


УДК 621.311.6+629.5.064.5
EDN: HUEZHD

Ю.А. Кулагин, М.Ю. Семенов, В.А. Хомяк, Г.Н. Цицикян 
Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ОПЫТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРИ АДАПТАЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ К УСЛОВИЯМ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Объект и цель научной работы. На конкретных примерах нарушений электромагнитной совместимости технических средств исследуются причины и следствия воздействия различных процессов, формирующих помехи, и способы защиты от них.

Материалы и методы. В работе использованы данные публикаций, а также техническая информация по опытно-конструкторским работам, выполненным ЦНИИ СЭТ, материалы и фото из личных архивов участников работ, имеющих многолетний опыт создания и внедрения новой техники для отечественного судостроения и других отраслей промышленности.

Основные результаты. С учетом актуальности задачи обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) оборудования информационно-измерительных систем микропроцессорного управления и силового электрооборудования электроэнергетических систем (ЭЭС) подтверждена необходимость использования современных технических средств, проведения компьютерного и физического моделирования импульсно-коммутационных процессов на этапах проектирования, пусконаладочных работ опытных образцов с включением соответствующих измерений в программы и методики швартовных и ходовых испытаний судов и кораблей.


Согласно «Положению о создании кораблей и судов», утвержденному коллегией Военно-промышленной комиссии Российской Федерации (ВПК РФ) в 2017 г., подтверждается необходимость проведения силами ЦНИИ СЭТ экспертизы проектов, выполняемых ПКБ отрасли, в части электрооборудования и ЭЭС в целом. Отсутствие такой экспертизы приводит к возникновению проблем по ЭМС, не выявленных при испытаниях и проявляющихся в эксплуатационный период.

Заключение. Компьютерное и физическое моделирование импульсно-коммутационных процессов позволит прогнозировать негативные воздействия на слаботочные электронные устройства и своевременно, до изготовления опытного и поставочного образцов, принять меры к устранению, а при их изготовлении и испытаниях – обеспечить аппаратный контроль ослабления помех до допустимого уровня. Выполнение экспертизы проектов электрооборудования и ЭЭС в целом независимой компетентной организацией позволит избежать ошибок и повысить качество судовой электротехники и электроники.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, главный распределительный щит, автоматический выключатель, источник электроэнергии, слаботочное оборудование, импульсная коммутационная помеха, перенапряжение, электромагнитная совместимость, помехоустойчивость, варисторы, ограничители перенапряжений, пусконаладочные работы, швартовные и ходовые испытания.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 621.311.6+629.5.064.5
EDN: HUEZHD

Yu.A. Kulagin, M.Yu. Semenov, V.A. Khomyak, G.N. Tsitsikyan 
SET Branch of the Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

EXPERIENCE WITH ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN ADAPTING ELECTRONIC INSTRUMENTATION TO SHIP ELECTRIC POWER SYSTEM

Для цитирования: Кулагин Ю.А., Семенов М.Ю., Хомяк В.А., Цицикян Г.Н. Опыт обеспечения электромагнитной совместимости при адаптации электронной аппаратуры к условиям судовой электроэнергетической системы. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 1(415): 115–126.

For citations: Kulagin Yu.A., Semenov M.Yu., Khomyak V.A., Tsitsikyan G.N. Experience with electromagnetic compatibility in adapting electronic instrumentation to ship electric power system. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 1(415): 115–126 (in Russian).

Object and purpose of research. Specific examples of defects in equipment EMC are taken to investigate the causes and effects of different processes giving rise to interferences and identify the ways of protection.

Materials and methods. The study is using published data as well as technical information about R&Ds of TsNII SET, data and photos from personal archives collected by researchers and engineers with a track record in introducing new technologies for the benefit of national shipbuilding and other industries.

Main results. In the context of EMC challenges met in implementation of modern computer-aided measuring systems, microprocessor control technologies and electric power generation systems it is confirmed that advanced equipment, computer simulation and physical modeling tools for pulse switching processes are required to be used at equipment design and adjustment phases with respective measurements to be included in the programs of harbor tests. In pursuance of the Ship Development Directive approved by the Military Industrial Commission of the Russian Federation in 2017, it is found necessary to carry out expert examination of design projects submitted by design companies as far as ship electric equipments and electric power systems are concerned by TsNII SET. The lack of these efforts leads to overlooking the EMC problems at the time of trials, which is felt during operational life.

Conclusion. Computer simulation and physical modeling of pulse switching processes enable prediction of negative effects on low current electronics and timely measures for improvement before manufacturing of test prototypes and deliverable specimens, i.e. attenuation of interferences to acceptable levels.

Expert examination of electric equipments and total electric power systems by the independent organization of competence will make it possible to avoid mistakes and raise the quality of ship electric and electronic hardware.

Keywords: electric power system, main distribution board, automatic switch, power source, low-current equipment, interference to pulse switching, overvoltage, electromagnetic compatibility, interference immunity, varistor, transient suppressor, adjustment and startup procedures, harbor trials, sea trials.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Электромагнитная совместимость технических средств – способность технических средств одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных электромагнитных помех и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам.

Разрабатываемое электронное или электротехническое судовое оборудование, которое потенциально может генерировать или воспринимать электромагнитные помехи, должно подвергаться испытаниям на ЭМС по параметрам, определенным техническими требованиями и условиями эксплуатации.

Основные термины, используемые в теории электромагнитной совместимости:

- Электромагнитная обстановка (ЭМО) – совокупность электромагнитных явлений, процессов в заданной области пространства, частотном и временном диапазонах.
- Электромагнитная помеха (ЭМП) – электромагнитные явления, ухудшающие качество функционирования технического средства (электрической сети, приборов и устройств потребителей).
- Кондуктивная помеха – электромагнитная помеха, которая передается по проводникам (провода, кабели, шины) в электрической цепи.

- Влияние помехи – снижение показателей качества функционирования технического средства при ее воздействии.
- Устойчивость к ЭМП, или помехоустойчивость – способность технического средства сохранять заданное качество функционирования при воздействии помех.
- Импульсная коммутационная помеха (ИКП) – перенапряжение или резкое изменение тока и магнитного потока, которые могут возникать в ходе эксплуатации электротехнического и радиоэлектронного оборудования.

ИКП могут существовать в виде одиночного импульса или повторяющейся последовательности импульсов, а также в виде гармонического или шумового непрерывного процесса. Основные источники возникновения ИКП:

- включение и отключение цепей с большой индуктивностью (электродвигатели, трансформаторы, дроссели, пускатели и др.);
- статические (особенно тиристорные) преобразователи параметров электроэнергии в рабочем режиме, электросварочная аппаратура и др.;
- аварийные короткие замыкания в сети и их последующее отключение защитными устройствами.

ИКП, наиболее часто представляемые в виде перенапряжений, могут привести к отказам аппаратуры, прежде всего из-за необратимого изменения структуры полупроводниковых материалов, вплоть до их частичного или полного разрушения.

Электростатический разряд (ЭСР, ESD) – перенос электростатического заряда между телами с различным электростатическим потенциалом; в случае негативного влияния на функционирование электрооборудования также может быть отнесен к категории импульсных помех. ЭСР вызывает внезапный поток зарядов между двумя электрически разнотипными заряженными объектами, когда они сближаются или когда между ними пробивается воздух. Иногда разряд сопровождается видимой искрой. В качестве объектов может выступать чувствительное электронное оборудование и касающийся его человек либо иное тело, имеющее противоположный заряд.

История получения компетенций в обеспечении электромагнитной совместимости проектируемого оборудования в ЦНИИ СЭТ

Background: EMC competence of TsNII SET for equipment under design

ЦНИИ СЭТ с момента его официального создания в 1965 г. для научного сопровождения электротехнического оборудования возрастающей сложности прошел стадию становления и уже в 1974 г. по инициативе основателя и первого директора А.А. Азовцева получил крупную разработку. Это была система централизованного контроля (СЦК) судовой электроэнергетической установки (СЭЭУ) плавкрана «Витязь» с рекордной на то время грузоподъемностью 1600 т.

Разработка осуществлялась по профилю ЦНИИ «Аврора», создававшего под заказ информационно-измерительные системы (ИИС) на базе технических решений с применением релейно-контактных и традиционных измерительных схем. Но в связи с возросшими и предполагаемыми новыми подходами техническими требованиями, выдвинутыми проектантом – ЦКБ «Коралл» (Севастополь), «Аврора» отказалась от разработки СЦК в заданные сроки. Работу передали в ЦНИИ СЭТ, в коллектив сектора к.т.н. Н.А. Лазаревского, и поручили ведущему инженеру А.Д. Мыско, имевшему опыт в разработке ИИС. Мыско стал руководителем группы молодых специалистов, сформированной для выполнения поставленной задачи.

Результатом рассмотрения технических требований был выбор концепции реализации СЦК на базе интегральных микросхем. Для каналов измерений и обработки информации применили микро-

схемы 140-й (аналоговой) и 155-й (дискретной) серий. В начале 1977 г., после макетирования и разработки рабочей конструкторской документации (РКД), что совпало по времени с началом внедрения в СССР системы ЕСКД, кардинально изменившейся требования к выполнению комплекта РКД, опытно-поставочный образец СЦК прибыл от изготовителя – завода «КРИЗО» (Гатчина) – в ЦНИИ СЭТ для выполнения пусконаладочных работ (ПНР).

СЦК имеет специфическую структуру, содержащую около 200 информационных каналов от аналоговых и дискретных датчиков электрических и неэлектрических контролируемых параметров систем, размещенных по всему объему кранового судна и соединенных с СЦК многожильными кабелями. В системном блоке СЦК происходят измерение и обработка электрических сигналов датчиков, нормализация и пороговый контроль величин с представлением измеренных, обобщенных и индивидуальных параметров по каждой системе СЭЭУ на панелях пульта СЦК.

Большая часть информационных каналов обрабатывалась по алгоритму аварийно-предупредительной сигнализации (АПС) с памятью выхода каждого параметра из зоны нормированных значений. Это, кроме прочего, являлось основной проблемой, относящейся к области электромагнитной совместимости, а также к помехоустойчивости устройства, которое подвергалось воздействию помех, генерируемых как вне, так и внутри СЦК.

Специалистам ЦНИИ СЭТ удалось повысить помехоустойчивость до допустимого уровня в длительном циклическом процессе анализа причин сбоев и путем доработки изделия при выполнении ПНР, а также заводских приемо-сдаточных, швартовных и ходовых испытаний в составе СЭЭУ на п/к «Витязь».

Совокупность проблем и задач, решавшихся коллективом при создании первой в советском судостроении 200-канальной СЦК на базе интегральных микросхем требовала полной самоотдачи, рабочие дни нередко длились более 16 часов. Общая протяженность кабельных жил, подключенных к СЦК п/к «Витязь», составляла около 10 км. Геометрическое расположение этих цепей на судне имело дрововидную форму, а эквивалентная схема с распределенными параметрами R , L и C была сложной, с учетом их электрического и магнитного взаимодействия между собой и относительно корпуса судна. Цепи располагались в виде параллельных жил мно-



Рис. 1. Плавкран «Витязь» полной грузоподъемностью 1600 т

Fig. 1. Floating crane *Vityaz*, total lifting capacity 1600 t



Рис. 2. Создатели системы централизованного контроля электроэнергетической установки плавкрана «Витязь»

Fig. 2. Designers of the central control system for the electric power plant of floating crane *Vityaz*

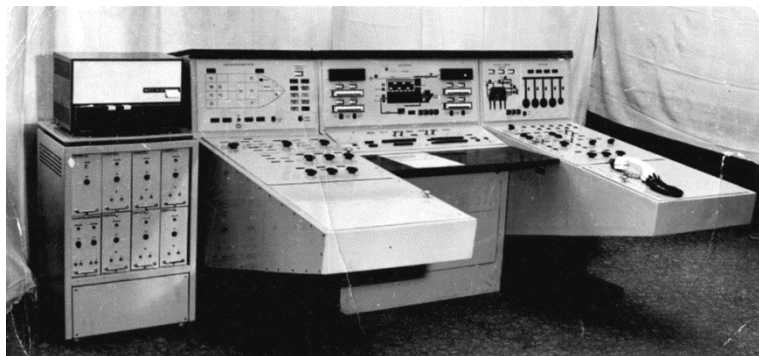


Рис. 3. Пульт с встроенным блоком обработки информации и блок питания системы централизованного контроля электроэнергетической установки плавкрана «Витязь»

Fig. 3. Control panel with in-built data processing unit & power supply unit, part of the central control system for the electric power plant of floating crane *Vityaz*

гожильных экранированных кабелей, что увеличивало их индуктивно-емкостные связи.

Плавкран (рис. 1) был испытан на заводе-строителе «Севморзавод» в Севастополе, сдан в эксплуатацию в декабре 1977 г. и отправлен в порт приписки в Ленинград. На базе группы специалистов, участвовавших в создании СЦК СЭЭУ п/к «Витязь», был сформирован сектор во главе с А.Д. Мыско. Специалисты выполнили ряд проектов СЦК для плавкранов, буровых погружных платформ типа «Шельф», выпустили отраслевые стандарты ОСТ 5.6189-83 и ОСТ В 5.6204-87 серийно производившихся щитов для проектирования систем АПС судов и кораблей.

На рис. 2 представлены создатели СЦК ЭЭУ. Верхний ряд справа налево: ответственный исполнитель разработки, испытаний и сдачи СЦК плавкрана «Витязь» А.Д. Мыско, участники – Л.С. Торопнина, Н.Б. Вишнякова, В.И. Килепо, Ю.А. Кулагин, Л.В. Козырева и М.В. Егоров. Нижний ряд справа налево: В.И. Зимацкий, В.А. Голубев, Н.Ш. Либерман, И.Г. Иванова, Ю.Д. Сверчков.

На рис. 3 представлены пульт с встроенным блоком обработки информации и блок питания СЦК ЭЭУ. К пульту непосредственно подключались жилы кабелей, передающих сигналы от датчиков ЭЭУ п/к «Витязь».

Таким образом, инициативой А.А. Азовцева и самоотверженным трудом коллектива единомышленников была создана и долгие годы реализовывалась компетенция ЦНИИ СЭТ в области проектирования СЦК и АПС. В итоге наработан и используется подтвержденный практикой опыт обеспечения ЭМС разрабатываемой слаботочной электронной аппаратуры с силовым оборудованием СЭЭУ и борьбы с помехами в процессе выполнения задачи создания изделий под заказ. При реализации современных систем с использованием микропроцессорной техники задачи обеспечения ЭМС остаются не менее актуальными.

Анализ негативных воздействий от судовых электроэнергетических систем на электронную аппаратуру

Analysis of negative effects from ship electric power systems of electronic instrumentation

В настоящее время благодаря научным трудам советских и российских ученых теоретические вопросы по ЭМС глубоко проработаны [1–5], в отличие от начала 1970-х гг., когда стартовало внедрение низковольтной и слаботочной электронной аппаратуры и микросхемотехники в составе оборудования СЭЭС и во всей полноте встала задача электромагнитной совместимости. Однако и сегодня в инженерной практике имеют место ошибки при разработке конкретных технических решений судового оборудования, выявляемые в т.ч. на объектах, находящихся в эксплуатации, и приводящие к сбоям, а иногда к отказам, аварийным состояниям оборудования и объекта применения в целом.

На рис. 4 представлены в обобщенной форме виды помех, влияющих на электромагнитную совместимость приемника, который может быть неким слаботочным электронным устройством.

Например, устройство, в составе которого могут быть микросхемы различного назначения: усилители, элементы R , L , C , генераторы, пороговые схемы (компараторы), счетчики и запоминающие устройства с дальнейшей дискретной обработкой в элементах микропроцессорной техники и выводом сигналов управления электроприводом (объектом) на панель представления информации (дисплей) о состоянии и результатах измерения. При этом приемник может иметь проводниковые связи (цепи) по входу с аналоговыми и/или дискретными датчиками, располагаемыми в объеме судна, цепи питания от распределительных щитов (РЩ), в т.ч. от главного РЩ (ГРЩ), и выходные цепи управления объектом.

Общая протяженность внешних цепей может достигать значительной величины, в т.ч. при совместной прокладке слаботочных сигнальных цепей с цепями, передающими коммутируемые токи с крутыми фронтами и спадами значительной величины. Скорость изменения магнитного потока индуцирует ИКП в соседней, например низковольтной, гальванически не связанной цепи (рис. 4), через емкостную, а также индуктивную паразитную связь. Электромагнитные волны, проникающие внутрь приемника, могут вызывать коле-

бательные процессы в LC -контурах с сосредоточенными и распределенными параметрами, вызывать отдельные сбои в работе слаботочной аппаратуры и оказывать влияние на качество функционирования.

Основными источниками ИКП являются цепи с коммутационной аппаратурой СЭЭС, автоматические выключатели и контакторы, располагающиеся в ГРЩ и РЩ, и коммутирующие токи потребителей в диапазоне от единиц до тысяч ампер. При этом потребители электроэнергетики размещены в основном вдали от ГРЩ и РЩ, имеют протяженные кабельные связи с распределенной индуктивностью значительной величины. Энергия магнитного поля ($W_{ц}$) и ЭДС самоиндукции индуктивности ($E_{си}$) нагрузки и распределенной индуктивности определяются формулами:

$$W_{ц} = L_{ц} I_{п}^2 / 2,$$

$$E_{си} = -L_{ц} dI_{п} / dt,$$

где $L_{ц}$ – распределенная индуктивность цепи, $I_{п}$ – ток потребителя перед коммутацией, $dI_{п}/dt$ – скорость изменения тока коммутации.

При размыкании коммутирующего устройства энергия индуктивности, пропорциональная $I_{п}^2$, выделяется в элементах цепи разряда при всплеске напряжения обратной полярности на противоположных выводах $L_{ц}$, т.е. на зажимах коммутационного аппарата, находящегося в процессе размыкания.

$L_{ц}$ отдает запасенную энергию, стремясь поддержать величину тока в цепи. Всплеск может достигать значений, во много раз превышающих номинальное напряжение источника питания. При этом время разряда зависит от величины накоплен-

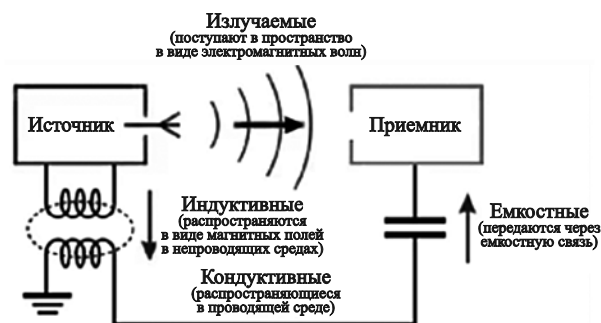


Рис. 4. Виды помех в обобщенной форме, влияющих на электромагнитную совместимость приемника

Fig. 4. Types of interferences to EMC of the receiver

ной индуктивной энергии $W_{ц}$ и постоянной времени цепи разряда, определяемой по формуле:

$$\tau = L_{ц} / R,$$

где $L_{ц}$ – распределенная индуктивность цепи, R – активное сопротивление цепи разряда, в т.ч. образовавшейся в результате действия перенапряжения.

На рис. 5 представлен фрагмент схемы СЭЭС, иллюстрирующий принцип формирования ИКП при разряде распределенных индуктивностей цепей и индуктивности нагрузки.

На рассматриваемом фрагменте СЭЭС двигатель Дв 1 и генератор Ген 1 находятся в рабочем состоянии, обеспечивают питание нагрузок ГРЩ и РЩ через включенные автоматические выключатели (АВ), обозначенные цифрами 1, 3...9, а АВ 2 – отключен.

Генераторы через АВ, ГРЩ и РЩ соединены кабельными переключками различной длины, которые имеют различную распределенную индук-

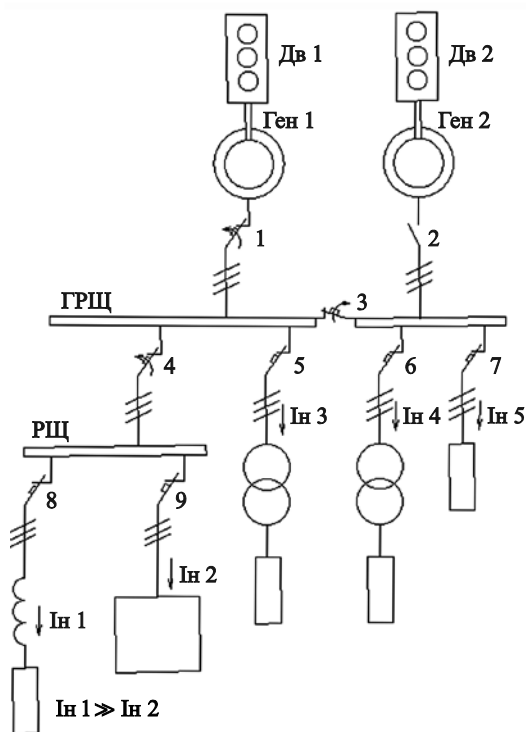


Рис. 5. Фрагмент схемы судовой электроэнергетической системы, иллюстрирующий принцип формирования импульсной коммутационной помехи при разряде распределенных индуктивностей цепей и индуктивности нагрузки

Fig. 5. Part of ship's electric power system schematic illustrating how pulse switching interferences are formed at discharge of distributed circuit inductances and load inductance

тивность, определяемую различной погонной индуктивностью жил, величиной порядка около 1 мкГн/м.

К РЩ, получающему электроэнергию от Ген 1 через АВ 1, ГРЩ и АВ 4, с помощью АВ 8 подключена активно-индуктивная нагрузка, а с помощью АВ 9 – слаботочная нагрузка с током, потребляемым из РЩ, значительно меньшей величины, чем ток, потребляемый активно-индуктивной нагрузкой через АВ 8. При отключении АВ 4 от РЩ в начале разряда индуктивности активно-индуктивной нагрузки возникает дуговой разряд, поглощающий часть энергии. При этом образуется второй контур разряда через включенные цепи фаз слаботочной нагрузки, которые будут подвергаться воздействию тока индуктивности.

Количество энергии, выделившейся в слаботочной нагрузке $W_{сн}$, зависит от величины перенапряжения, времени прохождения тока I через активное сопротивление слаботочной нагрузки. Рассчитать количество энергии $W_{сн}$ можно, измерив в функции времени осциллографом значения величин фазных токов I и напряжений U , по формуле:

$$W_{сн} = \int_0^t UI dt.$$

Некоторые цифровые осциллографы, например Лесгоу, имеют встроенные математические функции обработки сигналов, в т.ч. интегрирования.

Еще более сложная ситуация может произойти в рабочих режимах оборудования с включенными АВ 3–9 при отключении АВ 1, когда индуктивности нагрузок и распределенные индуктивности жил кабелей отдадут накопленную энергию подключенным потребителям СЭЭС.

Следует отметить, что время срабатывания типовых контактных систем АВ достигает 40 мс, а быстродействующих – до 10 мс. В аварийных ситуациях при отключении АВ могут возникать перенапряжения, вызывающие скачкообразные перераспределения тока в отключаемых РЩ, и подключенные к ним потребители подвергаются воздействию индуктивной реакции более мощных потребителей этого РЩ. При этом длительность фронта нарастания тока в слаботочной цепи может достигать величины порядка нескольких микросекунд, а ее защитный АВ останется в проводящем состоянии до 10–40 мс или вообще не сработает. Такое воздействие на слаботочный потребитель может вызвать мгновенный или отложенный выход его из строя без ясной причины.

Многолетняя практика показывает, что значительное количество подобных аварийных ситуаций возникает из-за человеческого фактора, который проявляется, несмотря на прописанные инструкции, и приводит порой к тяжелым последствиям.

В качестве примера приведем случай, произошедший при опытной эксплуатации п/к «Нептун 1 (Neptuno 1)» грузоподъемностью 150 т, построенного и переданного Республике Куба в 1991 г. Поначалу, находясь под наблюдением группы гарантийных специалистов, кран нормально выполнял разгрузочные операции, но группа была внезапно отозвана в офис. На следующий день выявился отказ тиристорного электропривода подъема стрелы. Гарантийный специалист выявил выход из строя 11 печатных плат в системе управления электропривода.

Расследованием было установлено, что в нарушение руководства по эксплуатации крановщик по окончании работ, оставив во включенном состоянии тиристорный преобразователь частоты (ПЧ), подал команду электрикам в ГРЩ на отключение верхнего строения крана. В схему верхнего строения входило фильтрокомпенсирующее устройство, а в нем имелся включенный последовательно с конденсаторной батареей трехфазный дроссель, индуктивная реакция которого привела к аварии. Впоследствии печатные платы были восстановлены, а работа плавкрана представлена лично министру транспорта Кубы.

Такой уровень проверки был обусловлен предыдущей аварией, при которой тот же крановщик, управляя автоматизированным электроприводом стрелы как автоматическим, используя микровыключатели предельных положений для остановки стрелы, допустил соприкосновение с упором и аварийную деформацию. Это было доказано, и Куба восстанавливала стрелу за свой счет. А по второму случаю уже стоял вопрос о возврате плавкрана на «Севморзавод» в Севастополь; стоимость обратного перегона в один конец оценивалась в сумму около 900 тыс. долл. США.

Следующий пример. На терминале насосно-перекачивающей станции Харьяга в Ненецком АО Республики Коми в 2003 г. тиристорный пускатель во время пуска нефтеперекачивающего насоса мощностью 630 кВт автоматическим выключателем главного распределительного устройства (ГРУ) был отключен. Это привело к пробое шести тиристоров с номинальным параметром рабочего напряжения 6,3 кВ по причине индуктивной реакции обмоток электродвигателя насоса, а также соединительного

кабеля между ГРУ и помещением с тиристорными пускателями, длина которого была более 300 м. Причина усугублялась еще тем, что в качестве АВ в ГРУ использовался вакуумный выключатель, в котором при расхождении контактов практически отсутствует дуга, что вызывает перенапряжения значительно большего уровня, чем у АВ с контактной группой в воздушной среде, как описано в [1].

Еще один случай произошел при выполнении ремонтных работ на системе электродвижения малого гидрографического судна «Вайгач» на Невском судостроительно-судоремонтном заводе (Шлиссельбург) в 2015 г. После ремонта преобразователя частоты привода гребного электродвигателя при подаче питания возникло короткое замыкание (КЗ) в ПЧ, при котором сработали АВ на ГРЩ и произошел останов дизель-генераторного агрегата (ДГА). Причина была очевидна: ток КЗ спровоцировал сбой работы системы управления (СУ) ДГА. Однако ранее на судне были два случая отключения СУ ДГА, не связанные с КЗ, которые приводили к столкновениям с другими судами в маневровых режимах, к счастью, с небольшими последствиями. Сопоставив события, проверили работу тиристорного ПЧ электропривода подруливающего устройства (ПУ), построенного на фазоуправляемых тиристорах, и выявили превышение уровня допустимых Правилами Российского морского регистра судоходства (РМРС) величин нелинейных искажений в токе электропривода ПУ и в напряжении сети. Была предложена и реализована взамен ПЧ схема пуска электродвигателя ПУ «звезда – треугольник», искажения тока устранены, а уставки АВ на ГРЩ откорректированы.

И последний пример. При испытаниях опытного образца входного преобразователя для тягового двигателя мощностью 435 кВт электроприводов высокоскоростного электропоезда «Сокол» на стенде ЦНИИ СЭТ выявилось отклонение от расчетной уставки величины тока срабатывания устройства защиты. Причина оказалась в воздействии магнитного поля катушки дросселя под током в силовой цепи на компаратор защиты. Перенос устройства защиты из зоны действия магнитного поля решил проблему. Здесь воздействие помех осуществилось внутри конструкции самого изделия, что не исключает негативных последствий на качество его функционирования и комплекса оборудования в целом.

Способность технического средства сохранять заданные качества функционирования при воздействии помех должна проверяться начиная с процесса разработки, при испытаниях и опытной эксплуатации.

Как указано в [1], «в судовой сети с номинальным напряжением 380 В частота следования импульсных помех с амплитудой, превышающей 1000 В, составляет единицы в год и связана с аварийными процессами, а частота появления импульсов с амплитудой более 2000 В близка к нулю». Процесс размыкания контактов в воздушной среде в цепях с индуктивностью, описанный в [1], показывает некоторое ограничение перенапряжения за счет конструктивной емкости контактной системы и повторяющихся дуговых разрядов в процессе размыкания, что снижает энергию скачка напряжения при прекращении разрядов.

Правила РМРС регламентируют устойчивость судового электрооборудования к помехам, устанавливая обязательные испытания нано- и микросекундными импульсными помехами. Кроме коммутационного оборудования с механическими контактными группами, генерировать помехи может широко внедряемая в судостроение силовая преобразовательная техника, вплоть до мощных систем электропривода (СЭД), которые потребляют основную часть генерируемой электроэнергии в виде токов величиной в тысячи ампер. Современные преобразователи [6] построены на базе электронных коммутаторов – силовых транзисторов и тиристоров, теперь часто – полностью управляемых (вместо фазоуправляемых) с длительностями фронтов коммутации, находящимися в наносекундном диапазоне.

К достижениям преобразовательной техники относят низкий уровень генерируемых в сеть им-

пульсных и гармонических составляющих, соответствующих требованиям Правил РМРС, подтвержденных на испытаниях, что достигается техническими решениями схем активных выпрямителей и инверторов преобразователей СЭД. Однако теоретически, из-за наличия распределенной емкостной составляющей внешних связей, возможны проявления пиковых значений токов, которые могут формировать негативные воздействия на слаботочные цепи, находящиеся в опасной близости с силовыми цепями преобразователей.

Предотвращению описанных выше случаев посвящено утвержденное коллегией ВПК РФ в 2017 г. «Положение о создании кораблей и судов», являющееся обязательным для выполнения всеми органами власти и предприятиями, участвующими в госзаказе. Этим документом установлен базовый государственный научный центр судостроительной отрасли – ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (далее – Крыловский центр). Крыловский центр должен выполнять экспертизу и приемку результатов НИР, аванпроектов, эскизных и технических проектов кораблей. Также предприятие обязано участвовать в создании научно-технического задела в выполнении фундаментальных, поисковых и прикладных НИР, проводить концептуальные и обликосые исследования. Результаты НИР и экспериментальных работ должны быть основой ТТЗ на проектирование.

Предполагается, что Крыловский центр выполняет комплексную экспертизу проектов новых кораблей и их оборудования по контрактам с КБ-проектантом, однако контракты на упомянутые работы практически не заключаются. Отсутствие такой экспертизы приводит к возникновению описанных выше проблем, не выявленных при испытаниях и проявляющихся в эксплуатационный период.

Технико-конструкторские решения по защите электронных устройств от помех

Design solution for protection of electronic devices from interferences

При разработке технических решений изделий комплекта СЦК п/к «Витязь» был создан испытатель помехоустойчивости ИПУ-1, представленный на рис. 6. Устройство являлось источником постоянного стабилизированного напряжения с наложенной переменной составляющей от внешнего источника – импульсного генератора сигнала помехи.



Рис. 6. Устройство «Испытатель помехоустойчивости ИПУ-1»

Fig. 6. Noise immunity tester IPU-1

ИПУ-1 на время испытаний заменял источник питания испытываемого устройства и воспроизводил сигнал внешнего источника помехи в диапазоне от 20 Гц до 5 МГц синусоидальной или импульсной формы, что позволило доработать и повысить помехоустойчивость изделий комплекта и СЦК в целом.

В декабре 1981 г. на предприятии «ЭРА» во Владивостоке с помощью ИПУ-1 были проведены испытания помехоустойчивости изделия «Контроль 24» для головного корабля проекта «Акула» и подтверждена устойчивость изделия к воздействию помех по цепи питания.

Современные ЭЭС кораблей и судов обладают высокой степенью автоматизации за счет применения микроэлектроники и микропроцессорной техники в различных системах контроля, обработки, управления, передачи, хранения и отображения информации. Такие системы от нижнего локального до верхнего центрального уровня по основным каналам связаны по интерфейсу и передают информацию в цифровом виде. Однако гальванические связи электронных систем с внешним оборудованием ЭЭС до сих пор имеют место и данные системы могут подвергаться воздействию помех.

На рис. 7 представлены внешние связи электронного устройства (ЭУ) – приемника, по которым можно получить негативное воздействие помех. В составе ЭУ имеется многоканальный вторичный источник питания (ВИП) постоянного тока, обеспечивающий электроэнергией внешние датчики и внутренние потребители блока обработки и представления информации (БОИ). Элементы z представляют полные внутренние сопротивления (импедансы) каналов ЭУ, которые с полными сопротивлениями жил своих кабелей и внешнего источника образуют делители напряжения. Известно, что чем ниже z в ЭУ, тем меньше уровень наведенной высокочастотной помехи через паразитные электромагнитные связи между разделенными жилами и кабелями.

Процесс создания ЭУ для оборудования судовых и корабельных ЭЭС неразрывно связан с решением задачи обеспечения электромагнитной совместимости.

Рассмотрим технические решения, разработанные и использованные для защиты от помех на конкретных примерах. ЭУ, как правило, имеет вторичный источник питания с трансформатором гальванической развязки на входе, подключаемый пер-

вичной обмоткой к РЩ с помощью электро монтажного провода или жил силового кабеля. Как описано выше, при коммутационных процессах в ЭЭУ возникают кратковременные перенапряжения ИКП, по результатам исследований [1], достигающие величины порядка 1000 В. Они через паразитные связи и непосредственно в каналах источника питания формируют помехи, способные вызвать сбои в работе ЭУ и, что наиболее значимо, зафиксироваться в его памяти.

С этой проблемой впервые столкнулись на ПНР и предварительных испытаниях опытно-поставочного образца СЦК п/к «Витязь». В результате были переработаны схема ВИП и практически схемы всех модулей каналов АПС БОИ. Пример построения структурной схемы ВИП низковольтных каналов, реализованной в СЦК и щитах сигнализации представлен на рис. 8.

Защита цепей питания ЭУ от ИКП, получаемых из энергоустановки судна, осуществлялся с использованием распределенных индуктивностей жил и проходных конденсаторов $C1$, $C2$, а также трансформатора с П-образным сердечником, первичной и вторичной обмотками на отдельных стержнях, не передающих высокочастотные составляющие по магнитопроводу. Дополнительно над первичной обмоткой

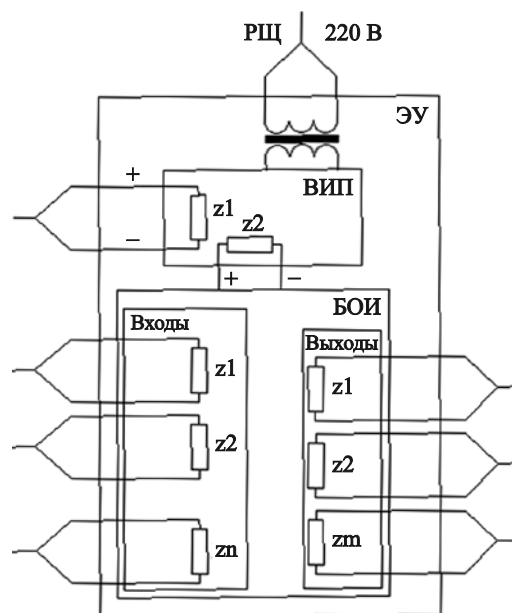


Рис. 7. Внешние связи электронного устройства, по которым можно получить негативное воздействие наводок и помех

Fig. 7. External links of electronic device to receive potential cross-talk and interferences

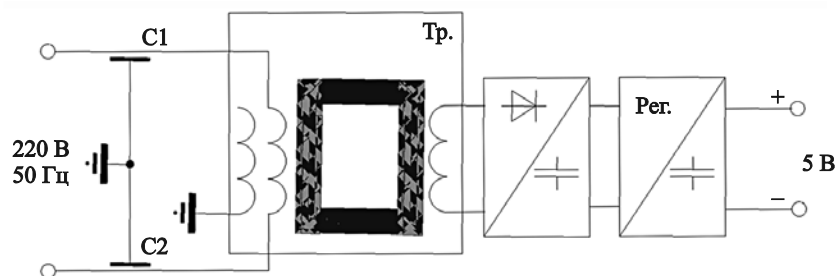


Рис. 8. Пример построения структурной схемы вторичного источника питания низковольтных каналов

Fig. 8. Example of block diagram for the secondary power supply of low-voltage channels

намотана экранная обмотка, вывод которой соединен с корпусом ЭУ. Напряжение вторичной обмотки выпрямлялось, фильтровалось конденсаторным накопителем и стабилизировалось полупроводниковым регулятором. На выходе ВИП и на печатных платах были установлены конденсаторные фильтры, окончательно блокирующие распространение помех по цепям питания.

Исходный вариант схемы модулей сигнальных каналов АПС имел недостаточную помехоустойчивость по входам из-за отсутствия фиксации состояния первичного элемента памяти в каждом канале (триггера, построенного на микросхеме 155-й серии, питаемого напряжением величиной 5 В) в режиме ожидания сигнала, срабатывавшего от помех. Было найдено техническое решение в виде устройства задержки [7], испытанное наложением сформированных сигналов помех различной формы, спектра и пульсаций на питающее напряжение, принятое и успешно использованное во всех последующих проектах (рис. 9).

Устройство задержки работает следующим образом. В режиме ожидания дискретного сигнала датчика на выходе инвертора 1 – нулевой потенциал, конденсатор 3 – заряжен и поддерживает запертое состояние транзистора 4 положительным потенциалом на затворе относительно истока. Триггер 6

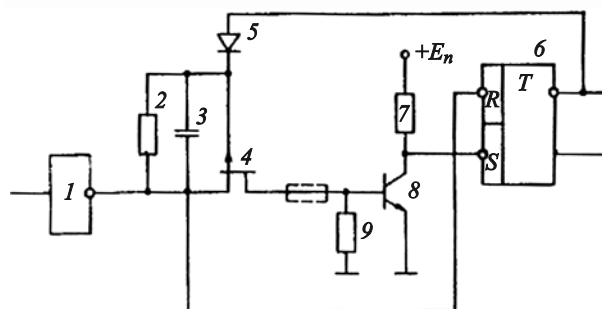


Рис. 9. Устройство задержки

Fig. 9. Delay device

имеет на прямом выходе «0», а на инверсном – «1». Положительный потенциал инверсного выхода через диод 5 поддерживает в заряженном состоянии конденсатор 3. Транзистор 8 заперт, и положительный потенциал его коллектора, подаваемый на S-вход, и нулевой потенциал, подаваемый на R-вход с инвертора 1 на триггер 6, фиксируют триггер в этом состоянии. При подаче сигнала (нулевого потенциала) на вход устройства на выходе инвертора 1 появляется положительный потенциал – «1», диод 5 запирается, конденсатор 3 начинает разряжаться на резистор 2, после чего транзистор 8 включается, устанавливая «0» на S-входе триггера 6, а на его R-входе от инвертора 1 – уже «1». Триггер 6 переключается и фиксируется в этом состоянии по входам. При снятии входного сигнала на выходе инвертора 1 появляется «0», запирается транзистор 8, триггер 6 переключается, конденсатор 3 заряжается, запирает транзистор 4, и устройство переходит в исходное состояние.

Кроме каналов АПС в СЦК п/к «Витязь», устройство задержки было реализовано в СЦК ППБУ «Шельф», в системах АПС серийных щитов сигнализации по ОСТ 5.6189-83 и ОСТ В 5.6204-87 в составе сигнального модуля, который изготавливался на заводе «Маяк» (Севастополь) в количестве до 10 000 шт. в год.

Устройство задержки устанавливалось на входе каждого канала, передавало сигнал на обработку по стандартному алгоритму АПС модулей и в элемент памяти канала, где фиксировался до квитирования (сброса) оператором пульта управления. Для повышения помехоустойчивости элемент памяти канала был выполнен на базе тиристорного оптрона, который срабатывал от сигнала повышенной мощности, а сброс осуществлялся контактом реле или кнопки пульта управления [8].

Для защиты от ИКП в слаботочной электронной аппаратуре в настоящее время и в обозримой перспективе будут применяться фильтры, в т.ч. выпускаемые как отдельные серийные изделия, ограничители

перенапряжений (ОПН) на стабилитронах и варисторах. Внутренний монтаж электронной аппаратуры должен выполняться с разнесением жгутов с проводниками слаботочных сигналов от проводников, являющихся потенциальными источниками помех, использованием т.н. витых пар, экранированных кабелей. При обработке сигналов применяются как схемотехнические, так и алгоритмические программируемые блоки задержки (в т.ч. спящий режим, когда до прихода сигнала БОИ отключен).

В схемах распределительных устройств, ГРЩ и РЩ используются рассчитанные на поглощение больших энергий серийные ОПН, например, российской фирмы «Таврида Электрик», а применение вакуумных выключателей в судовых РУ не рекомендовано. Кроме того, при установке слаботочной электронной аппаратуры в объект применения внешние кабели приема/передачи сигналов должны быть защищены экранами от электромагнитного воздействия силовых кабелей, потоков рассеяния электрических машин, трансформаторов и дросселей.

С 1970-х гг. используется оптоволоконная приемопередача дискретных сигналов. Сейчас – в беспилотных летательных аппаратах уже на десятки километров без помех, однако передатчики и приемники пока электронные. В мощной преобразовательной технике сигналы системы управления на драйверы силовых элементов инверторов передаются оптоволоконным кабелем.

Современное программное обеспечение (Micro-Cap, Matlab и др.) позволяет моделировать процессы коммутации оборудования в энергосистемах для прогнозирования возможности ограничения ИКП токов с подбором ОПН по возможности поглощения энергии индуктивной реакции оборудования ЭЭС.

Выводы

Conclusion

1. Гальванические и магнитные связи электронных систем с внешним оборудованием ЭЭС, в т.ч. современные системы с использованием микропроцессорной техники, могут подвергаться воздействию помех, а значит, задачи обеспечения электромагнитной совместимости остаются актуальными.
2. Подтверждена необходимость, с использованием современных технических средств, проводить компьютерное и физическое моделирование импульсно-коммутационных процессов на этапах проектирования, ПНР опытных образцов с включением соответствующих измерений

в программы и методики приемо-сдаточных, швартовых и ходовых испытаний судового электрооборудования.

3. Подтверждается необходимость проведения силами ЦНИИ СЭТ экспертизы в части электрооборудования и ЭЭС в целом, а также проектов, выполняемых КБ отрасли (согласно «Положению о создании кораблей и судов», утвержденному коллегией ВПК РФ в 2017 г.). Отсутствие такой экспертизы приводит к возникновению проблем по ЭМС, не выявляемых при испытаниях и проявляющихся в эксплуатационный период.

Список использованной литературы

1. *Воршевский А.А., Гальперин В.Е.* Электромагнитная совместимость судовых технических средств : учебное пособие. Санкт-Петербург : СПбГМТУ, 2006. 316 с.
2. Возникновение и распространение импульсных помех в судовых электроэнергетических системах : учебное пособие / *Д.В. Вилесов, А.А. Воршевский, В.Е. Гальперин, С.А. Сухоруков.* Ленинград : Ленингр. кораблестроит. ин-т, 1987. 89, [1] с.
3. Обеспечение электромагнитной совместимости в судовых электроэнергетических системах : учебное пособие / *Д.В. Вилесов, А.А. Воршевский, В.Е. Гальперин, С.А. Сухоруков.* Ленинград : Ленингр. кораблестроит. ин-т, 1988. 64 с.
4. Измерения и испытания в области электромагнитной совместимости в судовых электроэнергетических системах : учебное пособие / *Д.В. Вилесов, А.А. Воршевский, В.Е. Гальперин, С.А. Сухоруков.* Ленинград : Ленингр. кораблестроит. ин-т, 1989. 65 с.
5. *Цицикян Г.Н.* Качество электроэнергии и смежные вопросы. Санкт-Петербург : Элмор, 2011. 172, [2] с.
6. *Уильямс Б.* Силовая электроника: приборы, применение, управление : справочное пособие / Перевод с англ. *В.В. Попова.* Москва : Энергоатомиздат, 1993. 239 с.
7. Устройство задержки : А.с. 748837 СССР / *Кулагин Ю.А.* № 2629038; заявл. 24.05.1978; опубл. 15.07.1980, Бюл. № 26. 3 с.
8. Устройство для многоточечной сигнализации : А.с. 888160 СССР / *Ю.А. Кулагин, А.Д. Мыско и Ю.Д. Сверчков.* № 2900413; заявл. 28.03.1980; опубл. 07.12.1981, Бюл. № 45. 6 с.

References

1. *Vorshevskiy A.A., Galperin V.E.* Electromagnetic compatibility of ship equipment : Teaching aid. St. Petersburg : MTU, 2006. 316 p. (*in Russian*).

2. Generation and propagation of pulse interferences in ship electric power systems : Teaching aid / *D.V. Vilesov, A.A. Vorshevskiy, V.E. Galperin, S.A. Sukhorukov*. Leningrad : Leningrad Shipbuilding University, 1987. 89, [1] p. (*in Russian*).
3. Electromagnetic compatibility in ship electric power systems : Teaching aid / *D.V. Vilesov, A.A. Vorshevskiy, V.E. Galperin, S.A. Sukhorukov*. Leningrad : Leningrad Shipbuilding University, 1988. 64 p. (*in Russian*).
4. Measurements and tests in electromagnetic compatibility of ship electric power systems / *D.V. Vilesov, A.A. Vorshevskiy, V.E. Galperin, S.A. Sukhorukov*. Leningrad : Leningrad Shipbuilding University, 1989. 65 p. (*in Russian*).
5. *Tsitsikyan G.N.* Quality of electric power and related issues. St. Petersburg : Elmor, 2011. 172, [2] p. (*in Russian*).
6. *Williams B.* Principles and elements of power electronics: devices, drivers, application / Russian translation by *V.V. Popov*. Moscow : Energoatomizdat, 1993. 239 p.
7. Delay device : Inventors Certificate 748837 USSR / *Yu.A. Kulagin*. No. 2629038; appl. date 24.05.1978; publ. date 15.07.1980. Bul. No. 26. 3 p. (*in Russian*).
8. Multipoint signaling device : Inventors Certificate 888160 USSR / *Yu.A. Kulagin, A.D. Mysko, Yu.D. Sverchkov*. No. 2900413, appl. date 28.03.1980; publ. date 07.12.1981. Bul. No. 45. 6 p. (*in Russian*).

Сведения об авторах

Кулагин Юрий Александрович, ведущий инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6.

Семенов Михаил Юрьевич, ведущий инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6.

Хомяк Валентин Алексеевич, начальник отдела филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Тел.: +7 (812) 369-03-75.

Цицикян Георгий Николаевич, д.т.н., профессор, начальник сектора – заместитель начальника отдела филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Тел.: +7 (812) 748-52-39. E-mail: George.20021940@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8813-6003>.

About the authors

Yury A. Kulagin, Lead Engineer, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128.

Mikhail Yu. Semenov, Lead Engineer, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128.

Valentin A. Khomyak, Head of Department, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 369-03-75.

Georgy N. Tsitsikyan, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Sector – Deputy Head of Department, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-39. E-mail: George.20021940@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8813-6003>.

Поступила / Received: 01.10.25
Принята в печать / Accepted: 25.02.26
© Коллектив авторов, 2026