

Электромагнитная совместимость комплексной установки воздействия на боевых пловцов с близкорасположенной радиоэлектронной аппаратурой

ЩЕРБАКОВ Г.Н., РУСИН П.В., АНЦЕЛЕВИЧ М.А., САХНОВ Е.Н., ПРОЦЕНКО О.П.

Статья посвящена проблеме влияния импульсного электромагнитного поля, распространяющегося от установки электрогидроудара (ЭГУ), на работающую вблизи нее радиоэлектронную аппаратуру. Проблема электромагнитной совместимости крайне важна для всех видов вооруженных сил, но особенно для кораблей ВМФ, поскольку на крайне ограниченном пространстве размещается множество радиоэлектронных средств и систем различного назначения. Исследована картина распределения импульсного электромагнитного поля в ближней зоне излучения противодиверсионной установки электрогидроудара, функционирование которой сопряжено с генерацией мощных электромагнитных импульсов. Проведена системная классификация областей применения ЭГУ, рассмотрены принципы работы конкретной принятой на вооружение установки ЭГУ. Это позволило выявить элемент, являющийся основным источником электромагнитного излучения. Получены теоретические зависимости распределения амплитуд магнитного и электрического полей в зависимости от удаления от источника излучения. Для проверки теоретических расчетов был проведен эксперимент по определению наводимой ЭДС в антеннах от импульсного ЭМП рассматриваемой установки ЭГУ. Графики распределения амплитуд напряженности импульсного магнитного и электрического полей свидетельствуют о практическом совпадении теоретических и экспериментальных данных.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, импульсное электромагнитное поле, ближняя зона излучения, пояс Роговского, подводные пловцы «СКАТ», система защиты

История широкого применения электрогидроудара начинается с 1950 г. «При создании внутри объема жидкости специально сформированного импульсного высоковольтного электрического разряда в зоне последнего развиваются сверхвысокие давления, которые можно широко использовать в практических целях», — так впервые был сформулирован предложенный Л.А. Юткиным новый способ трансформации электрической энергии в механическую, названный автором электрогидравлическим эффектом [1]. Электрогидравлический эффект и по сей день является источником множества прогрессивных технологических процессов, которые широко применяются во всем мире (рис. 1).

Применение электрогидроудара используется и в средствах защиты от подводных нарушителей.

В современном мире угроза террористической опасности заставляет принимать все более действенные меры по предупреждению и противоборству террористическим вызовам. Одним из важных направлений является защита акваторий и находящихся в них объектов от проникновения нарушителей. Особую опасность представляют специально подготовленные диверсионно-террористические группы боевых пловцов, которые способны скрыт-

но приблизиться к объекту и совершить террористический акт. В России актуальность данной темы обуславливается также решением задач по охране моста через Керченский пролив и особо важных объектов, находящихся в береговой зоне республики Крым.

Для борьбы с подводными нарушителями в России разработана и принята в эксплуатацию система защиты от подводных пловцов «СКАТ». Принцип её работы заключается в генерации поражающих импульсов избыточного давления в водной среде посредством высоковольтных разрядов [2, 3].

При эксплуатации установки был установлен факт образования мощного электромагнитного импульса, распространяющегося вокруг установки. В условиях, когда нет возможности разнести радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) на безопасное расстояние, а непрерывное и безотказное её применение необходимо, встает проблема электромагнитной совместимости установки ЭГУ и РЭА.

Необходимо отметить, что в известной литературе по исследованию эффекта ЭГУ вопрос формирования радиопомех не рассматривался, и прежде всего это касалось области электромагнитной совместимости с близкорасположенной радиоэлек-

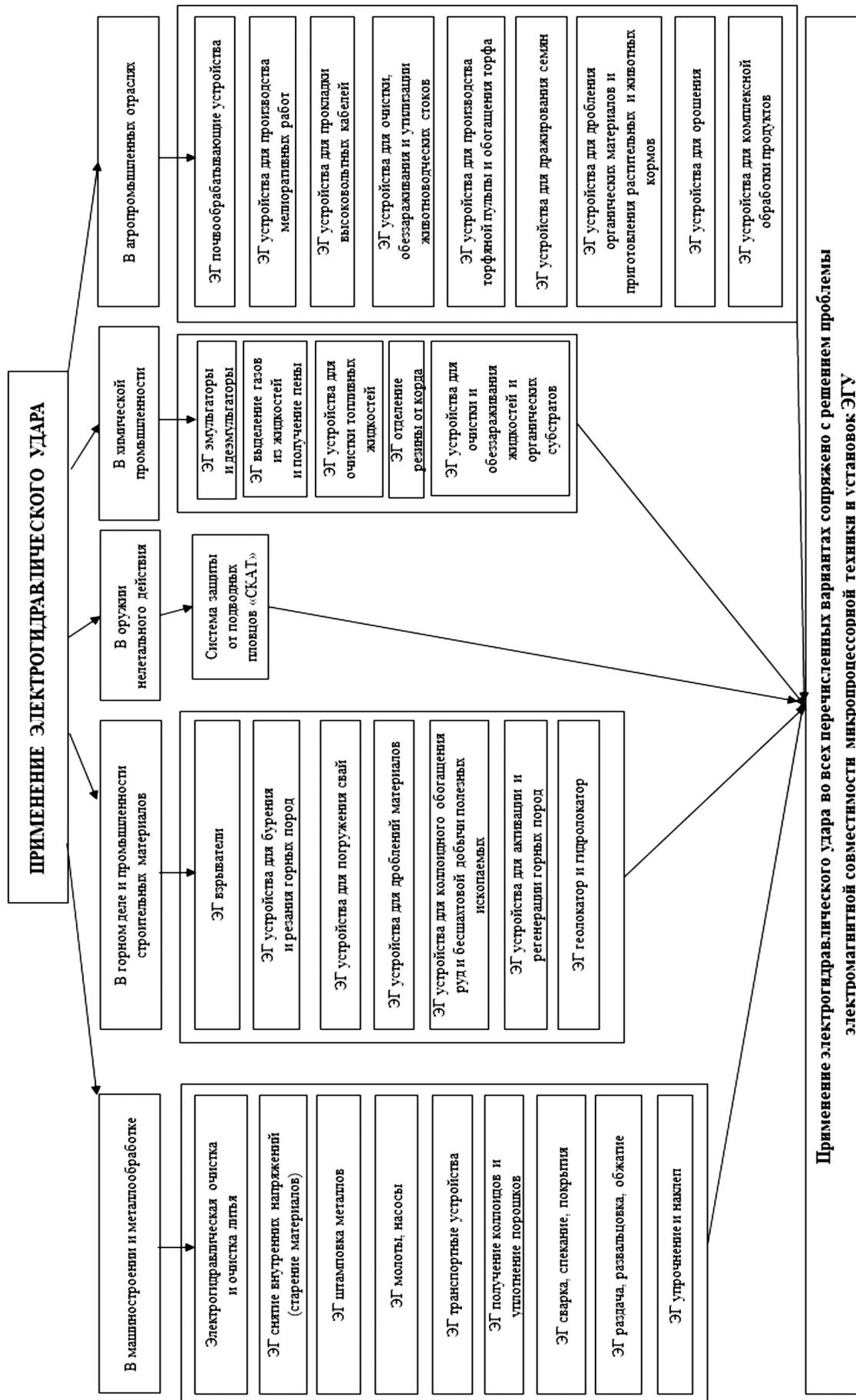


Рис. 1. Область применения электрогидравлического удара

тронной аппаратурой (гидролокаторами, средствами обнаружения подводных нарушителей, аппаратурой GPS/ГЛОНАСС, радиостанциями, электронно-оптическими приборами наблюдения, бортовыми компьютерами).

С помощью эксперимента и анализа структурной и электрической схем разрядной цепи системы защиты от подводных пловцов «СКАТ» был выявлен элемент, являющийся основным источником электромагнитного излучения (рис. 2 и 3). Им оказалась двухпроводная линия, соединяющая надвод-

ную часть установки и подводный выносной модуль длиной 2,5 м (модифицированный кабель марки РК 50-17-17) и обладающая эквивалентными значениями индуктивности и сопротивления (рис. 4).

Определим форму тока в разрядной цепи установки. Для этого рассмотрим разрядную цепь системы защиты от подводных пловцов «СКАТ». Она представляет собой последовательный колебательный RLC-контур (рис. 3). Процесс протекания тока

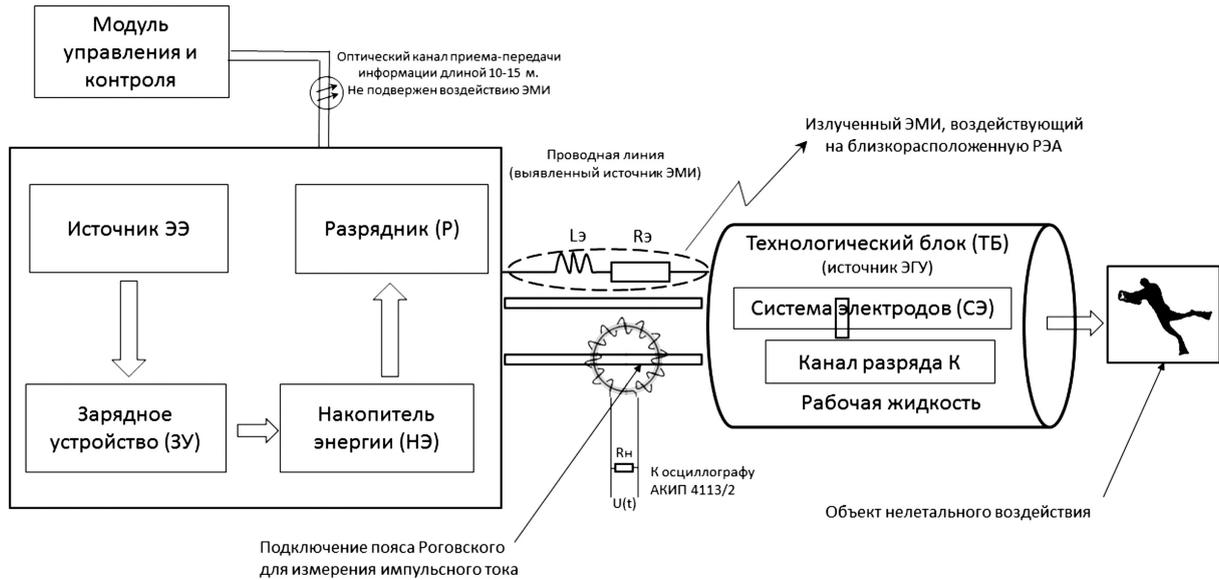


Рис. 2. Структурная схема системы защиты от подводных пловцов «СКАТ»

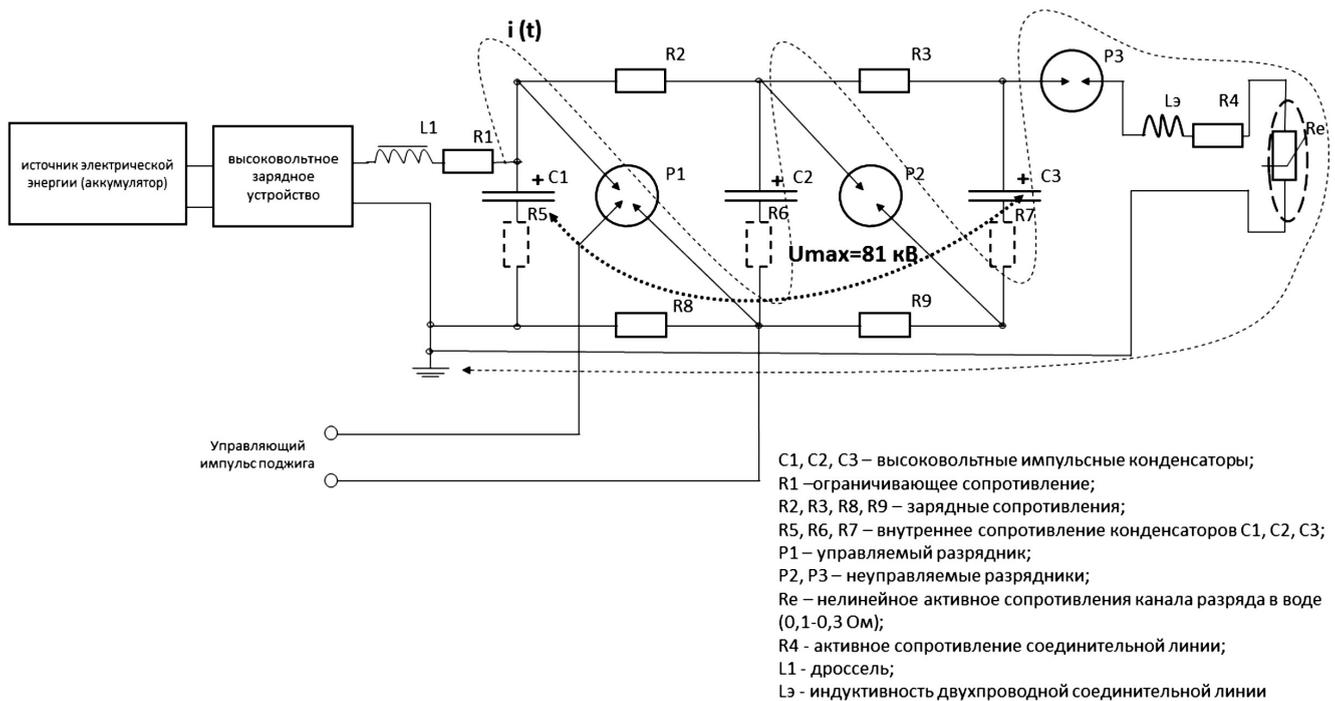


Рис. 3. Упрощенная электрическая схема разрядной цепи системы защиты от подводных пловцов «СКАТ» с указанием направления протекания разрядного тока



Рис. 4. Система защиты от подводных пловцов «СКАТ» с указанием выявленного источника электромагнитного импульса

в разрядном контуре описывается известным дифференциальным уравнением:

$$L_{\text{э}} \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{d}{dt}(iR_e) + \frac{1}{C}i = 0, \quad (1)$$

где R_e – эквивалентное сопротивление канала пробоя в воде; $L_{\text{э}}$ – эквивалентная индуктивность проводной линии; C – общая емкость конденсаторов (0,67 мкФ).

Максимальное напряжение в разрядном контуре составляет 81 кВ.

Индуктивность прямоугольной рамки $L_{\text{э}}$ (Гн) рассчитана по формуле [4]:

$$L_{\text{э}} = \frac{\mu}{\pi} \left\{ a \ln \frac{2ab}{r(a + \sqrt{a^2 + b^2})} + b \ln \frac{2ab}{r(b + \sqrt{a^2 + b^2})} - 2(a + b - \sqrt{a^2 + b^2}) \right\} + \frac{\mu'}{4\pi}(a + b), \quad (2)$$

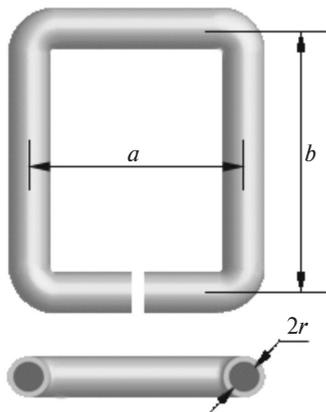


Рис. 5. К расчету индуктивности прямоугольной рамки

где μ – магнитная проницаемость среды; μ' – магнитная проницаемость материала проводника рамки; a , b , r – см. рис. 5.

При длине проводной линии системы защиты от подводных пловцов «СКАТ», равной 2,5 м, индуктивность $L_{\text{э}}$ равна 5,027 мкГн.

Эквивалентное сопротивление канала пробоя R_e (Ом) определялось с учетом интеграла действия тока по соотношению Ромпе-Вайцеля:

$$R_e(t) = \frac{Al_{\text{к}}}{\sqrt{\int_0^t i^2(t) dt}}, \quad (3)$$

где A – коэффициент пропорциональности между скоростью поступления частиц в канал разряда и скоростью передачи энергии, значение которого зависит от длины канала разряда $l_{\text{к}}$. Для системы защиты от подводных пловцов «СКАТ» $l_{\text{к}} = 0,08$ м, $A = 2,5 \cdot 10^4 \text{ В}^2 \text{ с/м}^2$ [5]. В случае системы защиты от подводных пловцов «СКАТ» изменение сопротивления $R_e(t)$ описывается графиком на рис. 6

Изменение сопротивления канала подчинено ряду закономерностей. В начальной стадии, длительность которой связана с параметрами L и C , а также с длиной разрядного промежутка, наблюдается резкий, почти линейный спад ($R_e = 0,5 \div 0,1$ Ом). В последующем изменение сопротивления не столь существенно и составляет $0,15 \div 0,05$ Ом за разрядный промежуток времени.

Форма кривой разрядного тока определяется соотношением, где $R_{\text{кр}} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ [6]. При $R_e < R_{\text{кр}}$ форма разрядного тока имеет колебательный характер, при $R_e = R_{\text{кр}}$ – предельный апериодический, а при $R_e > R_{\text{кр}}$ – апериодический.

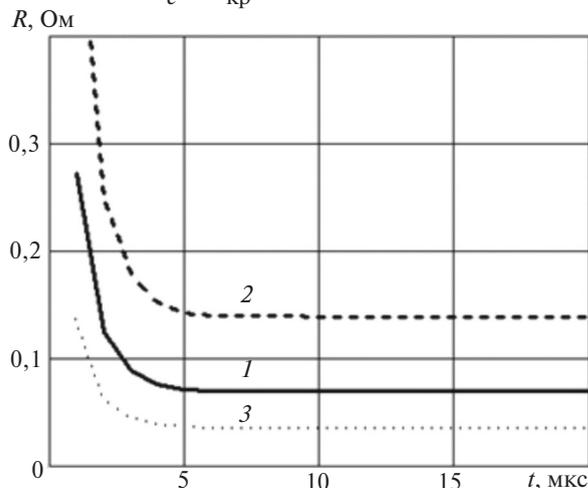


Рис. 6. Зависимость изменения сопротивления канала разряда $R_e(t)$ системы защиты от подводных пловцов «СКАТ» от времени ($U_0 = 81$ кВ; $C = 0,67$ мкФ; $L = 5,027$ мкГн): 1 – $R_1(t)$ при $l_{\text{к}} = 0,08$ м; 2 – $R_2(t)$ при $l_{\text{к}} = 0,16$ м; 3 – $R_3(t)$ при $l_{\text{к}} = 0,04$ м

Так как сопротивление канала разряда системы защиты от подводных пловцов «СКАТ» в воде составляет $R_e = 0,05 \div 0,3$ Ом (рис. 7), то форма тока носит колебательный характер со средней угловой частотой собственных колебаний контура $\omega_{cp} = 511392$ рад/с (при $R = 0,15$ Ом).

При $R = 0,15$ Ом изменение тока $I(t)$ описывается уравнением [6]:

$$I(t) = -I_m e^{-\alpha t} \sin(\omega_{cp} t + \pi) = I_m e^{-\alpha t} \sin(\omega_{cp} t). \quad (4)$$

После вычисления значений переменных уравнение (4) примет вид:

$$I(t) = 31508 e^{-14919,4t} \sin(511392t). \quad (5)$$

Подтверждение правильности расчета теоретической формы разрядного тока обусловлено практическими измерениями, полученными с помощью подключенного к разрядной линии установки пояса Роговского (рис. 8). Его применение обуславливалось необходимостью измерения коротких импульсов разрядного тока микросекундной длительности с амплитудой $16 \div 25$ кА.

Спектр сигнала по экспериментальным данным, полученным с помощью пояса Роговского, был построен с применением быстрого преобразования Фурье (БПФ) (функция $fft(y)$) по 4096 точкам в программе Mathcad 14,0. Определяем границы ближней зоны излучения:

$$r = \lambda_{cp} / 2\pi = 586,3 \text{ м}. \quad (6)$$

Таким образом, радиоэлектронная аппаратура, подвергающаяся воздействию электромагнитного импульса (ЭМИ), расположена в ближней зоне излучения, в которой поле квазистационарно. Источник ЭМИ является двухпроводной линией и представляет собой удлиненную рамочную антенну $2,5 \times 0,2$ м. Напряженность магнитного поля в декартовых координатах можно описать выражениями с учетом обозначений на рис. 9 [7]:

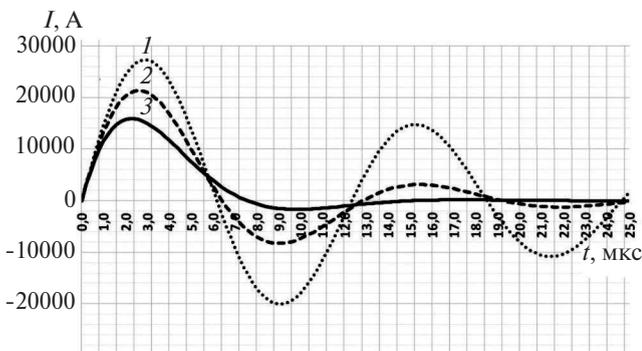


Рис. 7. Форма разрядного тока $I(t)$ при различных значениях $R(t)$ ($L = 5,027$ мкГн; $C = 0,67$ мкФ): 1 – $R = 0,5$ Ом; 2 – $R = 1,5$ Ом; 3 – $R = 3$ Ом

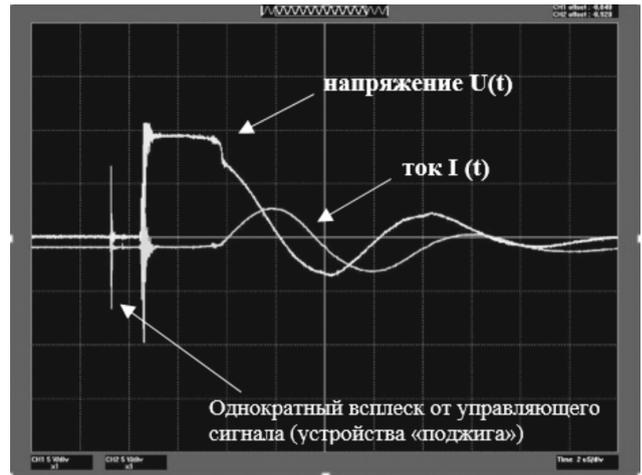


Рис. 8. Осциллограмма разрядного тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ на экране АКИП-4113/2, полученная с применением пояса Роговского

$$H_x = \frac{Iy}{2\pi} \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2} \right); \quad (7)$$

$$H_y = -\frac{I}{2\pi} \left(\frac{x+l/2}{r_2^2} - \frac{x-l/2}{r_1^2} \right), \quad (8)$$

где x, y – расстояния до точки измерения M по осям x и y .

Авторами была получена картина распределения суммарной напряженности H вблизи установки ЭГУ, которая показала, что напряженность магнитного поля H достигает значения 330 А/м на расстоянии 1 м от источника ЭМИ и постепенно спадает до 40 А/м на расстоянии 3 м. Напряженность электрического поля в ближней зоне излучения может быть оценена по формуле [7]:

$$E = \frac{I_m \mu_0 S \omega_{cp}}{4\pi r^2} \sin \vartheta \text{ [В/м]}, \quad (9)$$

где $I_m = 21$ кА; $S = 0,5$ м²; $\omega_{cp} = 511392$ рад/с; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $\sin \vartheta$ – синус угла между нормалью к плоскости излучающей рамки и направлением к точке измерения.

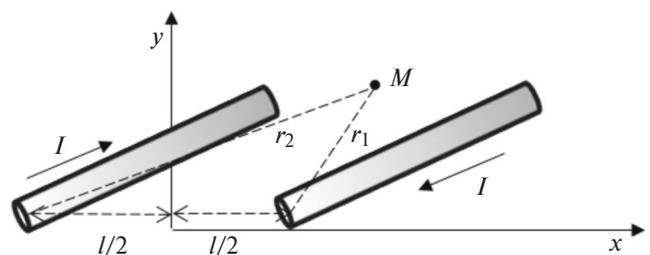


Рис. 9. Схематическое изображение двухпроводной линии (источника ЭМИ) для расчета напряженностей H_x, H_y (А/м) в точке измерения M

Картина распределения амплитуд электрического поля показала, что амплитуда напряженности E достигает максимального значения при совпадении точки измерения с плоскостью рамки ($\sin \vartheta = 1$) и составляет 14 В/м на расстоянии 3 м.

Для проверки теоретических расчетов был проведен эксперимент по определению наводимой ЭДС в антеннах (штыревой длиной 0,2 м и одновитковой рамочной радиусом 0,1 м) от импульсного электромагнитного поля (ЭМП) системы защиты от подводных пловцов «СКАТ». Измерения электрических и магнитных составляющих одиночного электромагнитного импульса в ближней зоне излучения проводились с помощью разработанного измерителя напряженности ЭМП (рис. 10, а и б). Ориентация измерителя в пространстве проводилась по принципу максимальной наводимой ЭДС.

Амплитуду напряженности импульсного магнитного поля в зависимости от наводимой ЭДС в рамке можно оценить по формуле:

$$H_{\text{имп}} = \frac{\varepsilon \Delta t}{\mu_0 S \cos \alpha} \text{ [А/м]}, \quad (10)$$

где ε – наводимая в рамке ЭДС, В; Δt – длительность фронта сигнала, равная 2 мкс; S – площадь принимаемой рамки; $\cos \alpha$ – косинус угла между направлением вектора $H_{\text{имп}}$ к нормали рамки; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

Амплитуда напряженности импульсного электрического поля в зависимости от наводимой ЭДС в антенне

$$E_{\text{имп}} = \frac{\varepsilon}{h_d} \text{ [В/м]}, \quad (11)$$

где ε – наводимая ЭДС на штыревой антенне, В; h_d – действующая высота антенны.

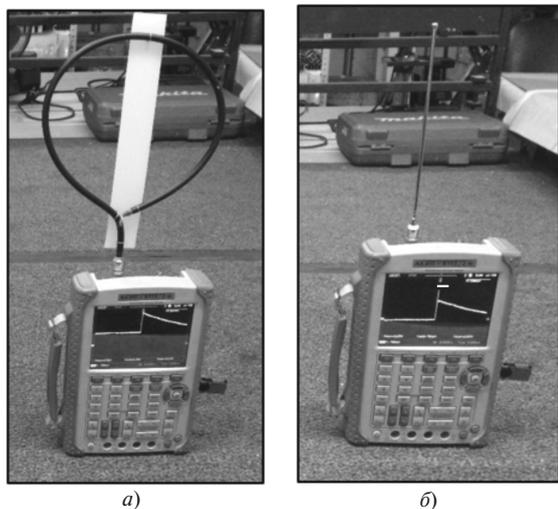


Рис. 10. Измерители магнитной (а) и электрической (б) составляющих одиночного электромагнитного импульса (для измерения в ближней зоне излучения)

Результаты измерения импульсного магнитного поля вблизи системы защиты от подводных пловцов «СКАТ» с использованием осциллографа АКИП-4113/2 в ждущем режиме (рис. 10) приведены на рис. 11.

График распределения напряженности магнитного поля по экспериментальным данным в основном подтверждает теоретические расчеты.

На рис. 12 отражены экспериментальные и теоретические результаты определения напряженности электрического поля E .

Также были проведены эксперименты по влиянию ЭМИ на цифровую аппаратуру (рис. 13). Необходимо отметить, что современная РЭА различного назначения в большинстве случаев включает цифровые компоненты, весьма восприимчивые к импульсным радиопомехам. Во время запуска высоковольтной установки наблюдался кратковременный сбой (обратимое нарушение работы) цифровой аппаратуры. У ее отдельных образцов (калькулятор, мультиметр) наблюдалось «обнуление» показаний при воздействии ЭМИ на расстоянии от 2 до 3 м.

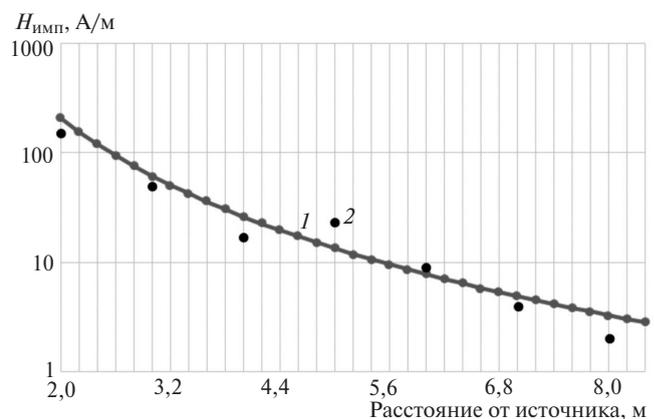


Рис. 11. Распределение амплитуд напряженности импульсного магнитного поля: 1 – теория; 2 – эксперимент

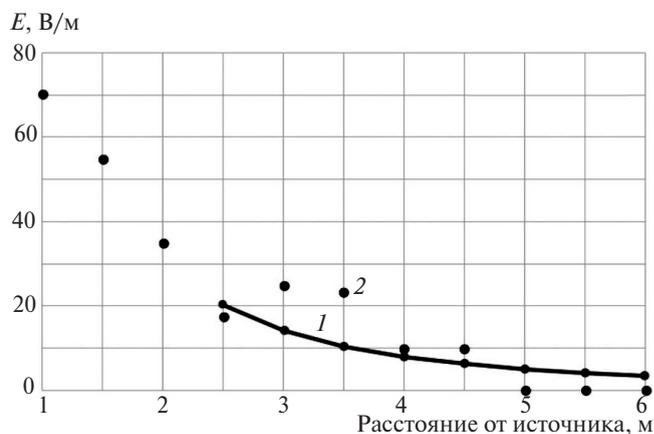


Рис. 12. Распределение амплитуд напряженности электрического поля E , В/м: 1 – теория; 2 – эксперимент



Рис. 13. Цифровая аппаратура, использованная в ходе экспериментов на электромагнитную совместимость: 1 — видеорегистратор Lexand LR-3700; 2 — фотоаппарат LumixDMC-F3; 3 — сотовый телефон PHILIPS XeniumE160; 4 — GPS-навигатор GPS-4358; 5 — индикатор СВЧ-полей Tenmars TM-185; 6 — калькулятор Citizen SDC-270L; 7 — цифровой мультиметр DT9208A

В современной РЭА наиболее подверженными помеховому влиянию ЭМИ являются цифровые микросхемы. Так, при воздействии импульсного магнитного поля 40 А/м [8—10] на эквивалент рамочной антенны со сторонами 0,1±0,2 м (типичные размеры цифровых плат РЭА) и длительностью фронта импульса 0,1±1 мкс значение наводимой ЭДС составляет примерно 2÷5 В. Это значение соответствует типовому напряжению источника питания цифровых микросхем. Причем известно [8, 10, 11], что нарушение функционирования большинства цифровых микросхем наведенным напряжением наступает при его значении, равном половине напряжения источника питания. В нашем случае оно составляет 1÷2,5 В.

Для определения составляющей электромагнитного поля, оказывающей наибольшее влияние на РЭА, рассчитаем объемную плотность энергии ЭМП по составляющим на расстоянии 3 м от источника ЭМИ:

плотность магнитной энергии

$$w^M = \frac{\mu_0 H^2}{2} = 24 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/м}^3; \quad (12)$$

плотность электрической энергии

$$w^Э = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} = 6,37 \cdot 10^{-12} \text{ Дж/м}^3. \quad (13)$$

Формулы (12) и (13) характеризуют распределение и локализацию энергии поля в пространстве [7]. Плотность энергии магнитного поля на несколько порядков превышает плотность электрической энергии. Это связано с тем, что источником ЭМИ является магнитная рамка. Поэтому опасное воздействие наступает за счёт магнитной составляющей.

Необходимо отметить опасность влияния электромагнитного импульса, возникающего от установки электрогидроудара, на работающую вблизи РЭА. Эксперименты на действующей

установке ЭГУ показали, что при разряде возникает импульсное низкочастотное электромагнитное поле вокруг установки на расстоянии до 3 м со значениями напряженностей H и E не менее 50 А/м и не менее 14 В/м соответственно. Такое значение напряженности магнитного поля опасно для близкорасположенной РЭА (рис. 14), так как наводит напряжение в схемах цифровой аппаратуры, достигающее значений, равных более половины напряжения питания, что вызывает сбои в работе аппаратуры.

Для патрулирования охраняемой зоны наряду с другими патрульными катерами используют катера проекта 21980, шифр «Грачонок», на которых установлены специальные разведывательные аппараты, позволяющие обнаруживать живую силу и подводные цели противника (рис. 15) [12]. Катера проекта 21980 оснащены весьма совершенным комплексом вооружения, современными радиоэлектронными и радиотехническими средствами, а также водолазным оборудованием, позволяющим обследовать дно и подводные объекты (рис. 16).

Штатный комплекс РЭА катера включает: навигационную радиолокационную станцию МР-231 «Пал»; многофункциональный оптико-электронный телевизионный комплекс освещения ближней воздушной и надводной обстановки МТК-201М3;

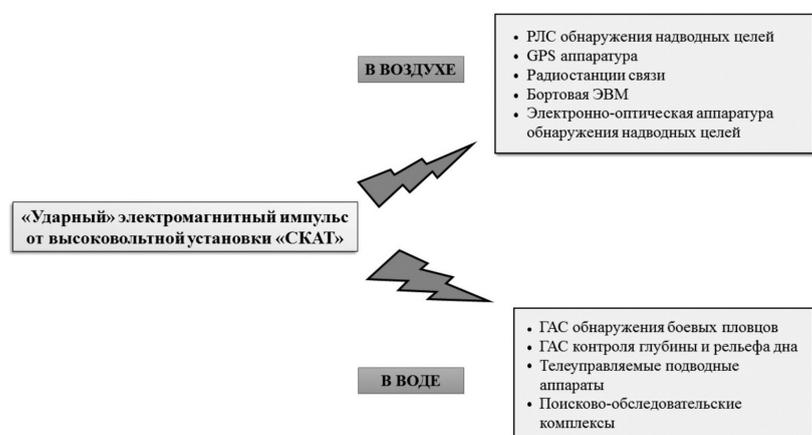


Рис. 14. Электронная аппаратура, находящаяся на катере и подвергающаяся воздействию ЭМИ системы «СКАТ»



Рис. 15. Противодиверсионный катер «Грачонок» (проект 21980)

автоматизированный комплекс связи АКС Р-779-9; интегрированную мостиковую систему ИМС «Мостик-21980»; гидроакустическую станцию обнаружения подводных диверсионных сил и средств МГ-757 «Анапа»; телеуправляемый подводный аппарат ТНПА «Фалкон» с рабочей глубиной до 300 м; поисковый комплекс «Кальмар».

На рис. 17 приведены границы безопасных зон напряженностей ЭМП от системы защиты от подводных пловцов «СКАТ», установленной на противодиверсионном катере. Стоит отметить, что система «СКАТ» должна быть максимально удалена от ходовой рубки, в которой расположена основная аппаратура связи и навигации.

Также необходимо выполнять общие рекомендации по обеспечению ЭМС, указанные в руководящих документах [14]:

- размещение приемной аппаратуры связи в специально экранированных помещениях;

- выполнение специальных требований по прокладке и экранированию антенно-фидерных трактов;

- размещение антенных устройств РЭС для обеспечения возможности снижения напряжений, на-



Рис. 16. Фото радиоэлектронной аппаратуры ходовой рубки патрульного катера [13]

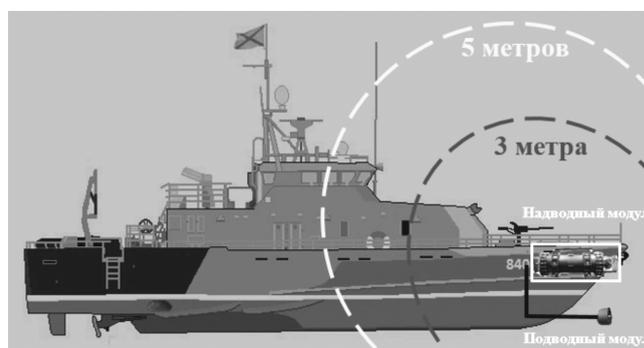


Рис. 17. Безопасные зоны напряженностей импульсного магнитного поля от системы защиты от подводных пловцов «СКАТ» на противодиверсионном катере: 3 м — опасная область ($H_{\text{имп}}$ достигает 100 А/м); 5 м — не рекомендуемая область ($H_{\text{имп}}$ достигает 30 А/м)

водимых в приёмных антеннах РЭС при работе излучающих средств судна;

- экранирование отдельных электрических сетей с соблюдением непрерывности экранирования.

Дальнейшее направление исследований—проведение экспериментов с реальными средствами поиска, навигации и связи катера, что позволит дать более точные рекомендации по электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры катера с системой защиты от подводных нарушителей «СКАТ».

Следует в заключение напомнить о существовании ряда программных комплексов, отечественных и зарубежных, для комплексной оценки электромагнитной совместимости корабельных средств. В частности, комплекс средств имитации сигналов и помех, разработанный в ЦНИИ «Курс», позволяющий исходя из состава и характеристик радиоэлектронных средств в ходе оценки электромагнитной обстановки формировать варианты применения этого оборудования с учетом различных режимов функционирования приемников и передатчиков, а также их антенно-фидерных трактов [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986, 254 с.
2. Щербаков Г.Н., Юдин С.С. Средства обнаружения и воздействия на боевых пловцов. История и современность. — Боеприпасы и высококонденсированные системы, 2017, № 2, с. 68—78.
3. Щербаков Г.Н., Сахнов Е.Н. О проблеме электромагнитной совместимости при создании комплексного средства для обнаружения и воздействия на боевых пловцов.— Стратегическая стабильность, 2018, № 2 (83), с. 33—38.
4. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. М.: Связьиздат, 1951, 339 с.
5. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев: Наукова думка, 1979, 208 с.
6. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Негушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1975, 752 с.
7. Никольский В.В. Теория электромагнитного поля. М.: Высшая школа, 1961, 372 с.
8. Сахаров К.Ю., Янковский Б.Д., Едлин М.Ю. Влияние сверхкоротких электромагнитных импульсов на исполнение информационной функции цифровых устройств с энергонезависимой памятью. — Технологии электромагнитной совместимости, 2009, № 3, с. 47—55.
9. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь, 1988, 296 с.
10. Ряполов А.В. Совершенствование методов оценки помехоустойчивости радиоэлектронных средств к воздействию импульсных электромагнитных полей: дисс.... канд. техн. наук. Омский государственный университет путей сообщения, 2014, 173 с.
11. ГОСТ Р 52863-2007. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям. М.: Стандартинформ, 2008, 34 с.
12. Национальная оборона [Электрон. ресурс] <http://www.nationaldefense.ru/includes/periodics/exhibitions/2011/1114/21097718/print.html> (дата обращения 22. 11. 2018).
13. РНС [Электрон. ресурс] <https://rns.online/industry/Rosgvardiya-zakazala-chetire-protivodiversiionnih-katera-za-41-mlrd-tublei-2017-10-19/print.html> (дата обращения 19.11.2018).
14. РД В5.8657-89 «Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная».
15. ЦНИИ «Курс» [Электрон. ресурс] <https://www.kyrs.ru/kopiya-mobilnyj-imitator-radiolok-h> (дата обращения 19.11.2018).

[06.11.2018]

А в т о р ы : Щербаков Григорий Николаевич, доктор техн. наук, профессор Военного учебно-научного центра сухопутных войск «Общевойсковой академии Вооруженных сил Российской Федерации» (ВУНЦ СВ «ОВА ВС РФ»).

Русин Павел Владимирович, доктор техн. наук ВУН, зам. начальника научно-исследовательского центра ВУНЦ СВ «ОВА ВС РФ».

Анцелевич Михаил Александрович, доктор техн. наук, профессор, ООО «РОТЕК-ЭЛПОМ».

Сахнов Евгений Николаевич, кандидат техн. наук, ООО «РОТЕК-ЭЛПОМ».

Проценко Олег Петрович, адъютант, ВУНЦ СВ «ОВА ВС РФ».

Elektrichestvo, 2019, No. 4, pp. 51–60

DOI:10.24160/0013-5380-2019-4-51-60

Electromagnetic Compatibility of a Comprehensive Military Diver Combatting Installation with Nearby Radioelectronic Devices

SHCHERBAKOV Grigory N. (*Moscow branch of Combined Arms Academy of the Armed Forces of the Russian Federation — CAA AF RF, Moscow, Russia*) — *Professor, Dr. Sci. (Eng.)*

RUSIN Pavel V. (*Moscow branch of the CAA AF RF, Moscow, Russia*) — *Deputy Head of the Research Center, Dr. Sci. (Eng.)*

ANTSELEVICH Mikhail A. (*LLC «ROTEK-ELPOM», Moscow, Russia*) — *Professor, Dr. Sci. (Eng.)*

SAKHNOV Eugene N. (*LLC «ROTEK-FLPOM», Moscow, Russia*) — *Cand. Sci. (Eng.)*

PROTSENKO Oleg P. (*CAA AF RF, Moscow, Russia*) — *Adjunct*

The article deals with the problem concerned with the effect the impulse electromagnetic field propagating from the electrohydraulic shock installation (EHSI) has on operation of the nearby radioelectronic devices. The problem of electromagnetic compatibility is extremely important for all kinds of military forces, especially for warships, because they contain a multitude of radioelectronic devices and systems for various purposes within a very limited space. The impulse electromagnetic field distribution pattern in the near-emission zone of the anti-sabotage electrohydraulic shock installation generating powerful electromagnetic impulse is studied. The EHSI application fields are classified in a systematic manner, and the operation principles of a particular EHSI adopted for service are considered. The performed analysis made it possible to reveal the key component serving as the main source of electromagnetic emission. The theoretical dependences describing the distributions of magnetic and electrical field amplitudes as functions of the distance from the emission source are obtained. To verify the theoretical calculations, an experiment for

determining the EMF induced in aerials from the impulse electromagnetic field generated by the considered EHSI was carried out. The graphs depicting the distributions of impulse magnetic and electrical fields strength amplitudes testify that the theoretical and experimental data are almost identical with each other.

Key words: *electromagnetic compatibility, impulse electromagnetic field, emission near-field zone, Rogowski coil, SKAT underwater swimmers, protection system*

REFERENCES

1. **Yutkin L.A.** *Electrohidravlicheskiy effect i yego primeneniye v promyshlennosti* (Electrohydraulic effect and its industrial applications). Leningrad, Mashinostroeniye, 1986, 254 p.
2. **Shcherbakov G.N., Yudin S.S.** *Boepripasy i vysokokondensirovannye sistemy – in Russ. (Weapons and highly condensed systems)*, 2017, No. 2, pp. 68–78.
3. **Shcherbakov G.N., Sakhnov Ye.N.** *Strategicheskaya stabil'nost' (Strategic stability)*, 2018, No. 2, pp. 33–38.
4. **Govorkov V.A.** *Electrichekkiye i magnetnye polya* (Electric and magnetic fields). Moscow, Svyaz'izdat, 1951, 339 p.
5. **Krivitskiy Ye.V., Shamko V.V.** *Perekhodnye protsessy pri vysokovol'tnom razryade v vode* (Transients triggered by high-voltage discharge in water). Kiyev, Naukova dumka, 1979, 208 p.
6. **Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V.** *Osnovy teorii tsepey: Uchebnik dlya vuzov* (Bases of theory of chains. Handvook for higher educational institutions). Moscow, Energiya, 1975, 752 p.
7. **Nikol'skiy V.V.** *Teoriya elektromagnitnogo polya* (Theory of electromagnetic field). Moscow, Vysshaya shkola, 1961, 372 p.
8. **Sakharov K.Yu., Yankovskiy B.D., Yedlin M.Yu.** *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti – in Russ. (Electromagnetic compatibility technologies compatibility)*, 2009, No. 3, pp. 47–55.
9. **Myrova L.O., Chepizhenko A.Z.** *Obespecheniye stoykosti apparatury svyazi k ioniziruyushchim i elektromagnitnym izlucheniyam* (En suring communication equipment stability to ionizingandel electromagnetic emissions). Moscow, Radio i svyaz', 1988, 296 p.
10. **Ryapolov A.V.** *Sovershenstvovaniye metodov otsenki pomekhoustoychivosti radioelektronnykh sredstv k vozdeystviyu impul'snykh elektromagnitnykh poley: Diss..... kand. tekhn. nauk* (Sophistication of methods of estimating the immunity of radioelectronic equipment to the effect of impulse electromagnetic fields): Diss. for the Degree of Cand. Sci. (Eng.). Special 05.12.04. Omsk State University of Railway Engineering, 2014, 173 p.
11. **GOST R 52863–2007.** *Avtomatizirovannyye sistemy v zashchishchennom ispolnenii. Ispytaniya na ustoychivost' k prednamerennym silovym elektromagnitnym vozdeystviyam* (GOST R 52863–2007: Protection of information. Protective automatically systems. Testing for stability to intentional power electromagnetic influence. General requirements). Moscow, Standartinform, 2008, 34 p.
12. **Natsionalnaya oborona** [Electron. resurs] <http://www.nationaldefense.ru/includes/periodics/exhibitions/2011/1114/21097718/print.html> (Data obrasheniya 22. 11. 2018).
13. **RNS** [Electron. resurs] <https://rns.online/industry/Rosgvardiya-zakazala-chetire-protivodiversionnih-katera-za-41-mlrd-rublei-2017-10-19/print.html> (Data obrasheniya 19.11.2018).
14. **RD V5.8657–89** «Sovmestimost' radioelektronnykh sredstv elektromagnitnaya» (Electromagnetic compatibility of radio electronic equipment)
15. **TSNII «Kypc»** [Electron. resurs] <https://www.kyrs.ru/kopiya-mobilnyj-imitator-radiolok-h> (Data obrasheniya 19.11.2018).

[06.11.2018]