

УДК 621.391.827

В.В. Князев, А.Ю. Скобликов

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина*

## МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ

*В статье рассмотрен метод, позволяющий осуществлять оперативную диагностику степени электромагнитной герметичности корпусов – электромагнитных экранов. Метод основан на использовании резонансных свойств корпусов как эндовибраторов. Проведена экспериментальная проверка предлагаемого метода.*

**Ключевые слова:** электромагнитный экран, эффективность экранирования, резонансная частота, метод диагностики, мощная электромагнитная помеха.

### Введение

**Постановка проблемы.** При осуществлении планового обслуживания авиационной техники, в частности самолетов, важным этапом является диагностика электромагнитной герметичности электромагнитных экранов, являющихся важным элементом защиты оборудования летательных аппаратов от мощных импульсных электромагнитных полей молнии, а также от электромагнитных полей высокой интенсивности (HIRF), излучаемых радарными. До недавнего времени мероприятия по защите самолетов от воздействия HIRF и молнии в основном заключались в разработках оборудования, испытаниях и анализах, необходимых только для процедуры сертификации самолета. Однако поддержание летной годности самолета в части средств защиты от воздействия указанных выше негативных явлений является не менее важным, чем первоначальное состояние данных средств защиты. Существовавшие ранее программы обслуживания большинства самолетов не содержали специальных требований по проверке состояния средств защиты от непрямого воздействия молнии, а также от HIRF. Однако, в связи с расширяющимся внедрением электродистанционных систем управления (ЭДСУ) полетом и других электронных и электрических систем, выполняющих критические функции в полете, электромагнитная защита самолета становится приоритетной с точки зрения поддержания летной годности в эксплуатации. После того, как в 1996-1997 гг. была выявлена коррозия соединителей в электрической проводке ЭДСУ самолетов Airbus A320 и Boeing 777, что привело к потере электромагнитной герметичности электромагнитных экранов, Федеральным управлением гражданской авиации США были разработаны организационные мероприятия, направленные на создание сертификационных и

постсертификационных требований по обеспечению электромагнитной защиты самолетов, а также изучение проблем, связанных со старением элементов электрических и электронных систем.

Применение защитного экранирования электрической проводки предполагает обеспечение контакта в местах соединения металлических элементов экранирования. Неизбежное присутствие электролита приводит к возникновению оксидов между соприкасающимися элементами электрических соединений. Нарастание оксидной пленки, являющейся изолятором, постепенно повышает переходное сопротивление электрического соединения и спустя определенное время приводит к полному разрыву электрической цепи. Подобная деградация приводит к снижению защитных свойств электромагнитного экрана и позволяет наведенным напряжениям, возникающим при воздействии HIRF или молнии, проникать в защищаемые электрические линии и попадать на входы критического электронного оборудования. Опасностью подобной деградации является то, что она относится к скрытым повреждениям, поскольку ее признаки не выявляются визуальным осмотром. Все сказанное выше в полной мере относится и к корпусам аппаратуры, выполняющим функцию электромагнитных экранов, образующих вместе с экранами кабельных линий единую защитную систему. Электромагнитная герметичность электромагнитных экранов снижается в процессе эксплуатации вследствие воздействия вибраций вплоть до полного ее исчезновения на определенных резонансных частотах. Потому актуальной является задача проведения периодического контроля качества электромагнитной герметичности электромагнитных экранов в процессе их эксплуатации без необходимости снятия оборудования с борта воздушного судна и без необходимости демонтажа

элементов электромагнитного экрана, а также определения места нарушения гальванических контактов между элементами электромагнитного экрана.

**Анализ последних публикаций.** Единственным способом выявления таких скрытых дефектов, как коррозия и ослабление затяжки частей соединителей, является измерение переходных сопротивлений электрических соединений. При достижении сопротивлением критического значения должны выполняться восстановительные работы.

Изначально разработанные методы измерения сопротивления предполагали рассоединение соединителей и измерение сопротивления омметром. В связи с тем, что омметр пропускает через проверяемую цепь электрический ток с фиксированным значением и измеряет результирующее напряжение, при определении сопротивления конкретной цепи требуется ее полная электрическая изоляция от любых других цепей, по которым может протекать ток омметра. Если паразитные цепи не будут разорваны, ток омметра потечет по ним, что не позволит выполнить точный замер. Такой подход требует рассоединения соединителей, полной изоляции проверяемого соединения, длительного времени замеров и, главное, не гарантирует того, что соединение будет восстановлено соответствующим образом при повторной сборке, тем самым требуя полной проверки функционирования системы, в которой производилась проверка элементов экранирования.

Первоначальные попытки проведения неразрушающего контроля выполнялись с помощью сетевого анализатора. Однако подобное лабораторное оборудование оказалось совершенно не приспособленным для использования в полевых условиях.

С целью обеспечения проведения неразрушающего контроля средств экранирования и заземления в полевых условиях BAE Systems, по заказу Boeing, разработан прибор для измерения сопротивления замкнутой цепи – LRT (Loop Resistance Tester) (патент США № 6225810 [1]), позволяющий производить измерение без рассоединения соединителей. В режиме измерения указанный прибор с помощью кольцевидного индуктора на экранирующую оплетку наводится напряжение, а с помощью индуктивного датчика измеряется возникающий ток. Далее прибор численно демодулирует форму кривых напряжения и тока, возникающих в контуре для представления их в комплексном виде путем умножения на синус и косинус и последующего сложения. Отношение комплексного напряжения к току позволяет определить импеданс контура, действительная составляющая которого и является искомым сопротивлением контура.

Основным недостатком описанного способа диагностики электромагнитных экранов является то, что он применим только для диагностики состояния

гальванического соединения защитного экрана (оплетки) кабеля с корпусом аппаратуры и не может быть использован для диагностики электромагнитной герметичности самого корпуса аппаратуры. Также к недостаткам можно отнести узкий диапазон индуцируемых прибором частот (от 200 Гц до 1 кГц), что в свою очередь не позволяет обеспечить достаточную достоверность измерения электромагнитной герметичности электромагнитных экранов во всем необходимом диапазоне частот (до 18 ГГц).

Известен способ электромагнитной дефектоскопии, описанный в патенте РФ № 2146047 [2], заключающийся в том, что контролируемое изделие облучают электромагнитными сигналами под углом к его поверхности, принимают отраженные электромагнитные сигналы, измеряют параметры отраженных электромагнитных сигналов и по результатам измерений определяют наличие дефектов. Однако, описанный способ нельзя применить для аппаратуры, смонтированной в стойки на борту самолета, поскольку доступа ко всем сторонам корпуса аппаратуры, как правило, нет. Поэтому, не представляется возможным установить диэлектрическую пластину, в которой размещены передающая и приемная антенны. Кроме того, близость соседних корпусов существенно изменяет параметры приемных антенн, следовательно, и достоверность их показаний.

Известен способ поиска нарушений целостности металлических оболочек, регламентируемый стандартом IEEE Std 299-1991 [3]. Указанный способ заключается в том, что приемная антенна располагается внутри оболочки, а излучающая антенна – снаружи оболочки. Антенны синхронно перемещаются вдоль поверхности оболочки с сохранением расстояния между антеннами и между каждой антенной и оболочкой при сохранении выбранной ориентации (поляризации) антенн. Недостатком описанного способа является необходимость размещения приемной антенны внутри корпуса электромагнитного экрана и перемещения антенны по объему корпуса, что делает невозможным реализацию данного способа для готового изделия, там более, уже установленного на борту воздушного судна.

Известен способ диагностики электромагнитной герметичности электромагнитных экранов, описанный в патенте Украины № 50968 [5], включающий активацию, по меньшей мере, одного излучателя зондирующего электромагнитного излучения, регистрацию сигнала, наведенного зондирующим электромагнитным излучением, прошедшим через электромагнитный экран, интерпретацию полученного сигнала для определения параметров электромагнитной герметичности экрана, при этом излучатель размещают снаружи электромагнитного экрана,

а наведенный сигнал регистрируют посредством приемника, размещенного внутри экрана. Ответный сигнал преобразуют в цифровую форму и передают на обработку через линию беспроводной связи. Недостатком описанного способа является необходимость преобразования сигнала ответа в цифровой сигнал и передачу его на обработку. Это существенно усложняет схему приемного устройства и его систему электропитания, в результате чего его габаритные размеры не могут удовлетворить требованиям поставленной задачи. Кроме того, поскольку цифровой сигнал не содержит идентификационного кода корпуса, метод пригоден только для диагностики единичного объекта.

**Целью данной статьи** является описание метода диагностики электромагнитной герметичности электромагнитного экрана, который позволяет обеспечить возможность осуществления эффективной и достоверной диагностики электромагнитной герметичности электромагнитного экрана, возможность автоматизации указанной диагностики, а также возможность реализации способа без необходимости демонтажа и/или разъединения элементов электромагнитных экранов.

### **Метод диагностики электромагнитных экранов**

Суть предлагаемого метода диагностики электромагнитной герметичности заключается в реализации следующих действий:

- активация излучателя зондирующего электромагнитного поля;
- регистрация сигнала, наведенного зондирующим электромагнитным полем, прошедшим через электромагнитный экран;
- интерпретация полученного сигнала для определения параметров электромагнитной герметичности экрана.

При этом, излучатель размещают снаружи электромагнитного экрана, а наведенный сигнал регистрируют посредством приемника, размещенного внутри экрана. Частоты зондирующего излучения выбирают в диапазоне от 1 МГц до 18 ГГц, а приемник настраивают перед его размещением внутри экрана, по меньшей мере на одну выбранную частоту зондирующего поля.

Параметры зондирующего электромагнитного поля выбирают в зависимости от моделируемого физического явления, а частоту (частоты) настройки приемника согласовывают с одной (несколькими) из собственных резонансных частот экрана в диапазоне от 1 МГц до 18 ГГц. Также выбор частот зондирующего излучения осуществляют в зависимости от геометрических размеров электромагнитного экрана. Оптимальным является излучение на одной из собственных резонансных частот тестируемого кор-

пуса.

Описанная реализация позволяет обеспечить возможность осуществления эффективной и достоверной диагностики электромагнитной герметичности электромагнитного экрана. Выполнение приемника автономным позволяет обеспечить реализацию способа без необходимости демонтажа и/или разъединения элементов электромагнитных экранов, что делает возможным диагностику уже смонтированного на борту воздушного судна оборудования, обеспечивающего защиту от электромагнитного излучения различной интенсивности. Преимущественно приемник выполняют с установленным порогом срабатывания. Определение этого порога осуществляется путем численного моделирования соответствующей задачи проникновения зондирующего излучения через существующие неоднородности корпуса электромагнитного экрана. Активируют приемник и выключают его путем подачи акустического сигнала или путем воздействия низкочастотным магнитным полем. Возможность настройки приемника на одну или несколько частот зондирующего излучения позволяет расширить диапазон возможностей предлагаемого способа, поскольку указанный диапазон резонансных частот включает максимально высокие частоты для таких дестабилизирующих явлений как молния или HIRF.

Фиксированные места расположения используемого при реализации метода излучателя и его поляризации устанавливают для каждого конкретного варианта корпуса электромагнитного экрана. Целесообразным является такое исполнение, при котором факт превышения наведенного сигнала заданного порогового уровня идентифицируется путем его преобразования в кодированный сигнал, способный проникать через экран. Это позволяет обеспечить эффективное взаимодействие пары приемник – излучатель при осуществлении диагностики электромагнитного экрана.

Кодированным сигналом, который генерируется приемником в случае нарушения заданного уровня герметичности электромагнитного экрана, может являться электромагнитное излучение или же акустический сигнал. Кодированным сигналом может являться световой сигнал, являющийся электромагнитным излучением в оптическом диапазоне. Наличие или отсутствие светового сигнала является наиболее простым вариантом кодировки. Это позволяет обеспечить достаточную простоту реализации метода, поскольку в качестве элементов конструкции возможно использование известных и достаточно распространенных технических решений, что не требует больших финансовых вложений в разработку специальной технической базы. Целесообразным является осуществление интерпретации полученного сигнала измерительным устройством, выполнен-

ным с возможностью передачи информации на персональный компьютер, с помощью которого осуществляется идентификация экрана, утратившего электромагнитную герметичность. Также, возможной является интерпретация полученного сигнала путем визуальной регистрации срабатывающего при потере электромагнитным экраном герметичности светового индикатора, размещенного на поверхности экрана. Указанные варианты интерпретации полученных от приемника сигналов позволяют осуществить получение достоверных результатов диагностики электромагнитной герметичности без необходимости специальной подготовки обслуживающего персонала, что в свою очередь способствует повышению экономической эффективности внедрения метода при осуществлении периодического контроля электромагнитной герметичности как отдельных элементов конструкции экранов так и качества гальванических соединений корпусов и электрической проводки.

Предлагаемый метод диагностики электромагнитной герметичности электромагнитных экранов реализуется следующим образом.

Предварительно внутри электромагнитного экрана размещают приемник, предназначенный для регистрации наводимого сигнала. Размещение приемника внутри экрана, как правило, осуществляется еще на этапе производства аппаратуры. Диагностику электромагнитной герметичности экрана – корпуса изделия осуществляют в выключенном состоянии изделия, поскольку, в процессе работы изделие может возбуждать собственные резонансные колебания электромагнитного поля внутри корпуса. При осуществлении диагностики электромагнитной герметичности экранов снаружи конкретного экрана размещают излучатель с предварительно установленной поляризацией. Вариант (варианты) поляризации определяют конструкцией конкретного корпуса электромагнитного экрана, с учетом наиболее вероятных мест нарушения его электромагнитной герметичности. В случае отсутствия такой априорной информации, поочередно устанавливают три ортогональных варианта поляризации воздействующего электрического поля. Приемник активируют путем подачи акустического сигнала или путем воздействия низкочастотным магнитным полем. Приемник перед установкой в корпус аппаратуры настраивают на конкретную (одну или несколько) частоту зондирующего излучения, которая обуславливается собственными характеристиками экрана и является для экрана резонансной частотой. Для определения набора резонансных частот экрана можно воспользоваться формулой (1), представленной в работе [6].

$$f_{i,j,k} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{i}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{j}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{k}{l_z}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света, м/с;  $i, j, k$  – целые положительные числа, начиная с 0. Одновременно все равными нулю не могут быть;  $l_x, l_y, l_z$  – длины ребер параллелепипеда вдоль осей декартовой системы координат, центр которой совпадает с одним из его углов, м.

Например [6], для экрана в виде параллелепипеда с габаритными размерами  $l_x = 0,2$  м,  $l_y = 0,4$  м, и  $l_z = 0,6$  м, в частотном диапазоне от нуля до  $f = 1$  ГГц, имеется семь резонансных частот, связанных с различными модами поля. Предположим, на экран, в одной из боковых поверхностей которого имеется круглое отверстие радиусом  $R = 0,015$  м, воздействует гармоническое электромагнитное поле. Защитные свойства экрана, характеризуются коэффициентом затухания SE, который определяется по формуле.

$$SE = 20 \log (E_0 / E_i), \quad (2)$$

где  $E_0$  – напряженность электрической составляющей воздействующего электромагнитного поля;  $E_i$  – напряженность электрического поля внутри экрана.

Для рассматриваемого случая, значения коэффициента затухания в геометрическом центре экрана в зависимости от частоты и угла падения  $\theta$  воздействующего поля представлены на рис. 1 [6].

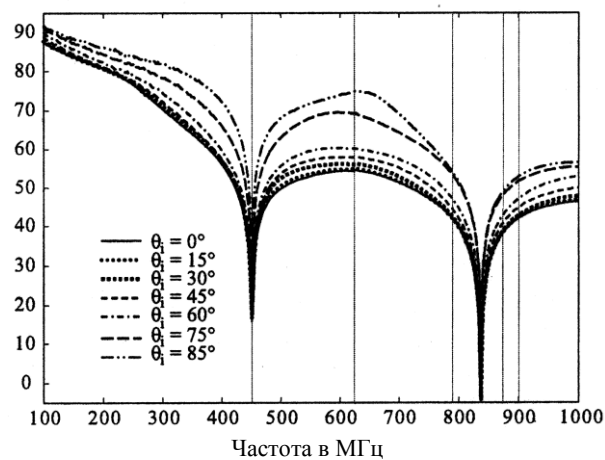


Рис. 1. Зависимость коэффициента затухания SE от частоты и угла падения  $\theta$  воздействующего поля для случая  $TE_z$ -поляризации

Из представленных результатов видно, что независимо от угла падения, напряженность электрического поля внутри экрана имеет максимальные значения на резонансных частотах экрана, которые при данной поляризации равны 450 МГц и 838 МГц. Значение частоты, на которую следует настроить приемник, зависит от конструкции экрана и может определяться как расчетным, так и экспериментальным методом. Это значение частоты записывается в формуляр аппаратуры. В дальнейшем, диагностика герметичности корпуса должна осуществляться на

этой частоте.

Возможно использование зондирующего электромагнитного излучения в виде широкополосного импульса, содержащего в своем спектре резонансные частоты, на которые настроены приемники, размещенные внутри экранов, электромагнитная герметичность которых проверяется. Это позволит осуществлять диагностику сразу всей аппаратной стойки.

### Экспериментальная проверка метода

Экспериментальная проверка предлагаемого метода проведена на макете корпуса в виде цилиндрической оболочки диаметром 0,9 м, длиной 3,0 м, с толщиной стенки 1,5 мм, выполненной из алюминиевого сплава АМц. Внутри оболочки размещалась приемная антенна АИ5-0, соединенная с анализатором спектра R&S FSL3. Воздействующее электромагнитное поле создавалось широкополосным генератором RIGOL DG3121A, нагруженным на дипольную антенну. Экспериментальная установка показана на рис. 2.

В результате сканирования по частоте в диапазоне от 100 МГц до 2 ГГц, было показано, что напряженность электрического поля внутри корпуса имеет резкие максимумы на резонансных частотах (рис. 3). Особенно сильно этот эффект проявляется при совпадении частоты генератора с собственной резонансной частотой корпуса, такой случай показан на спектрограмме (рис. 4). Уровень воздействующего электрического поля был около 90 дБ (мкВ/м). Из рис. 4 видно, что уровень электрического поля внутри корпуса равен 90,16 дБ (мкВ/м). Следовательно, экранирующие свойства корпуса,

имеющего нарушение целостности стенок, на резонансной частоте полностью утрачиваются.



Рис. 2. Экспериментальная установка

Важно отметить, что резонанс корпуса возникает как в случае нарушения его (корпуса) целостности, так и в случае нарушения гальванического контакта между оплеткой кабельной линии и корпусом в месте их соединения. Кроме того, эффект возникновения резонансных колебаний слабо зависит от поляризации зондирующего поля. Таким образом, предложенный метод позволяет одновременно осуществить диагностику системы экранирования корпус – кабельные линии. Описанный выше метод защищен патентом Украины №61344 [7].

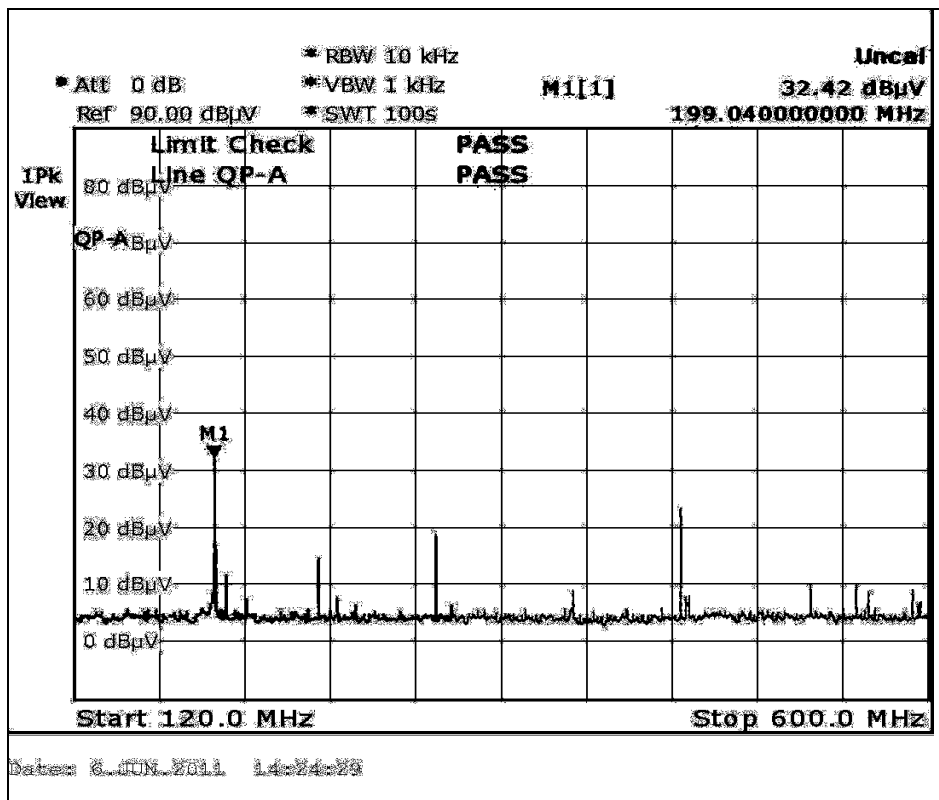


Рис. 3. Фон Е поля внутри корпуса

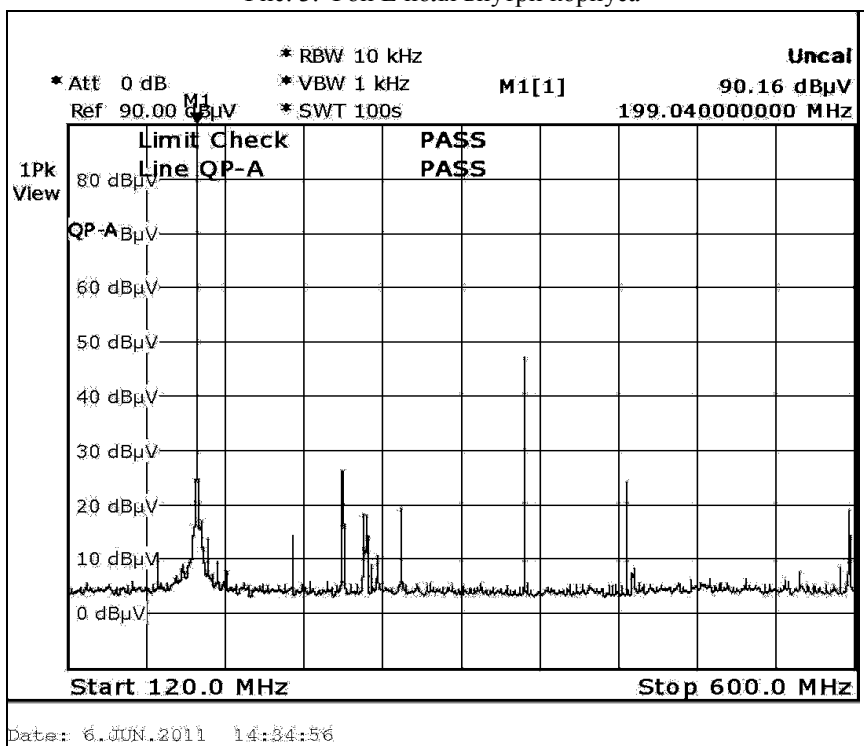


Рис. 4 Спектрограмма Е поля внутри корпуса. Частота генератора равна 199,04 МГц

### Выводы

1. Предложен метод, позволяющий осуществлять оперативную диагностику степени электромагнитной герметичности корпусов – электромагнитных экранов.
2. Метод основан на использовании ре-

зонансных свойств корпусов как эндовибраторов.

3. Предложенный метод позволяет одновременно осуществить диагностику системы экранирования корпус – кабельные линии.

4. Проведено экспериментальное доказательство работоспособности метода.

5. Требуется проведение дальнейших исследований по созданию простого и надежного антенного устройства, которое обеспечит автоматизацию предложенного процесса диагностики.

## Список литературы

1. Patent USA № 6225810. Loop Resistance Tester.
2. Патент РФ №2146047 Способ электромагнитной дефектоскопии.
3. Standard IEEE Std 299-1997. Standard Method for Measuring the Effectiveness of the Electromagnetic Shielding Enclosures.
4. Kleine-Ostmann T. A new shielding effectiveness measurement method based on a skin-effect transmission line coupler // Adv.Radio Sci.. – 2007. – 5. – P. 37-42.
5. Патент України № 50968 Спосіб неруйнівного контролю об'єктів та речовин. Бюлетень №12, 2010р.
6. Celozzi T. Electromagnetic Shielding / T. Celozzi, R.. Araneo, G. Lovat. – Wiley Interscience, 2008. – 376 p.
7. Патент України №61344 Спосіб діагностики електромагнітної герметичності електромагнітних екранів. Бюл. № 13, 2011р.

Поступила в редколлегию 27.08.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.В. Руженцев, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## МЕТОД ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ

В.В. Князєв, О.Ю. Скобликов

*В статті розглянутий метод, що дозволяє здійснювати оперативну діагностику міри електромагнітної герметичності корпусів - електромагнітних екранів. Метод заснований на застосуванні резонансних властивостей корпусів як ендовібраторів. Проведена експериментальна перевірка запропонованого методу.*

**Ключові слова:** електромагнітний екран, ефективність екранування, резонансна частота, метод діагностики, потужна електромагнітна завада.

## METHOD OF DIAGNOSTICS ELECTROMAGNETIC TO IMPERMEABILITY OF ELECTROMAGNETIC SCREENS

V.V. Kniaziev, O.Y. Skoblikov

*A method allowing to carry out operative diagnostics of the degree of the electromagnetic impermeability of corps - electromagnetic screens is considered in the article. A method is based on the used of resonant properties of corps as endovibrators. Experimental verification of the offered method is conducted.*

**Keywords:** electromagnetic screen, screening efficiency, resonant frequency, method of diagnostics, powerful electromagnetic disturbance.