

Ю.С. НЕМЧЕНКО, гл. метролог, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
Н.Д. ЖИВОТОВ, вед. инженер, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
А.И. САРАЕВ, науч. сотрудник, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
Т.Н. ОСТРОВЕРХ, вед. инженер, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА КОНДУКТИВНЫХ РАДИОПОМЕХ

Описана современная методика измерения эмиссии тока радиопомех от бортового авиационного оборудования с помощью токосъемника ТС-А, созданного и прокалиброванного в Испытательной лаборатории НИПКИ «Молния». Эта методика позволяет быстро и эффективно определить: выполняются ли в испытываемом изделии требования по эмиссии токов радиопомех по всем действующим в Украине нормативным документам в полном объеме.

Ключевые слова: эмиссия тока радиопомех, токосъемник, бортовое авиационное оборудование.

Вступление. Выполнение требований по электромагнитной совместимости (ЭМС) сейчас является обязательным при проектировании и разработке любых технических средств (ТС), содержащих в своем составе электрические, электронные или радиокомпоненты. Особенно остро выполнение этих требований предъявляется к ТС повышенной опасности, например, для ТС атомных электростанций, летательных аппаратов и др. Усугубляется это обстоятельство еще и тем, что у этих ТС очень насыщенная компоновка и разветвленная и протяженная информационная и энергетическая кабельная сеть. Именно из-за этого облегчается проникновение различного рода радиопомех во внутрь ТС, что может вызвать сбои или даже отказы отдельных ТС.

Именно благодаря этим фактам в мире выработаны жесткие требования как по стойкости ТС к внешним помехам, так и по эмиссии собственных радиопомех.

Основная часть. В данной статье мы ограничимся только одним из видов радиопомех, а именно, токами кондуктивных радиопомех, которые генерируются ТС (конкретно бортовым авиационным оборудование – БАО) в отходящие от них проводники (провода электропитания и информационные линии). Для исключения негативных последствий этой эмиссии токи радиопомех жестко ограничиваются всеми нормативными документами в этой области. Эти ограничения называются нормами, которые нельзя превышать во всем частотном диапазоне.

На рис. 1 приведены некоторые нормы на эмиссию токов кондуктивных радиопомех (ЭТРП), введенные отечественными стандартами КТ-160D (для БАО гражданской авиации) [1] и ОСТ В1 02696-90 (для БАО военной авиации) [2].

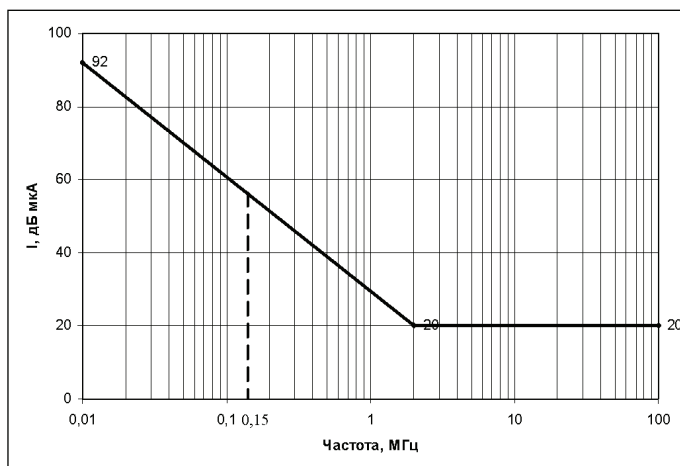


Рисунок 1 – Нормы эмиссии кондуктивных токов радиопомех от БАО в диапазоне частот от 10 кГц до 100 МГц

На этом рисунке объединены нормы на ЭТРП по обоим стандартам, так как они отличаются только частотным диапазоном (полный график в диапазоне частот от 10 кГц до 100 МГц распространяется на БАО военной авиации, а сокращенный – от 150 кГц до 100 МГц на БАО гражданской авиации).

Нормируются ЭТРП в дБ мкА. Это означает, что току в 1 мкА соответствует уровень в 0 дБ с дальнейшим пересчетом по формуле

$$I(\text{дБ}) = 20 \log I(\text{мкА}). \quad (1)$$

Таким образом, из рис. 1 видно, что в диапазоне частот от 2 МГц до 100 МГц нормы допускают уровень ЭТРП 20 дБ мкА, то есть 10 мкА. Это очень жесткие требования не только с точки зрения сложности обеспечения в БАО такой эмиссии, но и с точки зрения измерения таких токов. Последнее обстоятельство требует применения чрезвычайно чувствительной и широкополосной измерительной аппаратуры.

В испытательной лаборатории НИПКИ «Молния» эта задача была решена после создания токоусъемника ТС-А [3] под селективные измерительные приемники SMV-11 (диапазон частот от 10 кГц до 30 МГц) и SMV-8,5 (диапазон частот от 30 МГц до 100 МГц).

ТС-А представляет собой высокочастотное ферритовое кольцо с размерами 120x80x25 мм, на котором размещен объемный виток измерительного преобразователя (ИП-ТС), соединяемый при помощи штатного измерительного кабеля (ИК-ТС) с измерительным селективным устройством. При измерениях ЭТРП проводник, в котором протекает измеряемый ток, пропускают через ферритовое кольцо ТС-А. Вокруг проводника возникают кольцевые силовые линии магнитного поля, которые сосредоточены, в основном, внутри

ферритового кольца. Эти силовые линии пронизывая измерительный виток ИП-ТС перпендикулярно его плоскости наводят в нем э.д.с., которая является мерой измеряемого тока. Т.о. ТС-А – это одновитковый пояс Роговского.

Упрощенная схема замещения ТС-А приведена на рис. 2, где L_{II} – индуктивность ИП; R_{III} – входное сопротивление измерительного прибора; U_{III} – напряжение на выходе ТС-А; I_{III} – ток, протекающий в ТС-А; e_{II} – э.д.с., наводимая в ИП.

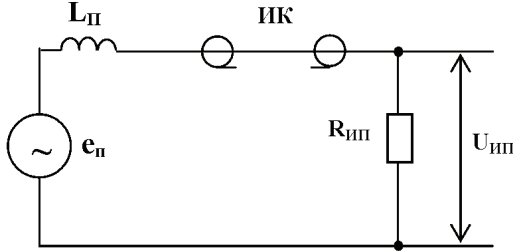


Рисунок 2 – Схема замещения ТС-А

$$e_{II}^{\max} = -\mu_0 \mu_r s w \frac{dH(t)}{dt}, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость ферритового кольца; s – площадь витка, м²; $w = 1$, количество витков; $H(t)$ – напряженность магнитного поля, пронизывающего виток.

Т.к. измеряются гармонические составляющие ЭТРП, то

$$H(t) = H_{\max} \cdot \sin \omega t. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) получим

$$e_{II}^{\max} = -\mu_0 \mu_r s w \omega H_{\max}. \quad (4)$$

Связь между H_{\max} и измеряемым током I_{PI} устанавливается законом полного тока, по которому

$$H_{\max} = \frac{I_{PI}^{\max}}{2\pi r_{cp}}, \quad (5)$$

где $2\pi r_{cp}$ – длина средней силовой линии магнитного поля в ферритовом кольце. Подставляя (5) в (4) получим окончательное выражение для

$$e_{II}^{\max} = \frac{-\mu_0 \mu_r s w \omega I_{PI}^{\max}}{2\pi r_{cp}} = K_{III} \cdot \omega \cdot I_{PI}^{\max}, \quad (6)$$

где $K_{III} = \frac{-\mu_0 \mu_r s w}{2\pi r_{cp}}$ (предварительно считаем, что $\mu_r = \text{const}$).

Т.к. нас интересует напряжение на входе измерительного прибора U_{III} , то для нахождения его связи с e_{II} , а следовательно и с I_{PI}^{\max} , необходимо про-

анализировать схему по рис. 2. Анализ этой схемы показывает, что

$$U_{III}^{\max} = I_{III}^{\max} \cdot R_{III} = \frac{e_{II}^{\max}}{\omega L_{II} + R_{III}} = K_{III} \frac{\omega}{1 + \frac{\omega L_{II}}{R_{III}}} \cdot I_{PI}^{\max}. \quad (7)$$

На практике связь между U_{III}^{\max} и I_{PI}^{\max} определяется экспериментально при калибровке ТС-А [4]. Для этого по проводнику пропускают одинаковый ток во всем частотном диапазоне, измеряя при этом напряжение с выхода ТС-А. А затем по формуле

$$K_K(\partial Б) = I_K(\partial Б) - U_{III}(\partial Б), \quad (8)$$

определяем $K_K(\partial Б)$ и строим его зависимость от частоты (рис. 3).

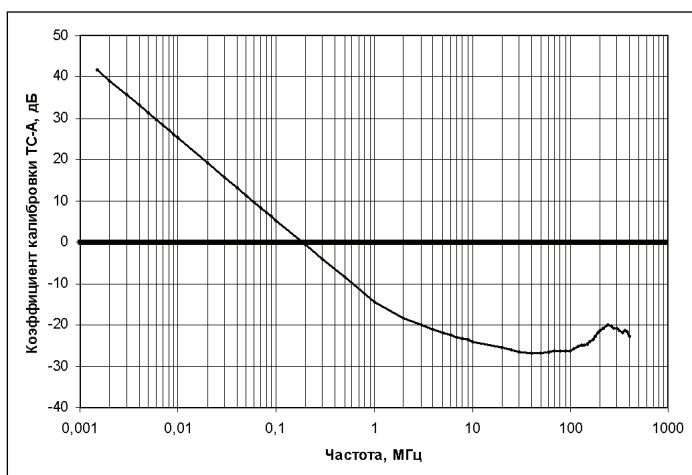


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента калибровки токосъемника ТС-А от частоты

В ИЛ НИПКИ «Молния» применяются два метода измерения ЭТРП. При первом методе ЭТРП измеряется с помощью измерительного приемника. Это достаточно длительная задача (она может длиться до 30-40 мин.), т.к. после измерения пиков ЭТРП в виде напряжений с выхода ТС-А, необходимо провести дополнительные математические расчеты. На практике же Заказчик работ требует быстрого экспресс-анализа своих ЭТРП. Эта задача была решена вторым методом, а именно, применением для измерения ЭТРП анализатора спектра FSL3, который позволил в течение 30 секунд визуально сравнивать ЭТРП с нормами на них и сразу определять, имеется ли превышение ЭТРП.

Для этого на экран FSL3 путем его программирования выводятся нормы

на ЭТРП в виде красной линии.

Но одновременно с этим потребовалась и доработка имеющегося ТС-А. Это объясняется тем, что в низкочастотной области ТС-А имеет малую чувствительность, что не позволяет из-за достаточно больших собственных шумов измерять слабые ЭТРП в этой области. Поэтому для того, чтобы в соответствии с требованиями нормативных документов собственные шумы были, как минимум, на 6 дБ ниже измеряемых напряжений, на тот же сердечник ТС-А было дополнительно намотано 10 витков провода, что позволило резко увеличить чувствительность нового измерителя (он назван ТС-А-Н) в низкочастотной области.

Кроме того, для упрощения и большей легитимности полученных результатов, измерение ЭТРП было заменено измерением U_{III}^{\max} с последующим сравнением их с нормами на эти напряжения, используя формулу

$$U_{III}^{\text{норм}}(\text{дБ}) = I_{PI}^{\text{норм}}(\text{дБ}) - K_K(\text{дБ}), \quad (9)$$

где $I_{PI}^{\text{норм}}(\text{дБ})$ – нормы на ЭТРП из рис. 1; $K_K(\text{дБ})$ – коэффициент калибровки ТС-А по рис. 3.

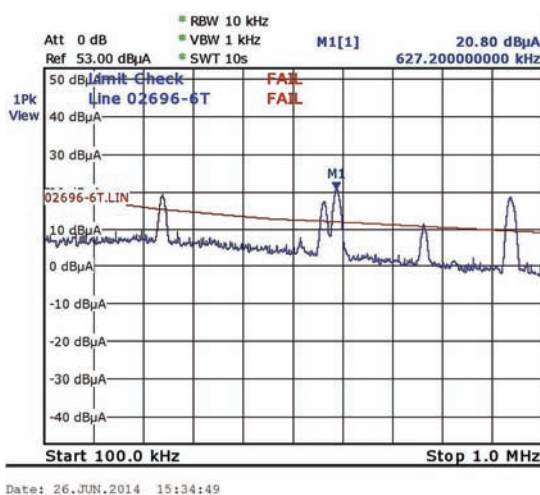


Рисунок 4 – Спектрограмма ЭТРП в проводах питания одного из испытанных изделий в диапазоне частот от 100 кГц до 1 МГц

Это переформатирование проведено с целью сравнения двух величин одинаковой размерности. Для этого из статической линии ЭТРП на ряде промежуточных частот были вычтены $K_K(\text{дБ})$, и FSL3 был перепрограммирован на статическую кривую зависимости $U_{III}^{\text{норм}}$ от частоты. Кроме того, для более

удобного анализа полученных результатов и меньшей зависимости $U_{\text{ПП}}^{\text{норм}}$ от частоты, весь требуемый частотный диапазон был разбит на поддиапазоны (по 1 декаде на поддиапазон).

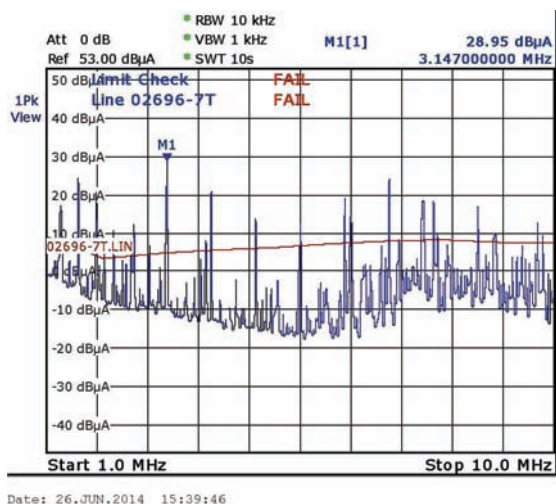


Рисунок 5 – Спектрограмма ЭТРП в проводах питания одного из испытанных изделий в диапазоне частот от 1 МГц до 10 МГц

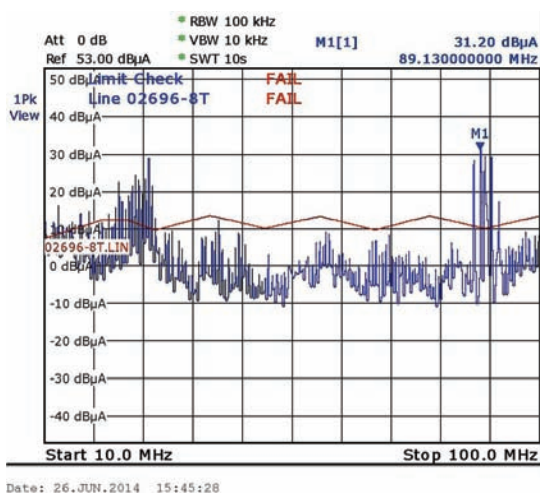


Рисунок 6 – Спектрограмма ЭТРП в проводах питания одного из испытанных изделий в диапазоне частот от 10 МГц до 100 МГц (превышение уровня ЭМП на частотах свыше 90 МГц объясняется наводкой от мощных FM радиостанций)

Получаемые при этом результаты показали несомненные преимущества этого метода измерения ЭТРП (рис. 4 -6).

Для более подробного выяснения всех частот, на которых ЭТРП превышает нормы, курсором FSL3 устанавливаются все максимумы ЭТРП, которые и заносятся в протокол испытаний для принятия последующих мер по помехоподавлению ЭТРП.

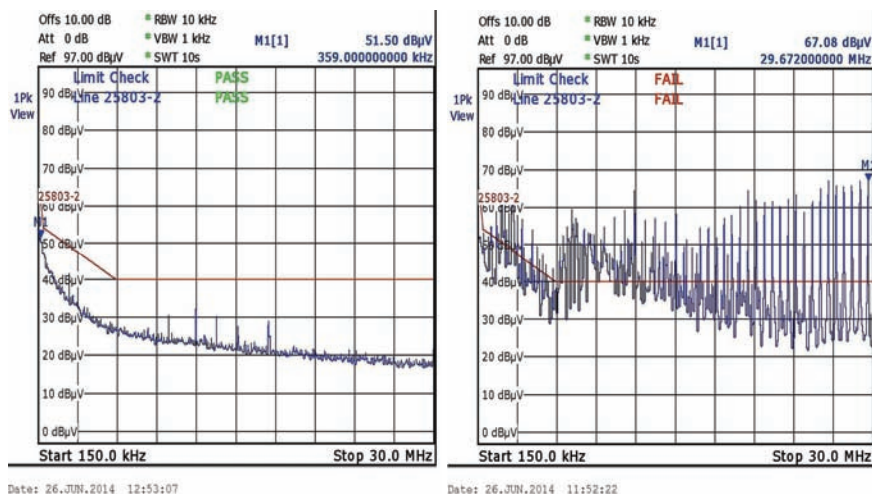


Рисунок 7 – Спектрограмма квазипиковых напряжений радиопомех в проводах питания в диапазоне частот от 150 кГц до 30 МГц: *а* – изделие выключено; *б* – изделие включено

Закключение. Приведенные выше данные о методике автоматизированного измерения ЭТРП при помощи ТС-А позволяют сделать заключение о возможности реализации всех действующих в Украине стандартов по измерению токов радиопомех.

Список литературы: 1. KT-160D Квалификационные требования. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. (Внешние воздействующие факторы – ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 21.0 Излучение радиочастотной энергии. 2. ОСТ В1 02696-90 Оборудование бортовое. Общие требования на допустимые уровни создаваемых электромагнитных помех и методы их измерений. 3. Токосъемник типа ТС-А. Паспорт. ТС-000.000.000 ПС. 4. Немченко Ю.С. Измерение эмиссии токов радиопомех от бортового авиационного оборудования // Вестник НТУ «ХПИ» «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2014. – № 21. – С. 96-107.

Bibliography (transliterated): 1. KT-160D Kvalifikacionnye trebovanija. Uslovija jekspluatacii i okružhajushhej sredy dlja bortovogo aviacionnogo oborudovanija. (Vneshnie vozdejstvujushhie faktory – VVF). Trebovanija, normy i metody ispytaniy. Razdel 21.0 Izluchenie radiochastotnoj jenergii. Print. 2. OST V1 02696-90 Oborudovanie bortovoe. Obshhie trebovanija na dopustimye urovni sozdavaemyh

jelektromagnitnyh pomeh i metody ih izmerenij. Print. 3. Tokos#emnik tipa TS-A. Pasport. TS-000.000.000 PS. Print. 4. Nemchenko Ju.S. Izmerenie jemiisii tokov radiopomoh ot bortovogo avia-cionnogo oborudovanija // Vestnik NTU «HPI» «Tehnika i jelektrofizika vysokih naprjazhenij». 2014. № 21. S.96-107. Print.

Поступила (received) 03.10.2014

УДК 621.317.3

Вимірювання струму кондуктивних радіоперешкод / Ю.С.Немченко, Н.Д. Животов, А.І. Сарасв, Т.Н. Островерх // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 115-121. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-0740.

Описано сучасну методику вимірювання емісії струму радіозавад від бортового авіаційно-го обладнання за допомогою струмоз'ємника ТС-А, створеного та прокаліброваного у Випробувальній лабораторії НДІПКІ «Молнія». Ця методика дозволяє швидко і ефективно визначити: чи виконуються у випробовуваному виробі вимоги по емісії струмів радіозавад за усіма чинними в Україні нормативними документами у повному обсязі. Вимоги стандарту ДСТУ ІЕС 61000-4-6: 2007 є обов'язковими до виконання в Україні.

Ключові слова: емісія струму радіозавад, струмоз'ємник, бортове авіаційне обладнання.

УДК 621.317.3

Измерение тока кондуктивных радиопомех / Ю.С.Немченко, Н.Д. Животов, А.И. Сараев, Т.Н. Островерх // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 115-121. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-0740.

Описана современная методика измерения эмиссии тока радиопомех от бортового авиационного оборудования с помощью токосъемника ТС-А, созданного и прокалиброванного в Испытательной лаборатории НИПКИ «Молния». Эта методика позволяет быстро и эффективно определить: выполняются ли в испытываемом изделии требования по эмиссии токов радиопомех по всем действующим в Украине нормативным документам в полном объеме. Требования стандарта ДСТУ ІЕС 61000-4-6:2007 являются обязательными к выполнению в Украине.

Ключевые слова: эмиссия тока радиопомех, токосъемник, бортовое авиационное оборудование.

Measuring of emission of current of radio interferences / Y.S.Nemchenko, N.D.Zhyvotov, A.I.Saraev, T.N.Ostroverkh // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – С. 115-121. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

Modern methodology of measuring of emission of current of radio interferences is described from the on-board aircraft equipment by means of current monitoring transformer TS-A, created and calibrated in the Test laboratory of Research & Design Institute «Molniya». This methodology allows quickly and effectively to define: whether executed in the tested good of requirement on emission of currents of radio interferences on all operating in Ukraine normative documents in full. The standard requirements of DSTU ІЕС 61000-4-6: 2007 are required to perform in Ukraine.

Keywords: emission of current of radio interferences, current monitoring transformer, on-board aircraft equipment.