

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

Кириллов В.Ю.^{1*}, Марченко М.В.^{2**}, Томилин М.М.^{1***}

¹ *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

² *Московское опытно-конструкторское бюро «Марс», МОКБ «Марс», 1-й Щемилковский пер., 16, Москва, 127473, Россия*

* *e-mail: kaf309@mai.ru*

** *e-mail: m-fallout@yandex.ru*

*** *e-mail: emc @mai.ru*

Приведено описание и сформулированы требования проведения стендовых испытаний элементов и устройств бортовой аппаратуры и бортовой кабельной сети космических аппаратов. Предложено проводить стендовые испытания таким образом, чтобы испытываемые элементы и устройства совместно с имитатором элемента корпуса космического аппарата и измерительной аппаратурой не имели связей с цепями заземления и представляли собой расположенную в пространстве изолированную конструкцию.

Ключевые слова: стендовые испытания, электростатический разряд, космические аппараты.

Стендовые испытания элементов и устройств бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов (КА), в отличие от модельных испытаний [1, 2, 5], проводятся в воздушной среде, в лабораторных или цеховых условиях. Электростатические разряды (ЭСР) при стендовых испытаниях имитируются не электронным потоком в электровакуумных камерах, а с помощью генератора ЭСР. Условия проведения стендовых испытаний в лаборатории отличаются от реальных условий полета, при которых возникают ЭСР на борту КА. Воздействие факторов ЭСР в виде электромагнитных импульсов и разрядных токов на элементы и устройства бортовой аппаратуры КА в лабораторных условиях испытаний также отличаются от воздействия этих факторов в реальных условиях [1–3].

Одним из требований проведения стендовых испытаний электронных элементов и устройств бортовой аппаратуры и бортовой кабельной сети (БКС) космических аппаратов на устойчивость к воздействию электростатических разрядов является приближение условий испытаний к реальным условиям полета [1].

Приближение к реальным условиям полета при проведении стендовых испытаний может быть достигнуто путем изолирования испытываемых элементов и устройств БА и БКС от цепей заземления

и максимальным уменьшением емкостных связей с окружающей электропроводной средой.

Установление единых требований по приближению условий стендовых испытаний помехоустойчивости и помехозащищенности элементов и устройств бортовой аппаратуры КА, подвергающихся воздействию имитационных электростатических разрядов, к реальным условиям полета КА позволяет, несмотря на разнообразие испытательной и измерительной аппаратуры, обеспечить единые подходы при проведении стендовых испытаний и, соответственно, возможность сравнительного анализа результатов испытаний различных типов КА [3].

Единые требования должны устанавливать: виды имитационного ЭСР; степени жесткости испытаний; параметры испытательного оборудования; характеристики рабочего места для проведения испытаний; методы проведения испытаний, которые должны учитывать особенности размещения элементов и устройств БА и БКС на конструкции или элементах конструкции КА.

Испытательный генератор ЭСР, применяемый при проведении стендовых испытаний, может создавать разряды следующих видов: контактные искровые разряды; изолированные искровые разряды; контактные неискровые разряды [7, 8].

В реальных условиях космического пространства при нахождении КА в областях высокой концентрации космической плазмы вследствие дифференциальной зарядки диэлектрических поверхностей КА возникают контактные искровые разряды с участков диэлектрических поверхностей на электропроводные элементы конструкции КА [1, 6]. Поэтому основным видом имитационного ЭСР для испытаний КА должен быть контактный искровой разряд, создаваемый генератором электростатических разрядов (ГЭСР).

Для создания контактных искровых ЭСР могут быть использованы серийно выпускаемые генераторы ЭСР, применяемые для испытаний изделий электронной техники на устойчивость к воздействию электростатических разрядов в соответствии с ГОСТ 30804.4.2-2013 .

Согласно данному стандарту испытания проводятся с участием оператора, который создает разряды с помощью генератора ЭСР, находясь в непосредственной близости от испытываемых технических средств.

На фото рис. 1 зафиксирован этап испытаний экранированного кабеля на воздействие контактного неискрового разряда генератором ЭСР при участии оператора.

В данном случае присутствие оператора и применение рекомендованной стандартом схемы испытаний, в которой требуется соединять плоскость горизонтальной связи с плоскостью заземления с помощью двух последовательно соединенных резисторов сопротивлением по 470 кОм, влияет на результаты испытаний элементов и устройств бортовой аппаратуры КА, так как нарушает условия изолированности испытываемых элементов и устройств от цепей заземления и соединенных с ними электропроводных конструкций лаборатории или цеха. Стандартные параметры генератора ЭСР мо-

гут не соответствовать требуемым значениям емкости разрядного конденсатора, которая определяется программой-методикой проведения испытаний элементов и устройств бортовой аппаратуры КА.

Основные параметры испытательного генератора при проведении стендовых испытаний элементов и устройств БА на воздействие ЭСР: емкость разрядного конденсатора $C_p = 50 \div 1000 \text{ пФ} \pm 10\%$; напряжение разряда $U_p = 5 \div 30 \text{ кВ}$; энергия разряда $W = 6 \div 200 \text{ мДж}$ [1].

Уровни напряженностей электрического и магнитного полей, создаваемых включенным генератором ЭСР при отсутствии электростатических разрядов, должны быть не менее чем на 6дБ ниже нормативных значений напряженности электрического и магнитного полей, определяемых стандартами для испытываемых элементов и устройств БА.

Рекомендуемые степени жесткости испытаний элементов и устройств бортовой аппаратуры КА

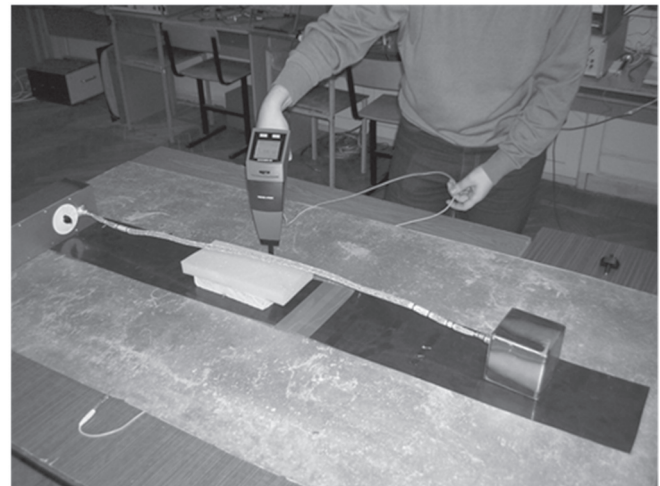


Рис. 1. Испытание экранированного кабеля на воздействие контактного ЭСР генератором ESD30C/P30C с участием оператора

Степени жесткости испытаний

| 1а – контактный неискровой разряд | | 1б – контактный искровой разряд | |
|-----------------------------------|---|---------------------------------|---|
| Степень жесткости | Испытательное напряжение, кВ | Степень жесткости | Испытательное напряжение, кВ |
| 1 | 5 | 1 | 10 |
| 2 | 10 | 2 | 15 |
| 3 | 15 | 3 | 20 |
| 4 | 20 | 4 | 25 |
| 5 | Устанавливается в соответствии с техническими условиями | 5 | Устанавливается в соответствии с техническими условиями |

Испытательное напряжение 5-й степени жесткости должно быть указано в техническом задании на конкретные элементы и устройства БА и БКС. Допускается более высокое напряжение разряда ЭСР, чем для 1–4-й степеней жесткости

приведены в таблице (1а — контактный неискровой разряд, 1б — контактный искровой разряд).

Основным при испытаниях является контактный искровой ЭСР между электродом генератора ЭСР и электропроводной поверхностью, например, имитатором элемента конструкции КА или экранирующим покрытием кабеля. Методом контактного неискрового ЭСР пользуются в случаях, когда необходимо исследовать помехозащищенность элементов без аддитивного влияния электромагнитного импульса, создаваемого плазменным каналом искрового разряда [4].

Для проведения стендовых испытаний стандартный генератор ЭСР может быть оснащен дополнительными блоками разрядных конденсаторов и искровым высоковольтным разрядником, приспособленным для проведения испытаний на элементах конструкции КА. Каждый дополнительный блок разрядных конденсаторов обладает расчетной емкостью, определяемой в соответствии с методикой проведения испытаний на выбранном участке поверхности корпуса или конструкции КА. На рис. 2 приведено фото генератора ЭСР ESD30C/P30C с дополнительным блоком конденсаторов и высоковольтным искровым разрядником.

Электростатический разряд при проведении испытаний создается без разрядного сопротивления. Стандартный генератор ЭСР в данном случае используется в качестве устройства, заряжающего блок конденсаторов до заданного напряжения. Подключение к генератору дополнительного блока конденсаторов и разрядника позволяет проводить испытания без присутствия оператора вблизи испытываемого технического средства (ИТС).

Дополнение модифицированного генератора ЭСР оптоволоконной линией позволяет обеспечить защиту сигналов измерительной информации от

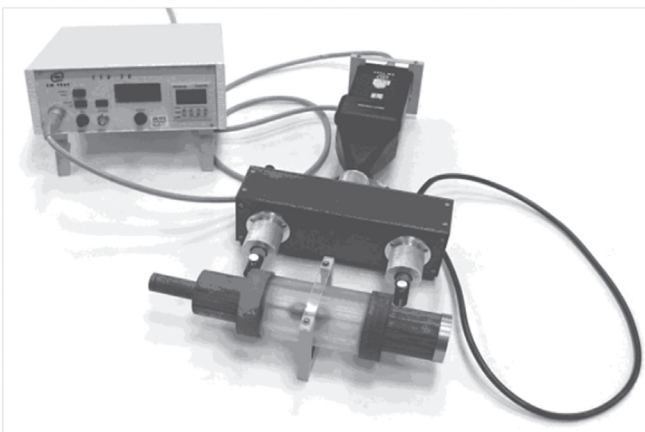


Рис. 2. Генератор ЭСР ESD30C/P30C с дополнительным блоком разрядных конденсаторов и высоковольтным искровым разрядником

электромагнитных помех, создаваемых генератором ЭСР.

На рис. 3 изображен комплект аппаратуры для стендовых, лабораторных и цеховых испытаний КА на воздействие ЭСР.

Испытания могут проводиться в лабораторных или цеховых условиях. В лабораторных условиях испытания элементов и устройств БА и БКС КА проводятся совместно с имитаторами элементов конструкции КА. В цеховых условиях проводятся испытания элементов и устройств БА и БКС на макете КА.

Соединение испытываемых элементов и устройств бортовой аппаратуры, а также имитаторов элементов конструкции КА с цепями заземления испытательной лаборатории приводит, в процессе испытаний, к появлению импульсных излучаемых электромагнитных помех (ЭМП), создаваемых протяженными цепями заземления, которые могут существенно влиять как на измерительную аппаратуру, так и на испытываемые элементы и устройства. С учетом этого при лабораторных или цеховых стендовых испытаниях БА и БКС на помехоустойчивость и помехозащищенность к воздействию ЭСР необходимо учитывать следующие требования: имитатор элемента конструкции КА не должен соединяться с плоскостью заземления; генератор ЭСР должен иметь автономное электропи-

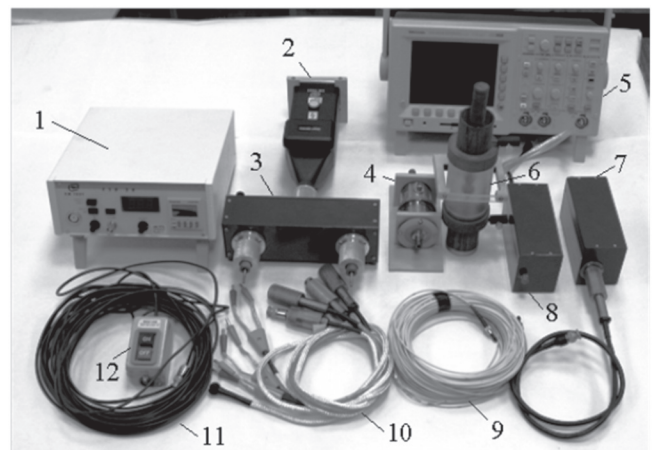


Рис. 3. Комплект аппаратуры для стендовых, лабораторных и цеховых испытаний КА на воздействие ЭСР: 1 — блок управления генератора ЭСР; 2 — высоковольтный модуль генератора; 3 — дополнительный разрядный модуль; 4 — датчик импульсных токов; 5 — цифровой осциллограф; 6 — высоковольтный искровой разрядник; 7 — передающий оптический модуль, совмещенный с датчиком кондуктивных помех; 8 — приемный оптический модуль; 9 — оптоволоконный кабель; 10 — измерительные кабели и кабель с датчиком напряженности электрического поля; 11 — кабель пульта дистанционного включения блока управления; 12 — пульт дистанционного включения блока управления

тание; провод возврата тока подсоединяется только к электропроводному имитатору элемента конструкции КА, но не соединяется с плоскостью заземления, кондуктивно связанной с цепями заземления лаборатории или цеха в отличие от требования стандарта [2].

На рис. 4 приведена схема стенда для испытаний сборки бортового прибора и бортового кабеля КА, расположенных на изолированном имитаторе элемента конструкции КА, на воздействие контактного искрового ЭСР.

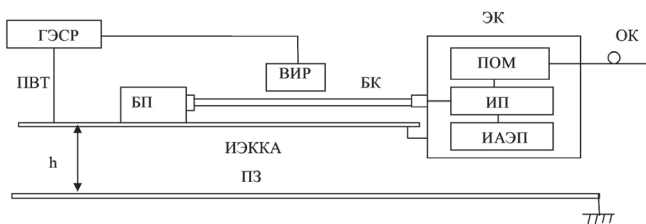


Рис. 4. Схема стенда для лабораторных испытаний бортового прибора и бортового кабеля, расположенных на изолированном имитаторе элемента конструкции КА: БК — бортовой кабель; БП — бортовой прибор; ИЭККА — имитатор элемента конструкции КА; ГЭСР — генератор ЭСР с автономным источником электропитания; ВИР — высоковольтный искровой разрядник; ПВТ — провод возврата тока ЭСР; $h \geq 0,8$ м — высота над уровнем плоскости заземления; ПЗ — плоскость заземления (медный или алюминиевый лист); ЭК — экранированная камера для размещения измерительного приемника (ИП), источника автономного электропитания (ИАЭП), передающего оптического модуля (ПОМ) и т.п.; ОК — оптоволоконный кабель

В соответствии со схемой на рис. 4 измерительный приемник, источник автономного электропитания и передающий оптический модуль размещаются в экранированной камере (рис. 5).

Фото стенда для испытаний бортовых кабелей КА на воздействие контактного искрового ЭСР приведено на рис. 6.

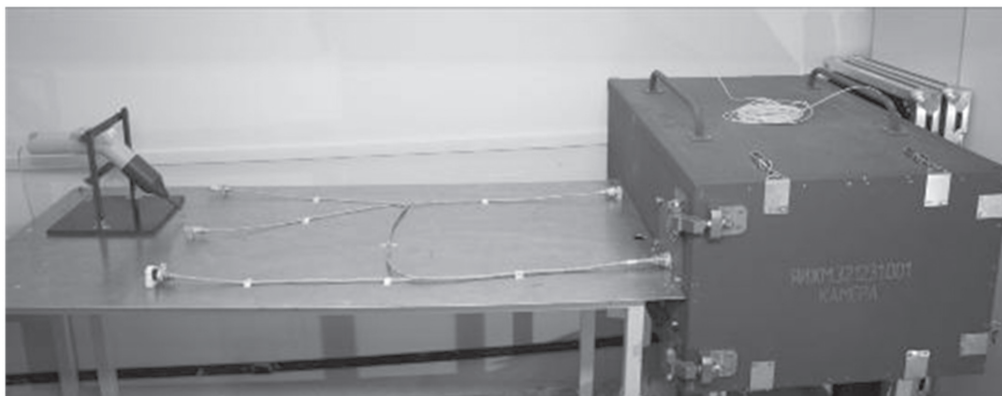


Рис. 6. Внешний вид стенда для испытаний бортовых кабелей КА на воздействие ЭСР

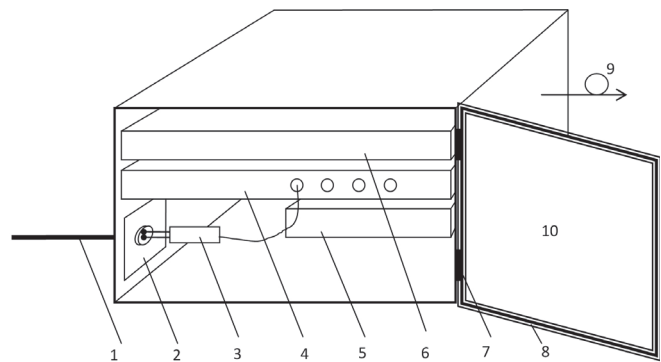


Рис. 5. Экранированная камера с измерительной аппаратурой: 1 — испытываемый бортовой кабель, подключенный к проходному устройству; 2 — проходное устройство с имитатором нагрузки; 3 — нагрузочное сопротивление с подключенным к нему дифференциальным пробником (при необходимости); 4 — измерительный приемник; 5 — передающий оптический модуль, предназначенный для передачи сигналов измерительной информации по оптическому кабелю; 6 — источник бесперебойного питания; 7 — петли двери экранированной камеры; 8 — фрезерованный лабиринт с пружинными элементами, предназначенный для обеспечения сплошного электрического контакта по всему периметру двери, при закрытии; 9 — оптический кабель; 10 — дверь экранированной камеры

На стенде испытываемые элементы БКС — кабели — подсоединяются к измерительному приемнику, который расположен в корпусе экранированной камеры, через электрический соединитель. Экранированная камера защищает измерительный приемник от воздействия излучаемых ЭМП в виде электрического и магнитного полей ближней зоны, создаваемых генератором при имитации ЭСР. Эффективность экранирования камеры должна быть не менее 40 дБ. Экранированная камера, как и измерительный приемник, не заземляется и кондуктивно связана с имитатором элемента конструкции КА. Генератор ЭСР и измерительный приемник имеют собственное автономное электропитание. Провод возврата тока генератора ЭСР соединяет-

ся только с имитатором элемента конструкции КА. Результаты измерений уровней, создаваемых электростатическими разрядами кондуктивных ЭМП в виде напряжений на внутренних проводниках испытываемых кабелей, передаются от измерительного приемника на компьютер по оптоволоконному кабелю. Имитатор элемента конструкции располагается на расстоянии от плоскости заземления, при котором электрическая емкость между ними минимальна и практически не влияет на параметры имитационного ЭСР и создаваемых им ЭМП.

Выводы

Испытательный стенд, состоящий из электронных и конструкционных элементов и устройств бортовой аппаратуры КА, совместно с генератором ЭСР и измерительной аппаратурой, размещенной в экранированной камере, представляет собой изолированную в пространстве конструкцию. Размещение стенда в безэховой камере (на рис. 6 не показано), с учетом минимальных значений токов смещения между стендом и заземленными электропроводными конструкционными элементами лаборатории или цеха позволяет приблизить условия испытаний на воздействие имитационных ЭСР к условиям возникновения ЭСР в полете на борту КА.

Библиографический список

1. Кириллов В.Ю. Электромагнитная совместимость летательных аппаратов. — М.: Изд-во МАИ, 2012. — 162 с.
2. Иванов В.А., Кириллов В.Ю., Морозов Е.П. Модельные и стендовые исследования электризации космических аппаратов: Монография. — М.: Изд-во МАИ, 2012. — 167 с.
3. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х., Томилин М.М. Математическая модель воздействия электростатического разряда на бортовую кабельную сеть космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 3. С. 118-127.
4. Чермошенцев С.Ф., Гизатулин З.М. Моделирование влияния разряда статического электричества на элементы печатных плат электронных средств // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2000. № 2. С. 22-26.
5. Кириллов В.Ю., Марченко М.В., Томилин М.М. Электромагнитная совместимость бортовой кабельной сети летательных аппаратов. — М.: Изд-во МАИ, 2014. — 172 с.
6. Иванов В.А., Кириллов В.Ю., Морозов Е.П., Томилин М.М. Модельные испытания электризации бортовых кабелей космических аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. 2013. № 4(47). С. 56-59.
7. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. — М.: ИД «Технологии», 2005. — 352 с.
8. Балюк Н.В., Болдырев В.Г., Булеков В.П., Кечиев Л.Н., Кириллов В.Ю., Литвак И.И., Постников В.А., Резников С.Б. Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов. — М.: Изд-во МАИ, 2004. — 647 с.

SPACECRAFT ELEMENTS AND UNITS BENCHMARK TEST ON ELECTROSTATIC DISCHARGES IMPACT

Kirillov V.Yu.^{1*}, Marchenko M.V.^{2**}, Tomilin M.M.^{1***}

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

² Moscow Experimental Design Bureau "Mars", MEDB "Mars", 16, 1st Shemilovskiy lane, Moscow, 127473, Russia

* e-mail: kaf309@mai.ru

** e-mail: m-fallout@yandex.ru

*** e-mail: emc @mai.ru

Abstract

The spacecraft onboard equipment electronic components and units, as well as cable networks benchmark testing on electrostatic discharges (ESD) resistant strength should be carried out conditions closer

to the real spacecraft operation conditions, in which electrostatic discharges occur.

Benchmark tests are performed in the air medium, and electrostatic discharges are simulated an ESD-generator. Thus, drawing near real conditions of the

outer space is possible only by insulating elements and units from grounding circuit and maximum offset from the conducting environment to reduce the capacitive coupling.

Establishing the standard requirements to the onboard equipment noise immunity to simulated electrostatic discharges impact allows ensuring the possibility of comparative analysis of the testing results of various space vehicles.

These standard requirements should specify the simulated ESDs types; the degree of the tests' robustness; characteristics of the working place for tests. The testing methods should account for the specifics of onboard elements and units, as well as cable network placing on the spacecraft structure.

The article presents the description and requirements for the spacecraft onboard elements and units, as well as cable network benchmark testing

The authors suggest performing the benchmark tests in such a way that the elements and units under testing together with along with spacecraft shell element and measuring equipment would not have connections with grounding circuits and power network, and placed far from the conducting medium.

Keywords: benchmark test, electrostatic discharge, spacecraft.

References

1. Kirillov V.Yu. *Elektromagnitnaia sovmestimost' letatel'nykh apparatov* (Electromagnetic compatibility of flying vehicles), Moscow, MAI, 2012, 162 p.
2. Ivanov V.A., Kirillov V.Yu., Morozov E.P. *Model'nye i stendovye issledovaniya elektrizatsii kosmicheskikh apparatov* (Modeling and bench-testing studies of spacecraft electrization), Moscow, MAI, 2012, 167 p.
3. Kirillov V.Yu., Klykov A.V., Nguen V.Kh., Tomilin M.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no.3, pp. 118–127.
4. Chermoshentsev S.F., Gizatullin Z.M. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2000, no. 2, pp. 22–26.
5. Kirillov V.Yu., Marchenko M.V., Tomilin M.M. *Elektromagnitnaya sovmestimost' bortovoi kabel'noi seti letatel'nykh apparatov* (Electromagnetic compatibility of electrical interconnection wiring system of flying vehicles), Moscow, MAI, 2014, 172 p.
6. Ivanov V.A., Kirillov V.Yu., Morozov E.P., Tomilin M.M. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti*, 2013, no. 4(47), pp. 56–59.
7. Kechiev L.N., Pozhidaev E.D. *Zashchita elektronnykh sredstv ot vozdeistviya staticheskogo elektrichestva* (Electronic devices protection from static electricity exposure), Moscow, Tekhnologii, 2005, 352 p.
8. Balyuk N.V., Boldyrev V.G., Bulekov V.P., Kechiev L.N., Kirillov V.Yu., Litvak I.I., Postnikov V.A., Reznikov S.B. *Elektromagnitnaya sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv podvizhnykh ob'ektov* (Electromagnetic compatibility in technical units of moving vehicles), Moscow, MAI, 2004, 647 p.