

Оригинальное исследование

УДК 621.373.1

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_393

EDN: UJTAQB

Математические и схемные модели испытательных генераторов импульсных помех для расчетов в области электромагнитной совместимости

А.А. Воршевский, П.А. Воршевский, М.Т. Киав, Х.А. Хейн

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Судовое электронное и электротехническое оборудование не может быть поставлено на суда, если оно не соответствует требованиям по устойчивости, предъявляемым к импульсным помехам. При испытаниях оборудования, спроектированного без учета этих требований, фиксируются сбои в его работе. Важно уметь прогнозировать эффекты воздействия помех на стадии проектирования оборудования.

Цель работы — дать математические и схемные модели испытательных генераторов импульсных помех для оценки устойчивости схем оборудования к импульсным помехам при их разработке.

Методы. Результаты работы базируются на требованиях Российского морского регистра судоходства по электромагнитной совместимости, документах международной электротехнической комиссии серии IEC 61000-4. Используются математические описания сигналов импульсной формы, программы моделирования схем в области электротехники.

Результаты. Даны формулы, описывающие импульсные помехи со стандартными параметрами. Приведены детальные схемы испытательных генераторов для использования в моделирующих программах, даны примеры результатов моделирования и погрешности имитируемых параметров помех.

Выводы. Применение предложенных моделей позволяет прогнозировать результат воздействия помех на стадии проектирования оборудования до проведения испытаний на помехоустойчивость, что сокращает время и затраты на доработку оборудования.

Ключевые слова: генератор импульсных помех; математическая модель; схема для моделирования; испытания; электромагнитная совместимость.

Как цитировать

Воршевский А.А., Воршевский П.А., Киав М.Т., Хейн Х.А. Математические и схемные модели испытательных генераторов импульсных помех для расчетов в области электромагнитной совместимости // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 393–400. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_393 EDN: UJTAQB

Original Study Article

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_393

EDN: UJTAQB

Mathematical Models and Circuits of Test Impulse Noise Generators for Electromagnetic Compatibility Calculations

Alexander A. Worshevsky, Petr A. Vorshevskii, Kyaw Myat Thu, Hein Htet Aung

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Marine electronic and electrical equipment may not be supplied to ships unless it meets the impulse noise immunity requirements. Tests of equipment designed without due regard of such requirements record its failures. It is important to be able to predict the effects of noise at the equipment design stage.

AIM: To provide mathematical models and circuit simulations of test impulse noise generators to verify the impulse noise immunity of circuits during their development.

METHODS: The study is based on the electromagnetic compatibility standards of the Russian Maritime Register of Shipping and IEC 61000-4 standards of the International Electrotechnical Commission. The study uses mathematical descriptions of pulse waveforms and electrical engineering software used to simulate circuits.

RESULTS: The study provides formulas describing standard impulse noise, detailed diagrams of test generators used in simulation software, examples of models, and errors of simulated noise parameters.

CONCLUSION: The proposed models and simulations allow predicting the effect of noise at the equipment design stage prior to noise immunity tests and reduce the time and cost of equipment modification.

Keywords: impulse noise generator; mathematical model; circuit simulation; testing; electromagnetic compatibility.

To cite this article

Worshevsky AA, Vorshevskii PA, Kyaw MT, Hein HA. Mathematical Models and Circuits of Test Impulse Noise Generators for Electromagnetic Compatibility Calculations. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):393–400. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_393 EDN: UJTAQB

ВВЕДЕНИЕ

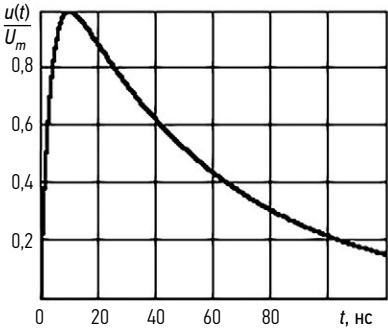
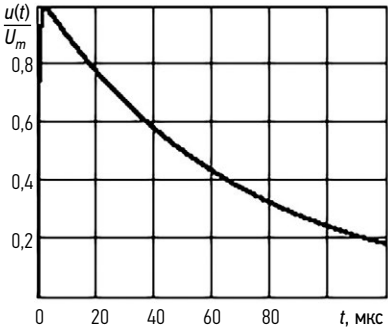
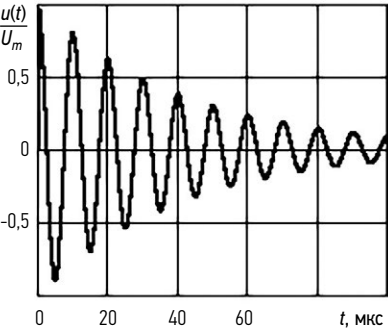
Правила Российского морского регистра судоходства, общие стандарты для оборудования промышленного, бытового, специализированного назначения, стандарты на различную продукцию регламентируют требования по устойчивости к импульсным помехам. Электронное и электротехническое оборудование должно проходить испытания на воздействие импульсных помех с определенными стандартными параметрами [1, 2]. Помехи создаются испытательными генераторами, характеристики которых приведены в базовых стандартах по электромагнитной совместимости, соответствующих международным стандартам серии IEC 61000-4. При проектировании и изготовлении различных технических средств важно обеспечить требуемую устойчивость к импульсным помехам, создаваемым испытательными генераторами. Опыт испытаний говорит, что импульсные помехи часто приводит к сбоям в работе

оборудования, спроектированного без учета такого воздействия [3, 4]. На стадии проектирования и создания прототипа оборудования необходимо иметь возможность прогнозировать результат воздействия помех, для чего требуются математические модели помех и модели схем испытательных генераторов, соответствующих базовым стандартам.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ
ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ, ИСПОЛЗУЕМЫХ
ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ

Параметры и формы импульсных помех, создаваемых при проведении испытаний, приведены в табл. 1. В первом столбце даны номера международных стандартов, на основе которых разработаны отечественные стандарты [5–7], а также наименования помех, используемых в России. В скобках приведен дословный перевод названий, применяемых в международных стандартах. Во втором

Таблица 1. Требования базовых стандартов, определяющих методику испытаний на устойчивость к импульсным помехам
Table 1. Basic standards defining the impulse noise immunity test methods

Стандарт и вид помехи	Форма помехи	Параметры
IEC 61000-4-4 Наносекундные импульсные помехи (Быстрые переходные процессы или пачки).		Амплитуда $U_m=0,5; 1; 2; 4$ кВ+10% Время нарастания (фронт) $t_{\Phi}=5$ нс+30% на уровнях 10–90% от U_m на нагрузке 50 Ом Длительность $t_H=50$ нс +30% по уровню 50% от U_m на нагрузке 50 Ом. Выходное сопротивление 50 Ом
IEC 61000-4-5 Микросекундные импульсные помехи (Выбросы напряжения)		Амплитуда $U_m=0,5; 1; 2; 4$ кВ+10% Время нарастания (фронт) $t_{\Phi}=1$ мкс+30% на уровнях 10–90% от U_m Длительность $t_H=50$ мкс +20% по уровню 50% от U_m на холостом ходу. Выходное сопротивление 2 Ом Параметры тока короткого замыкания генератора $I_m=0,25; 0,5; 1; 2$ кА+10% $t_{\Phi}=6,4$ мкс+30% $t_H=16$ мкс +20%
IEC 61000-4-18 Затухающие колебательные помехи (Затухающие колебательные волны)		Амплитуда $U_m=0,5; 1; 2; 4$ кВ+10% Время нарастания (фронт) $t_{\Phi}=75$ нс+20% на уровнях 10–90% от U_m Частота колебаний $f=0,1$ и 1 МГц +10%. Затухание менее 50% за первые 5 полупериодов и более 50% за 10 полупериодов колебания. Выходное сопротивление 200 Ом

столбце приведена форма создаваемого при испытаниях импульсного напряжения. Амплитуда импульсных помех U_m регламентируется в требованиях на конкретный вид оборудования по его месту установки, например, для судового оборудования в [1, 2], но выбирается из приведенного в третьем столбце табл. 1 ряда.

Наибольшие значения амплитуды применяются для оборудования, работающего в жесткой электромагнитной обстановке или определяющего безопасность. Указанное время нарастания (длительность фронта) импульсов определяется на уровнях 10–90% от амплитуды, но в стандартах возможно и другое определение этой величины. Необходимо всегда уточнять в нормативном документе как проводится измерение интересующего параметра. Длительность импульса напряжения определяется на уровне 50% от амплитуды.

Приведенная в табл. 1 форма импульсных помех по стандартам ГОСТ IEC 61000-4-4-2016 [1], ГОСТ IEC 61000-4-5-2017 [2] может быть описана биэкспоненциальным импульсом:

$$u(t) = E \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right).$$

Для получения длительности фронта 5 нс, длительности импульса 50 нс и единичной амплитуды импульса $U_m=1$ по ГОСТ IEC 61000-4-4-2016 следует положить $E=1,261$, $\tau_1=3,3 \cdot 10^{-9}$ с, $\tau_2=56 \cdot 10^{-9}$ с.

Для получения длительности фронта 1 мкс, длительности импульса 50 мкс и единичной амплитуды импульса $U_m=1$ по ГОСТ IEC 61000-4-5-2017 следует положить $E=1,04$, $\tau_1=0,5 \cdot 10^{-6}$ с, $\tau_2=68 \cdot 10^{-6}$ с.

ГОСТ IEC 61000-4-5-2017 предусматривает также испытание соединительных линий большой протяженности импульсами напряжения с длительностью фронта 6,5 мкс при длительности импульса 700 мкс. Для получения таких параметров при единичной амплитуде $U_m=1$ следует положить $E=1,022$, $\tau_1=3,15 \cdot 10^{-6}$ с, $\tau_2=983 \cdot 10^{-6}$ с.

Колебательные затухающие помехи по ГОСТ IEC 61000-4-18-2016 [3] описываются выражением:

$$u(t) = E \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \cdot \cos(\omega t).$$

Для получения длительности фронта 75 нс и колебаний с частотой 100 кГц при амплитуде $U_m=1$ следует положить $E=1,018$, $\tau_1=37 \cdot 10^{-9}$ с, $\tau_2=40 \cdot 10^{-6}$ с, $\omega=2\pi \cdot 100000$.

СХЕМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Для оценки воздействия импульсных помех, в моделирующих SPICE программах, необходимо иметь схемные модели испытательных генераторов.

В качестве модели генератора наносекундных импульсных помех по ГОСТ IEC 61000-4-4-2016 предлагается использовать схему, приведенную на рис. 1.

В схеме, набираемой в моделирующей SPICE программе, идеальный источник $V1$ постоянного напряжения величиной $E=1,11$ обеспечивает заряд накопительного конденсатора $C1=3,3$ нФ, который затем разряжается через ключ $X1$ на цепь $L1=55$ нГн, $R2=20$ Ом, формируя на выходе импульс напряжения u с требуемыми параметрами (рис. 2). Ключ управляется источником $V2$, который в момент $t=0$ подает на ключ ступеньку напряжения, изменяющую сопротивление ключа от бесконечности почти до нуля. Резистор $R3=50$ Ом обеспечивает заданное выходное сопротивление генератора. Резистор $R4$ является нагрузкой. В режиме близком к холостому ходу при $R4=10$ кОм амплитуда выходного напряжения равна $U_m=1$. При подключении нагрузки $R4=50$ Ом амплитуда должна уменьшиться в 2 раза. Погрешность значения амплитуды при моделировании не превышает 2,4% при допустимой величине до 10%. Стандартная длительность фронта обеспечивается на нагрузке 50 Ом и на холостом ходу генератора с погрешностью менее 12% при допустимой погрешности 30%.

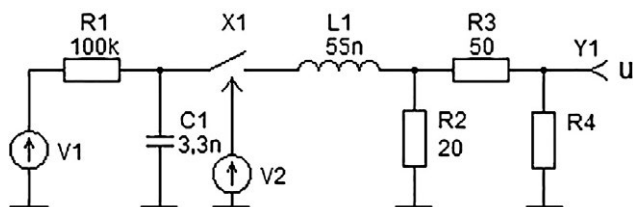


Рис. 1. Модель испытательного генератора по IEC 61000-4-4.
Fig. 1. Test generator model compliant with IEC 61000-4-4.

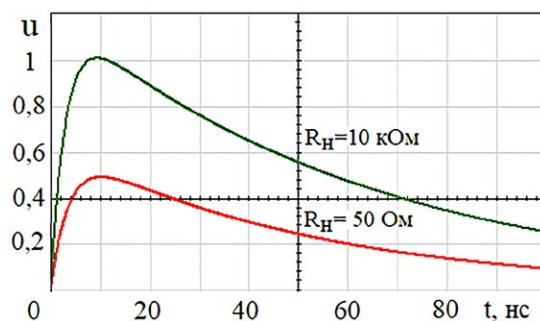


Рис. 2. Изменение напряжения u на выходе модели испытательного генератора по IEC 61000-4-4 при нагрузке $R_H=R4$ с сопротивлением 50 Ом и 10 кОм.

Fig. 2. Change in voltage u at the output of the IEC 61000-4-4 test generator model (load: $R_H = R4$; resistance: 50 Ohm and 10 kOhm).

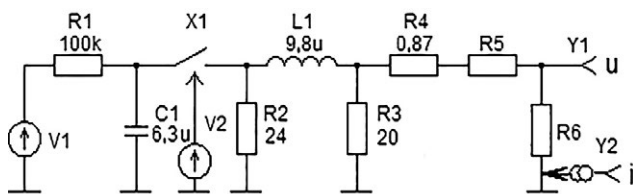


Рис. 3. Модель испытательного генератора по IEC 61000-4-5 для длительности 50 мкс.

Fig. 3. IEC 61000-4-5 test generator model for 50 μs width.

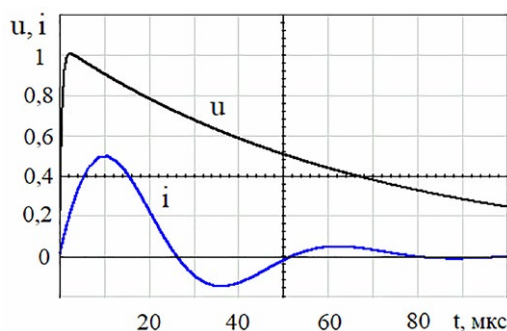


Рис. 4. Изменение напряжения u на выходе модели испытательного генератора 50 мкс по IEC 61000-4-5 на холостом ходу и тока i при коротком замыкании выхода.

Fig. 4. Change in voltage u at the output of the 50 μs test generator model (IEC 61000-4-5) at idle and current i during output short circuit.

Длительность импульса также соответствует требованиям стандарта при нагрузке от 50 Ом до 10 кОм с погрешностью менее 8%. Для моделирования генератора, создающего заданную амплитуду помехи, необходимо пропорционально изменить напряжение источника V1. Например, для создания помехи с амплитудой 4000 В на холостом ходу необходимо установить $E=1,11 \cdot 4000=4440$ В.

Генератор микросекундных импульсных помех длительностью 50 мкс по ГОСТ IEC 61000-4-5-2017 моделируется схемой, представленной на рис. 3.

Источник V1 постоянного напряжения величиной $E=1,03$ обеспечивает заряд накопительного конденсатора $C1=6,3$ мкФ, который по сигналу управления от источника V2 разряжается через ключ X1 на цепь $R2=24$ Ом, $L1=9,8$ мкГн, $R3=20$ Ом, формируя на выходе импульс напряжения амплитудой $U_m=1$ (рис. 4). Указанные элементы и резистор $R4=0,87$ Ом обеспечивают требуемое выходное сопротивление генератора 2 Ом при условии $R5=0$. Схема обеспечивает стандартные параметры напряжения холостого хода и тока короткого замыкания генератора. Дополнительный резистор $R5=10$ Ом

используется при подаче помех несимметрично в цепи питания и полагается равным $R5=40$ Ом при вводе помех в линии связи. Резистор R6 изображает нагрузку генератора. Погрешность значения амплитуды напряжения холостого хода и тока короткого замыкания при моделировании не превышает 1%. Длительность фронта и длительность создаваемого импульса соответствует требованиям стандарта с погрешностью менее 5% при допустимой погрешности соответственно 30% и 20%.

Генератор микросекундных импульсных помех длительностью 700 мкс по ГОСТ IEC 61000-4-5-2017 моделируется схемой на рис. 5.

Источник V1 постоянного напряжения величиной $E=1,02$ обеспечивает заряд накопительного конденсатора $C1=20$ мкФ, который по сигналу управления от источника V2 разряжается через ключ X1 на цепь $R2=50$ Ом, $R3=15$ Ом, $C2=0,22$ мкФ, формируя на выходе импульс напряжения амплитудой $U_m=1$ (рис. 6). Указанные элементы и резистор $R4=25$ Ом обеспечивают требуемое выходное сопротивление генератора 40 Ом. Схема обеспечивает стандартные параметры

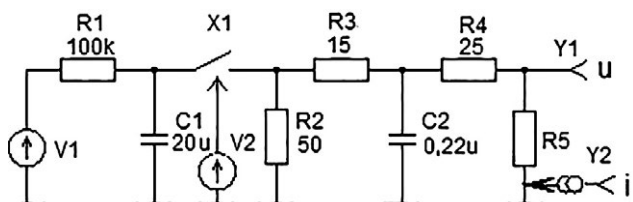


Рис. 5. Модель испытательного генератора по IEC 61000-4-5 для длительности 700 мкс.

Fig. 5. IEC 61000-4-5 test generator model for 700 μs width.

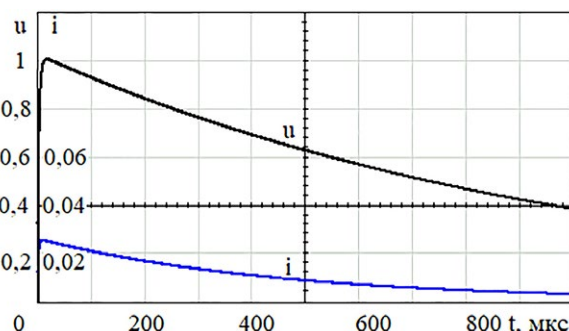


Рис. 6. Изменение напряжения u на выходе модели генератора импульсов 700 мкс по IEC 61000-4-5 на холостом ходу и тока i при коротком замыкании выхода.

Fig. 6. Change in voltage u at the output of the 700 μs generator model (IEC 61000-4-5) at idle and current i during output short circuit.

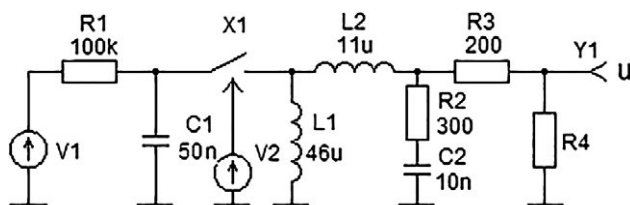


Рис. 7. Модель испытательного генератора по IEC 61000-4-18 для частоты 100 кГц.

Fig. 7. IEC 61000-4-18 test generator model for the frequency of 100 kHz.

напряжения холостого хода и тока короткого замыкания генератора. Резистор R5 изображает нагрузку генератора. Погрешность значения амплитуды напряжения холостого хода и тока короткого замыкания при моделировании не превышает 1%. Длительность фронта и длительность создаваемого импульса соответствует требованиям стандарта с погрешностью менее 4% при допустимой погрешности соответственно 30% и 20%.

Генератор колебательных затухающих помех с частотой колебаний 100 кГц по ГОСТ IEC 61000-4-18-2016 моделируется схемой на рис. 7.

Заряд и разряд накопительного конденсатора C1 до напряжения $E=1$ осуществляется аналогично рассмотренному выше. Частота колебаний в основном определяется параметрами элементов $C1=50$ нФ и $L1=46$ мкГн, а длительность фронта индуктивностью $L2=11$ мкГн и резистором $R2=300$ Ом. Резистор $R3=200$ Ом определяет требуемое выходное сопротивление генератора. Нагрузка изображается резистором R4. Погрешность значения амплитуды напряжения холостого хода, полученного моделированием по приведенной схеме, не превышает 1%. Длительность фронта и частота колебаний (рис. 8) соответствуют требованиям стандарта с погрешностью менее 4% при допустимой погрешности соответственно 20% и 10%. Для моделирования импульсных помех с амплитудой, отличной от 1 необходимо пропорционально изменить напряжение источника V1.

ВЫВОДЫ

Импульсные помехи наносекундной, микросекундной длительности способны вызвать сбои в работе различных технических средств. Правила Российского морского регистра судоходства и многочисленные стандарты по электромагнитной совместимости требуют обеспечить устойчивость оборудования к этим видам помех.

Предложенные математические описания импульсных помех и модели схем испытательных генераторов дают возможность моделировать воздействие помех

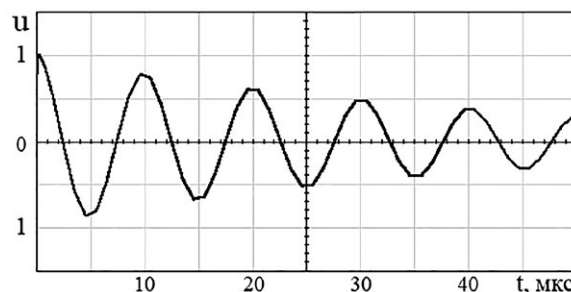


Рис. 8. Изменение напряжения u на выходе модели генератора колебаний 100 кГц по IEC 61000-4-18.

Fig. 8. Change in voltage u at the output of a 100 kHz oscillator model (IEC 61000-4-18).

на схемы электронного и электротехнического оборудования на стадии проектирования для предварительной оценки его соответствия требованиям по электромагнитной совместимости.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Представленная статья является коллективным трудом авторов и охватывает анализ нормативной документации, разработку математического описания стандартных импульсных помех, разработку схем, имитирующих помехи, проверку моделей, оценку погрешностей.

Источники финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

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

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали один внешний рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: All authors made substantial contributions to the conceptualization, investigation, and manuscript preparation, and reviewed and approved the final version prior to publication.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one external reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов, Часть XI «Электрическое оборудование», НД № 2-020101-174, Российский морской регистр судоходства, СПб, 2025.
2. ГОСТ Р МЭК 60945-2007. Морское навигационное оборудование и средства радиосвязи. Общие требования. Методы испытаний и требуемые результаты испытаний. Стандартинформ, М., 2009.
3. Агафонов А.М., Воршевский А.А., Воршевский П.А., Гришаков Е.С., Корнев А.С. Обеспечение электромагнитной совместимости систем интеллектуального управления при появлении помех в судовых кабельных трассах. Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 1-3 (47), с 115-120.

4. Воршевский А.А., Гальперин В.Е. Электромагнитная совместимость судовых технических средств. СПб.: СПбГМТУ, 2010. С. 317.
5. 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). М.: Стандартинформ, 2016.
6. ГОСТ IEC 61000-4-5-2017. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-5. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к выбросу напряжения. М.: Стандартинформ, 2017.
7. ГОСТ IEC 61000-4-18-2016. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-18. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к затухающей колебательной волне. М.: Стандартинформ, 2016.

REFERENCES

1. ND № 2-020101-174. Pravila klassifikacii i postrojki morskih sudov, Chast' XI «Elektricheskoe oborudovanie». Saint Petersburg: Rossijskij morskoy registr sudohodstva; 2025. (In Russ.)
2. GOST R IEC 60945-2007. Morskoe navigacionnoe oborudovanie i sredstva radiosvyazi. Obshchie trebovaniya. Metody ispytaniy i trebuemye rezul'taty ispytaniy. Moscow: Standartinform; 2009. (In Russ.)
3. Agafonov AM, Worshevsky AA, Vorshevskij PA, et al. Ensuring electromagnetic compatibility of intelligent control systems when interference occurs in ship cable routes. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2020;1-3(47):115–120. doi: 10.37220/MIT.2020.47.1.072 EDN: GXVXOJ

4. Worshevskij AA, Galperin VE. *Electromagnetic compatibility of ship technical equipment*. Saint Petersburg: SPbGMTU; 2010.
5. GOST IEC 61000-4-4-2016. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques. Electrical fast transient/burst immunity test. Moscow: Standartinform; 2016. (In Russ.)
6. GOST IEC 61000-4-5-2017. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques. Surge immunity test. Moscow: Standartinform; 2017. (In Russ.)
7. GOST IEC 61000-4-18-2016. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-18: Testing and measurement techniques. Damped oscillatory wave immunity test. Moscow: Standartinform; 2016. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

* Воршевский Александр Алексеевич,

д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;
адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, д. 3;
eLibrary SPIN: 6357-8486;
e-mail: elemcom@smtu.ru

Воршевский Петр Александрович,

канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;
eLibrary SPIN: 9819-0704;
e-mail: petekw@rambler.ru

AUTHORS' INFO

* Alexander A. Worshevsky,

Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships, Saint Petersburg State Marine Technical University;
address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, Russia, 190121;
eLibrary SPIN: 6357-8486;
e-mail: elemcom@smtu.ru

Petr A. Vorshevskii,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships, Saint Petersburg State Marine Technical University,
eLibrary SPIN: 9819-0704;
e-mail: petekw@rambler.ru

Киав Мьят Тху,

аспирант кафедры электротехники и электрооборудования
судов, Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет;
e-mail: kyawhsu314@gmail.com

Хейн Хтет Аунг,

аспирант кафедры электротехники и электрооборудования
судов, Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет;
e-mail: heinhjetaung5338@gmail.com

Kyaw Myat Thu,

graduate student of the Department of Electrical Engineering
and Electrical Equipment of Ships, Saint Petersburg State Marine
Technical University;
e-mail: kyawhsu314@gmail.com

Hein Htet Aung,

graduate student of the Department of Electrical Engineering
and Electrical Equipment of Ships, Saint Petersburg State Marine
Technical University;
e-mail: heinhjetaung5338@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author