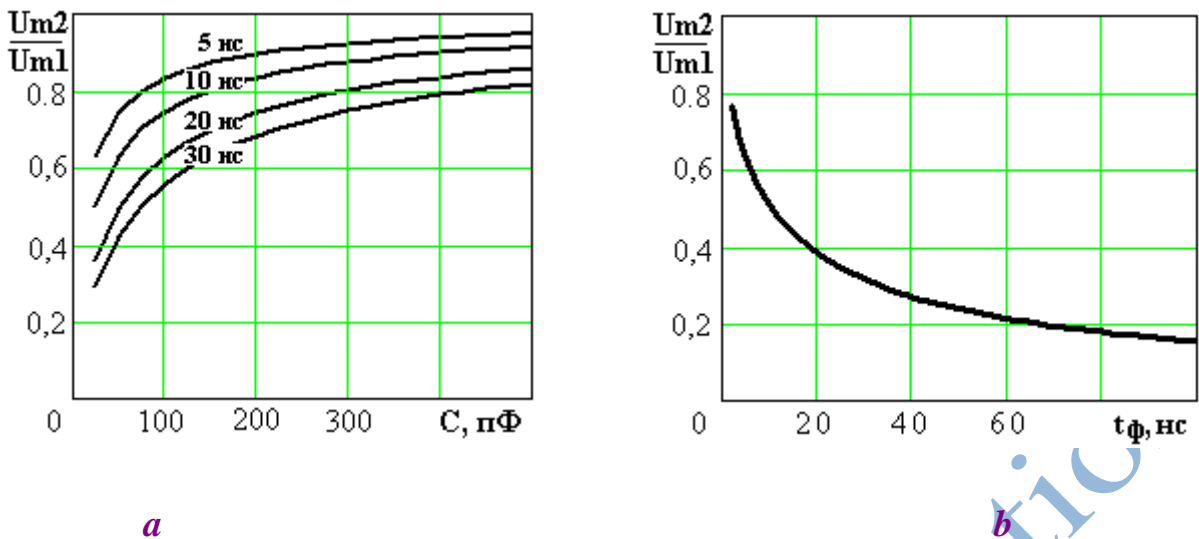
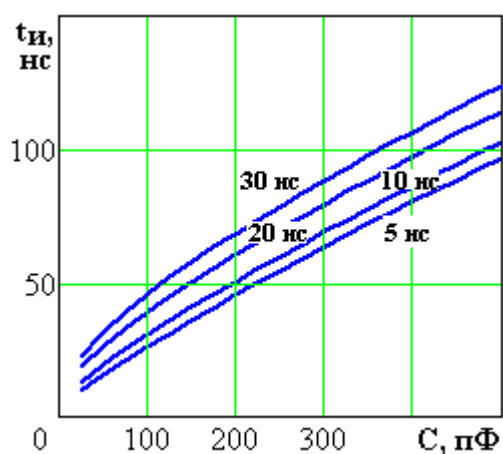


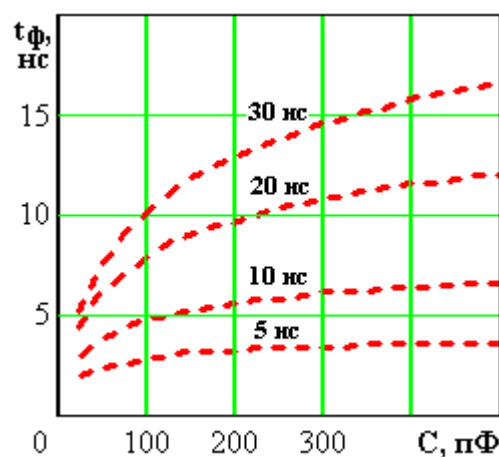
Рис. 4. Зависимости амплитуды напряжения на кабеле U_{m2} по отношению к амплитуде U_{m1} на входе цепи при $t_{и}=1$ мкс, $R_1=10$ Ом, $Z=283$ Ом: *a* — от емкости связи C при указанных длительностях фронта; *b* — от длительности фронта при $C=33$ пФ.

Fig. 4. Dependences of the voltage amplitude on the U_{m2} cable with respect to the U_{m1} amplitude at the circuit input at $t_i=1$ μ s, $R_1=10$ ohms, $Z=283$ ohms: *a* — depends on the communication capacity C at the specified front lengths; *b* — on the front length at $C = 33$ pF.

Расчеты по формуле (2) с одновременным анализом длительности на уровне 50% и фронта на уровне 10–90% импульса напряжения на кабеле позволяют определить зависимости длительности $t_{и}$ и фронта $t_{ф}$ от емкости конденсатора связи C (рис. 5). Важным для оценки влияния наведенного импульсного напряжения на цифровую технику является факт, что длительность фронта этого импульса меньше фронта исходного импульса на оборудовании (рис. 5, *b*). Более короткий фронт помехи вызывает сбой в работе ТС с большей вероятностью, т. к. создает большие наведенные напряжения в цепях микросхем ТС.



a



b

Рис. 5. Зависимость а) длительности $t_{И}$ и в) фронта $t_{Ф}$ импульса напряжения на кабеле от емкости связи C при подаче на вход цепи импульса напряжения длительностью $t_{И}=1$ мкс с фронтами 5, 10, 20, 30 нс при $R1=10$ Ом, $Z=283$ Ом.

Fig. 5. The dependence of a) the duration of the t_I and b) the edge t_F of the voltage pulse on the cable on the communication capacitance C when a voltage pulse of duration $t_I = 1$ microsecond with fronts 5, 10, 20, 30 ns at $R1 = 10$ ohms, $Z = 283$ ohms is applied to the input of the circuit.

Результаты применения моделирующей SPICE-программы для получения графиков изменения напряжений во времени (рис. 6) в той же схеме на рис. 2, *b* показывают хорошее совпадение с результатами расчетов на рис. 3. Но применение обычных математических пакетов для расчетов по приведенным аналитическим выражениям дает возможность построения требуемых зависимостей параметров помех от самых различных исходных условий.

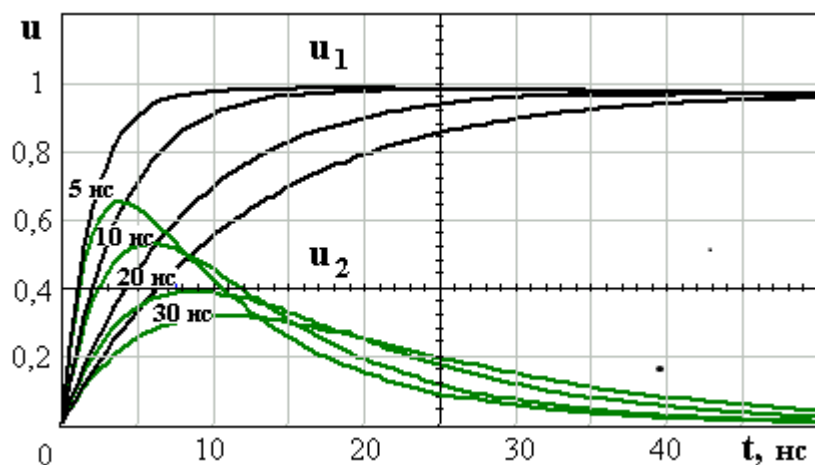
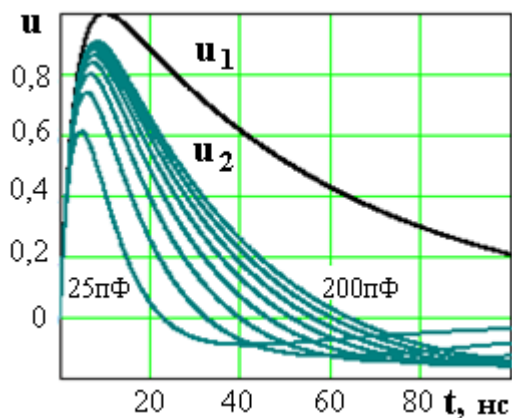


Рис. 6. Изменения напряжения на выходе генератора u_1 длительностью 1 мкс и напряжения на кабеле u_2 при $C=33$ пФ, $R_1=10$ Ом, $R_2=283$ Ом, $E=1$ и указанных значениях длительности фронта, полученные моделированием SPICE-программой.

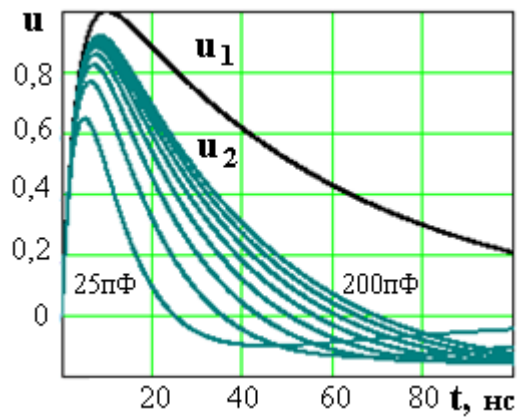
Fig. 6. Changes in the voltage at the output of the generator u_1 with a duration of 1 microsecond and the voltage on the cable u_2 at $C = 33$ pF, $R_1 = 10$ ohms, $R_2 = 283$ ohms, $E = 1$ and the indicated values of the edge duration, obtained by simulating the SPICE program.

При уменьшении длины заземления оборудования, в которое производится ЭСР, уменьшается длительность импульса напряжения на оборудовании вплоть до десятков наносекунд. Для оценки влияния емкости связи C и величины волнового сопротивления кабеля Z на параметры формируемого импульса напряжения на кабеле и для этого случая проведены расчеты при фронте импульсного напряжения 5 нс и длительности 50 нс, что соответствует временным параметрам импульсного напряжения по ГОСТ ИЕС 61000-4-4 [6]. Полученные графики (рис. 7, 8) пригодны для оценки локального воздействия наносекундных импульсных помех на кабель. Результаты расчетов показывают, что возникающие на кабеле импульсные напряжения при косвенном электростатическом разряде или появлении на соседнем оборудовании наносекундных импульсных помех могут иметь амплитуды уровня киловольт при длительности фронта от 5 нс и длительности импульса в

десятки наносекунд, что делает их одним из самых значимых факторов при оценке помехоустойчивости технических средств при проведении работ по обеспечению электромагнитной совместимости.



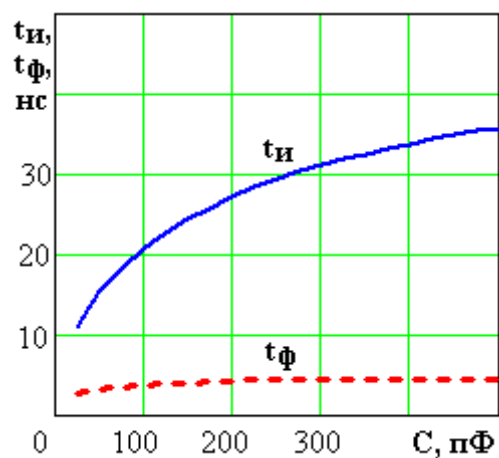
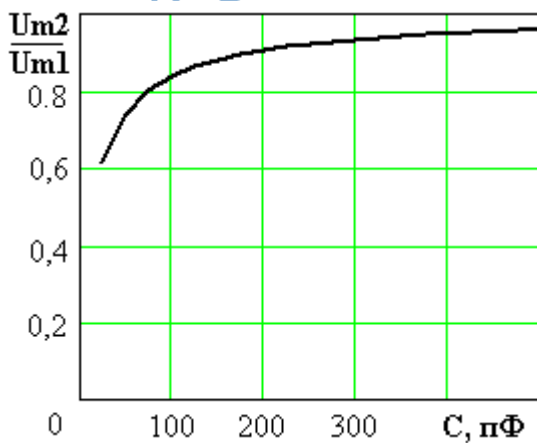
a



b

Рис. 7. Форма импульсного напряжения u_1 генератора ИПП-4000 (верхняя кривая) и напряжения u_2 на кабеле (нижние кривые) при $U_{m1}=1$ для емкостей связи C , изменяющихся с шагом 25 пФ от 25 пФ до 200 пФ: *a* — $Z=283$ Ом; *b* — $Z=350$ Ом.

Fig. 7. The shape of the pulse voltage u_1 of the IPP-4000 generator (upper curve) and the voltage u_2 on the cable (lower curves) at $U_{m1} = 1$ for communication capacitances C , varying in increments of 25 pF from 25 pF to 200 pF: *a* — $Z=283$ ohms; *b* — $Z=350$ ohms.



a

b

Рис. 8. Зависимости а) относительной амплитуды U_{m2}/U_{m1} , б) длительности $t_{И}$ и фронта $t_{Ф}$ импульсного напряжения на кабеле u_2 от емкости связи C при подаче на вход цепи импульса напряжения длительностью 50 нс с фронтом 5 нс, $R_1=50$ Ом, $R_2=283$ Ом.

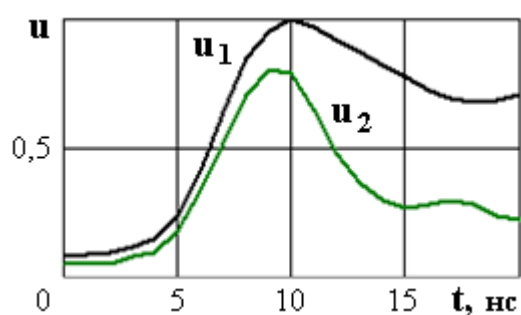
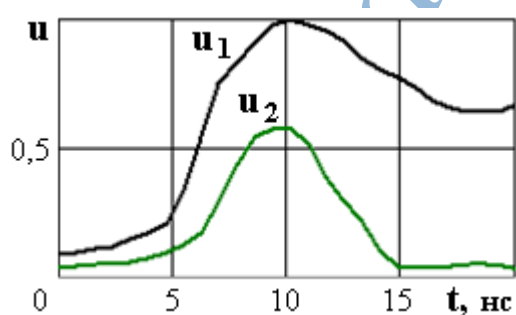
Fig. 8. Dependences a) of the relative amplitude U_{m2}/U_{m1} , b) of the duration t_I and the edge t_F of the pulse voltage on the u_2 cable on the communication capacitance C when a 50 ns voltage pulse with a 5 ns edge is applied to the input of the circuit, $R_1= 50$ ohms, $R_2= 283$ ohms.

Импульсные напряжения на соседнем оборудовании, подвергаемом воздействию ЭСР при длительности 50 нс и фронте 5 нс, способны вызвать наведенное напряжение на кабеле более 60% по отношению к напряжению на оборудовании при емкости связи более 25 нс.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ, ВЫЗЫВАЕМЫХ НА КАБЕЛЕ КОСВЕННЫМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ

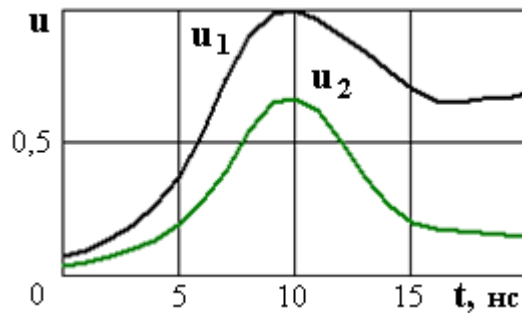
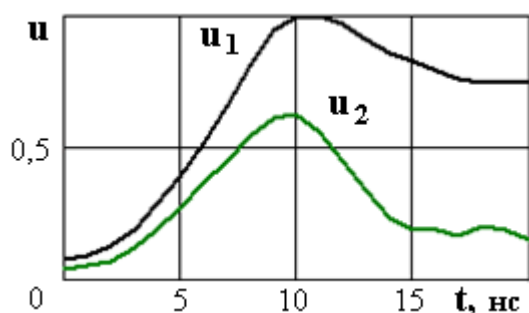
Для оценки адекватности рассмотренной математической модели расчета импульсных напряжений на кабеле при косвенном ЭСР произведены многочисленные натурные эксперименты. В качестве генераторов импульсов использовались имитаторы ЭСР, соответствующие требованиям [1] и способные создавать воздушные разряды до 20 кВ, а также экспериментальный генератор с напряжением до 50 кВ [4]. Параметры импульса напряжения при возникновении каждого конкретного воздушного разряда существенно различаются даже при неизменном напряжении генератора и расстоянии между электродами, т. к. формирование разряда в воздухе носит случайный характер. Поэтому при использовании воздушного разряда требуется статистическая обработка результатов измерений [2]. Более фиксированные характеристики импульсов дает имитатор пачек помех ИПП-4000, т. к. в нем используется

управляемый газовый разрядник с более стабильным формированием разряда. Этот тип генератора используется для испытаний по ИЕС 61000-4-4 и создает импульсные напряжения до $4 \text{ кВ} \pm 10\%$ длительностью $50 \text{ нс} \pm 30\%$ с фронтом $5 \text{ нс} \pm 30\%$ [5, 6]. Примеры осциллограмм напряжения u_1 , подаваемого от генератора ИПП-4000 через конденсатор на конкретный провод, и напряжения u_2 на проводе относительно земли приведены на рис. 9. Характер кривых близок к кривым на рис. 7, но есть и отличия, обусловленные наличием индуктивности в разрядной цепи, не учитываемой схемой на рис. 2. Наблюдается такой же как в расчете рост амплитуды напряжения на кабеле (проводе) при увеличении емкости конденсатора связи C . С ростом высоты прокладки провода растет волновое сопротивление Z и несколько увеличивается амплитуда напряжения, что также соответствует расчету. На осциллограммах заметна некоторая нестабильность длительности фронта импульсного напряжения, создаваемого генератором, но она соответствует требованиям стандарта и значительно меньше, чем при использовании воздушного разряда.



a

b



c

d

Рис. 9. Осциллограммы напряжения u_1 , создаваемого генератором ИПП-4000 на входе цепи, и напряжения u_2 на проводе сечением $2,5 \text{ мм}^2$, проложенного по полу лаборатории: *a* — $C=20 \text{ пФ}$; *b* — $C=50 \text{ пФ}$; *c* — $C=33 \text{ пФ}$; *d* — $C=33 \text{ пФ}$ (при прокладке провода на высоте 45 см над полом).

Fig. 9. Waveforms of the voltage u_1 generated by the IPP-4000 generator at the input of the circuit and the voltage u_2 on a 2.5 mm^2 wire laid across the laboratory floor: *a* — $C=20 \text{ pF}$; *b* — $C=50 \text{ pF}$; *c* — $C=33 \text{ pF}$; *d* — $C=33 \text{ pF}$ (when laying the wire at a height of 45 cm above the floor).

Для приближения к реальной ситуации разряда на соседнее оборудование в качестве физической модели оборудования использован инжектор — металлическая трубка определенной длины и диаметра, надеваемая на кабель-рецептор (рис. 10).

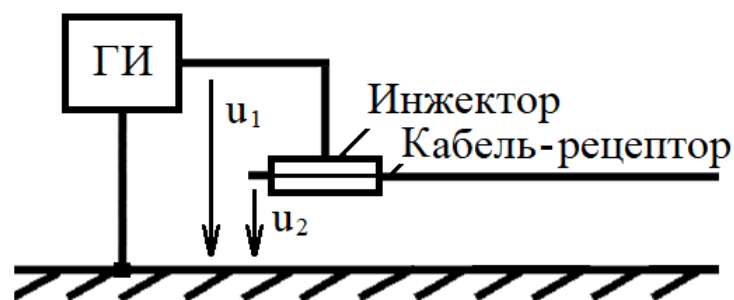


Рис. 10. Схема лабораторной установки при вводе импульсного напряжения через устройство связи — инжектор.

Fig. 10. Diagram of a laboratory installation when a pulse voltage is introduced through an injector communication device.

Примеры осциллограмм напряжения на инжекторе u_1 и напряжения u_2 на проводе даны на рис. 11. С ростом длины инжектора растет емкость между инжектором и проводом, что приводит к увеличению амплитуды наведенного напряжения. Но одновременно с этим растет емкость инжектора (физической модели оборудования) относительно земли, что увеличивает длительность

фронта импульса напряжения.

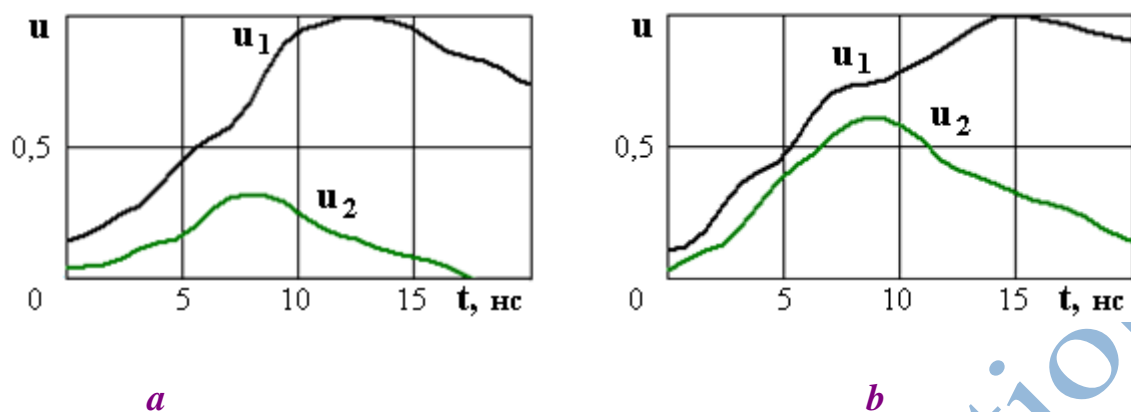


Рис. 11. Осциллограмма напряжения u_1 , создаваемого генератором ИПП-4000 на инжекторе, и напряжения u_2 на проводе сечением $2,5 \text{ мм}^2$, проложенного по полу лаборатории: *a* — инжектор диаметром 47 мм длиной 0,5 м; *b* — инжектор диаметром 47 мм длиной 1 м.

Fig. 11. An oscillogram of the voltage u_1 generated by the IPP-4000 generator on the injector and the voltage u_2 on a 2.5 mm^2 wire laid across the laboratory floor: *a* is an injector with a diameter of 47 mm and a length of 0.5 m; *b* is an injector with a diameter of 47 mm and a length of 1 m.

Сравнение результатов расчета амплитуды импульсного напряжения с результатами экспериментов для случаев воздействия импульсного напряжения через конденсатор связи разной емкости приведено на рис. 12.

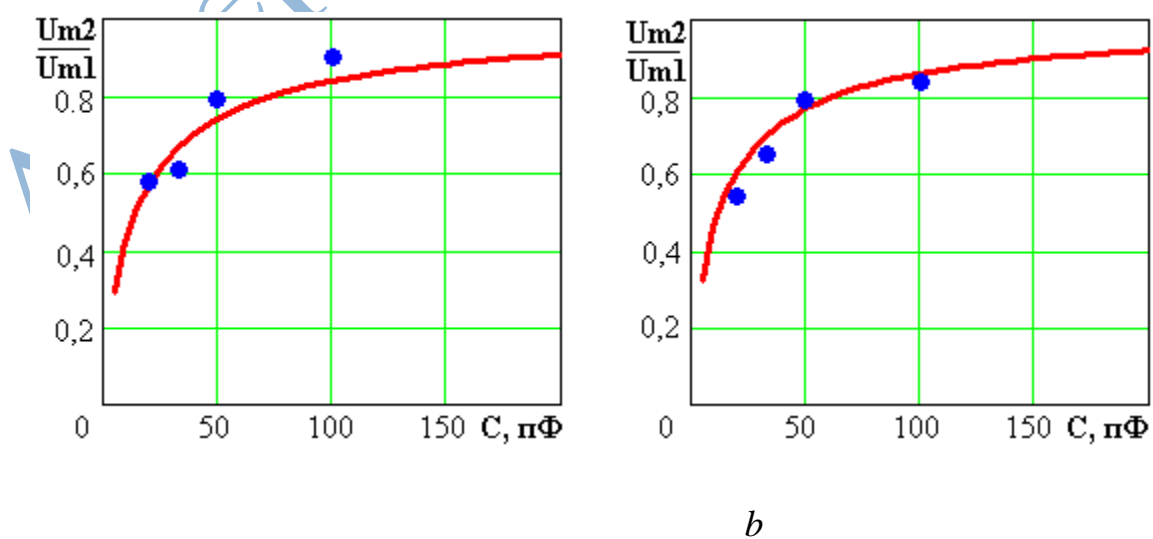


Рис. 12. Зависимости амплитуды импульсного напряжения на проводе сечением $2,5 \text{ мм}^2$, длиной 37 м от емкости конденсатора связи C (сплошная линия — расчет, синие круги — экспериментальные значения) при вводе импульсной помехи на провод относительно земли от генератора ИПП-4000: *a* — прокладка провода по полу (волновое сопротивление 283 Ом); *b* — прокладка на высоте 45 см (волновое сопротивление 350 Ом).

Fig. 12. Dependences of the amplitude of the pulse voltage on a wire with a cross—section of 2.5 mm^2 and a length of 37 m on the capacitance of the coupling capacitor C (solid line — calculation, blue circles - experimental values) when pulse interference is introduced into the wire relative to the ground from the IPP-4000 generator: *a* — laying the wire on the floor (wave resistance 283 ohms); *b* — gasket at a height of 45 cm (wave resistance 350 ohms).

Величина относительного отклонения результатов измерения и расчета амплитуды импульсного напряжения на проводе, возникающего при воздействии импульсного напряжения длительностью 50 нс с фронтом 5 нс через конденсатор емкостью от 20 до 100 пФ , не превышает 10% .

ВЫВОДЫ

Импульсные помехи, возникающие на кабелях при электростатическом разряде, способны вызвать сбои в работе различных технических средств. Приведенные аналитические выражения для расчета наведенного напряжения, обусловленного электростатическим разрядом, и результаты расчета при широкой вариации исходных данных рекомендуются к использованию при прогнозировании возможных уровней помех при косвенном электростатическом разряде. Сравнение с результатами моделирования SPICE-программой и измерениями в ходе натурных экспериментов подтверждает адекватность математической модели. Полученные зависимости амплитуды, длительности фронта, длительности наведенного напряжения на кабеле от

емкости связи и длительности фронта напряжения на оборудовании пригодны для оперативной оценки ожидаемых параметров импульсных помех на кабелях при проведении работ по обеспечению электромагнитной совместимости.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Авторы одобрили версию для публикации, а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой ее части.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре.

ADDITIONAL INFO

Authors contributions. All the authors approved the version of the draft to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities or interests for

the last three years related with for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: In preparing this work, the authors did not use previously published material (text, illustrations, or data).

Generative AI: Generative AI technologies were not used in the preparation of this article.

Provenance and peer-review: This work was submitted to the journal on the authors' own initiative and processed under the standard procedure.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2:2008) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2013.
2. Worshevsky A., Grishakov E., Dogorov D. Parameters of current and equipment case voltage produced by air electrostatic discharge. In: Proceedings of the 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE. Rome, 2020. doi: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245719 EDN: ABXXFR
3. Воршевский А.А., Гришаков Е.С., Жиленков А.А. Формирование воздушного электростатического разряда и его влияние на цифровое промышленное оборудование // Электротехника. № 5. 2021. С. 47–52. EDN: GUOOSM
4. Воршевский А.А., Задорожный М.Е., Яковлев П.С. Параметры электростатического разряда при напряжении выше 25 кВ. В кн.: Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции «Актуальные вопросы и современные тенденции развития электроэнергетики и электротехники», 13 сентября 2023 г. Киров: Вятский государственный университет, 2023. С. 5–9. EDN: NQTDCM

5. Воршевский А.А., Гальперин В.Е. Электромагнитная совместимость судовых технических средств. СПб.: СПбГМТУ, 2010.
6. ГОСТ IEC 61000-4-4-2016. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-4. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к электрическим быстрым переходным процессам (пачкам). 2016. М.: Стандартиформ, 2013.

REFERENCES

1. GOST 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2:2008). Electromagnetic compatibility of technical equipment. Immunity to electrostatic discharge. Requirements and test methods. Moscow: Standartinform; 2013. (In Russ.)
2. Worshevsky A, Grishakov E, Dogorov D. Parameters of current and equipment case voltage produced by air electrostatic discharge. In: *Proceedings of the 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE*. Rome; 2020. (In Russ.)
doi:10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245719 EDN: ABXXFR
3. Vorshevsky AA, Grishakov ES, Zhilenkov AA. Formation of an air electrostatic discharge and its impact on digital industrial equipment. *Electrotekhnika*. 2021;(5):47–52. (In Russ.) EDN: GUOOCM
4. Vorshevsky AA, Zadorozhny ME, Yakovlev PS. Parameters of electrostatic discharge at voltages above 25 kV. In: *Collection of Materials of the All-Russian Scientific and Methodological Conference "Current Issues and Modern Trends in the Development of Electric Power and Electrical Engineering," September 13, 2023*. Kirov: Vyatka State University; 2023:5–9. (In Russ.) EDN: NQTDCM
5. Vorshevsky AA, Galperin VE. Electromagnetic compatibility of marine technical equipment. St. Petersburg: SPbSMTU; 2010.
6. GOST IEC 61000-4-4-2016. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-4. Testing and measurement techniques. Electrical fast transient/burst immunity

ОБ АВТОРАХ	AUTHORS' INFO
*Воршевский Александр	*Alexander A. Worshevsky, Dr. Sci.
Алексеевич, д-р техн. наук, доцент;	(Engineering), Associate Professor;
Адрес:	elibrary SPIN: 6357-8486,
elibrary SPIN: 6357-8486,	e-mail: elemcom@smtu.ru
e-mail: elemcom@smtu.ru	Petr A. Vorshevskii, Cand. Sci.
Воршевский Петр Александрович,	(Engineering), Associate Professor;
канд. техн. наук, доцент;	elibrary SPIN: 9819-0704,
elibrary SPIN: 9819-0704,	e-mail: petekw@rambler.ru
e-mail: petekw@rambler.ru	Mikhail E. Zadorozhny;
Задорожный Михаил Евгеньевич;	e-mail: misha03kmv@gmail.com
e-mail: misha03kmv@gmail.com	Pavel S. Yakovlev;
Яковлев Павел Сергеевич;	e-mail: iakovlevps@gmail.com
e-mail: iakovlevps@gmail.com	

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author