

dr. Pod red. G.S.Kuchinskogo. – SPb.: Energoatomizdat, Sankt-Peterburgskoe otdelenie, 2003. – 608. 5. Tehnika I elektrofizyka vysokih naprug : navch. posibnyk Brggezitskij V.O., Isakova A.V., Rudakov V.V. ta in. Tha red. V.O. Brggezitskogo ta V.M.Myhajlova. – H.: NTU «HPI» – Tornado, 2005. – 930. 6. Gguravlev S. P. Vlijanie termoaktivatsionogo vzaimodejstvija na elektrofizicheskie harakteristiki komponentov izoljatsii polipropilenovyh kondensatorov promyshlenoj chasty:dis. kand. teh. nauk:05.09.02 Gguravlev Sergej Petrovich.

Надійшла (received) 18.03.2014

УДК 621.317.3

Ю.С.НЕМЧЕНКО, гл. метролог, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;

ИЗМЕРЕНИЕ ЭМИССИИ ТОКОВ РАДИОПОМЕХ ОТ БОРТОВОГО АВИАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

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 реализовать требования к измерению таких токов по всем действующим в Украине нормативным документам в полном объеме.

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

Работающее бортовое авиационное оборудование (БАО) генерирует и излучает радиопомехи как в «эфир», так и в отходящие от БАО линии электропитания, линии связи и т.д. Этот процесс называется эмиссией, а радиопомехи в проводниках – кондуктивными. Радиопомехи, попадая внутрь других БАО, вызывают у них или сбои, или даже отказы. Поэтому эмиссию радиопомех всех видов нормируют. Одним из важнейших видов эмиссии радиопомех являются токи радиопомех (ЭТРП) в отходящих от БАО проводниках, т.к. нормы на эти токи присутствуют во всех действующих в Украине стандартах, в отличие других видов радиопомех.

Ниже приведены нормы на ЭТРП (нормы – это предельно допустимые значения радиопомех) для БАО, располагаемых на военных самолетах (ОСТ В1 02696-90 [1] и Нормы ГКРЧ 11А-84 [2]) и на гражданских самолетах (КТ-160D [3] – аналог американского стандарта DO-160 D, уже несколько лет действующего в Украине).

Как видно из этих графиков ЭТРП как по амплитуде, так и по диапазону частот перекрывают несколько порядков:

– по частоте от 1,5 кГц до 100 МГц;

© Ю.С.Немченко, 2014

– по амплитуде от 20 дБ мкА (10 мкА) до 118 дБ мкА (0,8 А).

Поэтому измерение ЭТРП является сложной инженерной задачей.

В Испытательной лаборатории (ИЛ) НИПКИ «Молния» для измерения ЭТРП применяется токосъемник типа ТС-А (рис. 5).

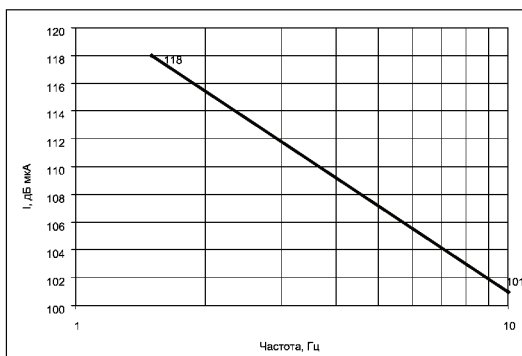


Рисунок 1 – Нормы эмиссии кондуктивных токов радиопомех от БАО в диапазоне частот от 1,5 до 10 кГц (Нормы ГКРЧ 11А-84)

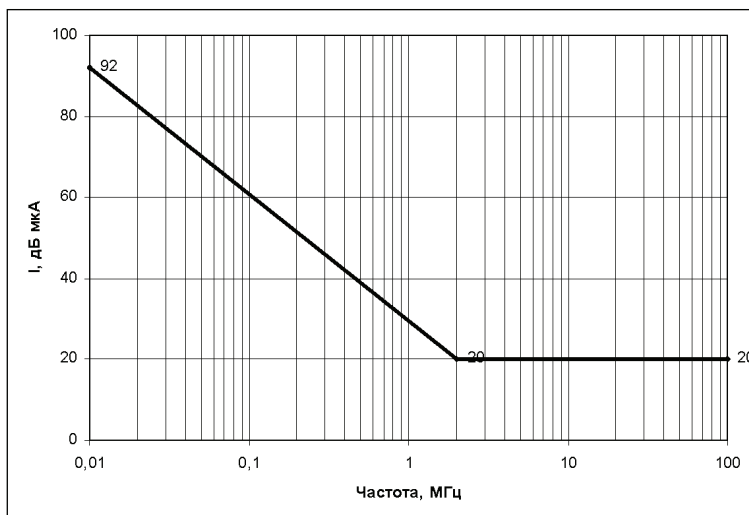


Рисунок 2 – Нормы эмиссии кондуктивных токов радиопомех от БАО в диапазоне частот от 10 кГц до 100 МГц (ОСТ В1 02696-90)

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 изме-

рениях 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.

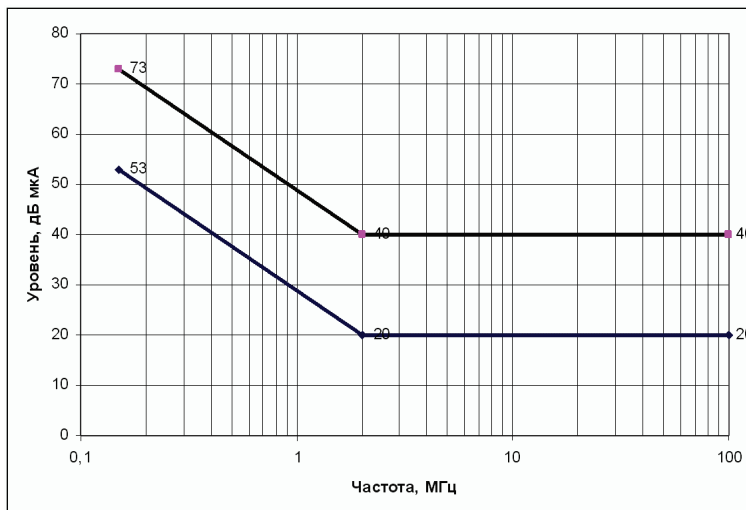


Рисунок 3 – Нормы эмиссии кондуктивных токов радиопомех от БАО (линии электропитания) в диапазоне частот от 150 кГц до 100 МГц (КТ-160D)

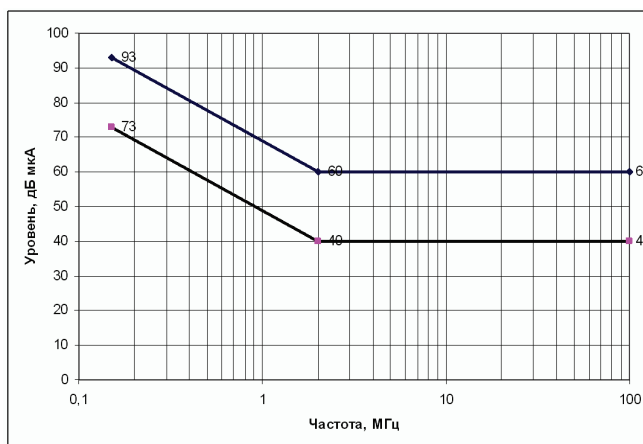


Рисунок 4 – Нормы эмиссии кондуктивных токов радиопомех от БАО (линии связи) в диапазоне частот от 150 кГц до 100 МГц (КТ-160D)

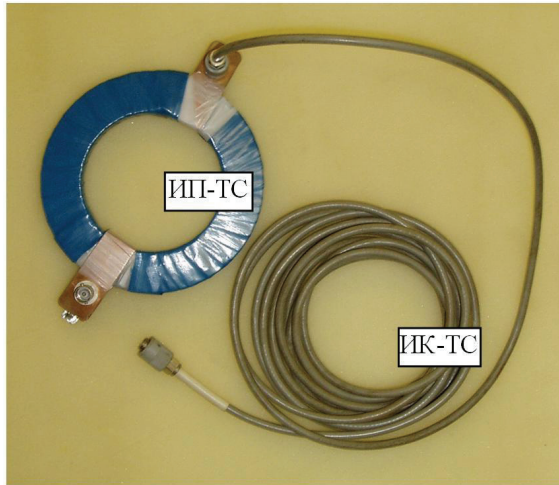


Рисунок 5 – Общий вид ТС-А

Упрощенная схема замещения ТС-А приведена на рис. 6, 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.

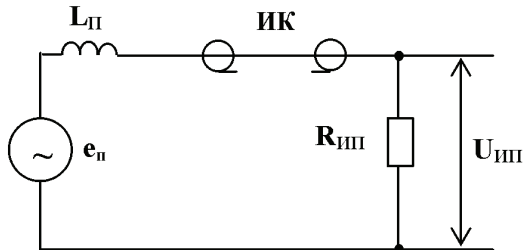


Рисунок 6 – Схема замещения ТС-А

$$e_{II}^{max} = -\mu_0 \mu_r s w \frac{dH(t)}{dt}, \quad (1)$$

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.

Так как измеряются гармонические составляющие ЭТРП, то

$$H(t) = H_{max} \cdot \sin \omega t. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) получим

$$e_{II}^{max} = -\mu_0 \mu_r s w \omega H_{max}. \quad (3)$$

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

$$H_{max} = \frac{I_{PI}^{max}}{2\pi r_{cp}}, \quad (4)$$

где $2\pi r_{cp}$ – длина средней силовой линии магнитного поля в ферритовом кольце. Подставляя (4) в (3) получим окончательное выражение для

$$e_{II}^{max} = \frac{-\mu_0 \mu_r S \omega I_{PI}^{max}}{2\pi r_{cp}} = K_{III} \cdot \omega \cdot I_{PI}^{max}, \quad (5)$$

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

Так как 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 проанализировать схему по рисунку 6. Анализ этой схемы показывает, что

$$U_{III}^{max} = I_{III}^{max} \cdot R_{III} = \frac{e_{II}^{max}}{\omega L_{II} + R_{III}} \cdot R_{III} = K_{III} \frac{\omega}{1 + \frac{\omega L_{II}}{R_{III}}} \cdot I_{PI}^{max}. \quad (6)$$

Данное уравнение (6) имеет три частных решения.

Решение № 1 имеет место при $\omega L_{II} \ll R_{III}$, то есть в низкочастотной области АЧХ ТС-А. В этом случае

$$U_{III}^{max} = K_{III} \cdot \omega \cdot I_{PI}^{max}, \quad (7)$$

то есть напряжение на выходе измерительного приемника прямо пропорционально частоте измеряемого тока.

Решение № 2 имеет место при $\omega L_{II} \gg R_{III}$, то есть в высокочастотной области АЧХ ТС-А. В этом случае

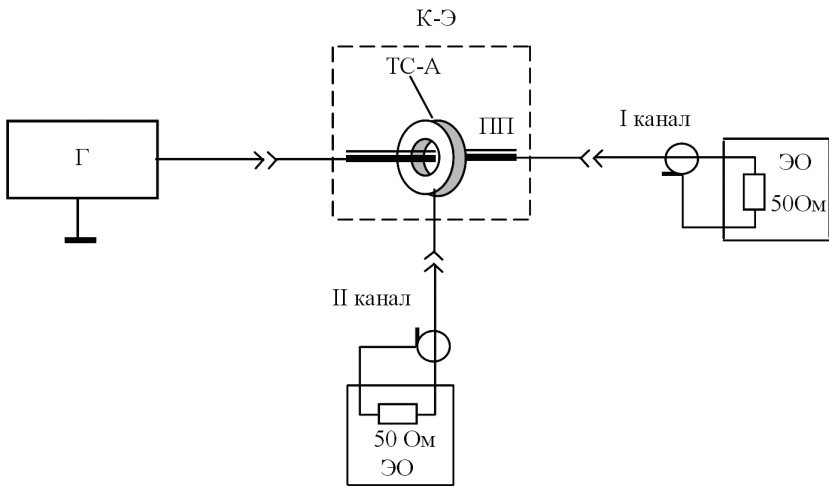
$$U_{III}^{max} = K_{III} \frac{1}{\frac{L_{II}}{R_{III}}} \cdot I_{PI}^{max}, \quad (8)$$

то есть напряжение на выходе измерительного приемника пропорционально величине измеряемого тока (данный режим работы называется самоинтегрирующим с постоянной интегрирования $T_{II} = \frac{L_{II}}{R_{III}}$).

Решение № 3 имеет место при $\omega_1 L_{II} < R_{III} < \omega_2 L_{II}$, то есть в такой области АЧХ ТС-А, где ω_1 лежит в верхней части области частот по решению № 1, а ω_2 – в нижней части по решению № 2. В этом случае напряжение на входе измерительного приемника имеет более сложный вид, чем решения № 1 и № 2.

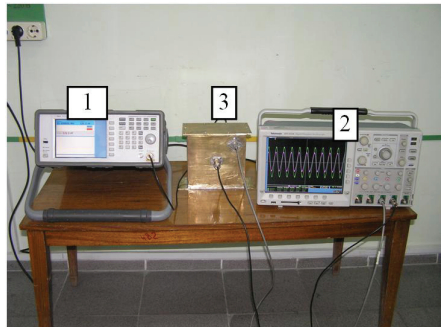
Так как коэффициент K_{III} рассчитать сложно, то его определение произ-

водится практически путем калибровки ТС-А. Схема калибровки ТС-А приведена на рис. 7, а рабочее место – на рис. 8.



- Г – высокочастотный генератор Agilent 9310A;
- ПП – прямолинейный проводник
- ИП-ТС – измерительный преобразователь токосъемника;
- ИК-ТС – измерительный кабель токосъемника;
- К-Э – корпус-экран;
- 50 Ом – входное сопротивление осциллографа;
- ЭО – осциллограф ТЕКТРОНИХ DPO 4104

Рисунок 7 – Схема калибровки токосъемника при определении его АЧХ



- 1 – высокочастотный генератор Agilent 9310A;
- 2 – осциллограф ТЕКТРОНИХ DPO 4104;
- 3 – корпус-экран К-Э с размещенными в нем прямолинейным проводником и измерительным преобразователем ИП-ТС

Рисунок 8 – Рабочее место при калибровке ТС-А

Методика калибровки заключается в следующем:

1. Прямолинейный проводник (ПП) подключается с одной стороны к высокочастотному генератору Г, а с другой стороны – к осциллографу со входным сопротивлением $R_{ПП} = 50 \text{ Ом}$.

2. Измерительный преобразователь ИП-ТС одевается на ПП, а его выход – подключается к осциллографу. ИП ТС-А заключается в металлический корпус-экран (КЭ) для исключения влияния на результаты калибровки внешних электромагнитных полей и ориентации измерительного кабеля относительно «земли» (в области высоких частот больше 10 МГц).

3. По каналу 1 осциллографа при помощи генератора Г устанавливаем нижнюю частоту 1,5 кГц и величину 500 мВ (это соответствует калибровочному току $I_K = 10 \text{ мА} = 80 \text{ дБ мкА}$).

4. По каналу 2 осциллографа, подключенному к выходу ИП-ТС, регистрируем $U_{ИП}$ в милливольтках, которое затем переводим в децибелы.

5. Рассчитываем коэффициент калибровки ТС-А по формуле:

$$K_K(\text{дБ}) = I_K(\text{дБ}) - U_{ИП}(\text{дБ}). \quad (9)$$

6. Перестраивая частоту генератора от 1,5 кГц до 100 МГц и поддерживая постоянным значение $I_K(\text{дБ}) = 80 \text{ дБ}$, замеряем напряжение $U_{ИП}(\text{дБ})$ на выходе ТС-А (рис. 9).

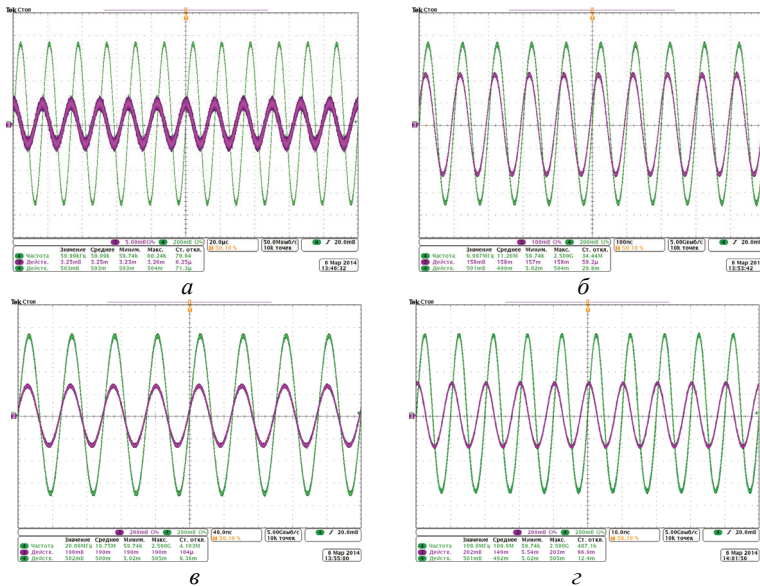


Рисунок 9 – Типовые осциллограммы калибровочного тока (большая синусоида) и напряжение на выходе ТС-А (меньшая синусоида) на различных калибровочных частотах: а – $F = 60 \text{ кГц}$; б – $F = 10 \text{ МГц}$; в – $F = 20 \text{ МГц}$; г – $F = 100 \text{ МГц}$

7. По результатам измерений строим АЧХ ТС-А, то есть значение K_K (дБ) от частоты (рис. 10).

Из рис. 10 видно, что в диапазоне частот от 1,5 кГц до 1 МГц напряжение на выходе ТС-А имеет значение по решению № 1; в диапазоне частот от 20 МГц до 100 МГц напряжение на выходе ТС-А имеет значение по решению № 2; а в диапазоне частот от 1 МГц до 2 МГц напряжение на выходе ТС-А имеет значение по решению № 3.

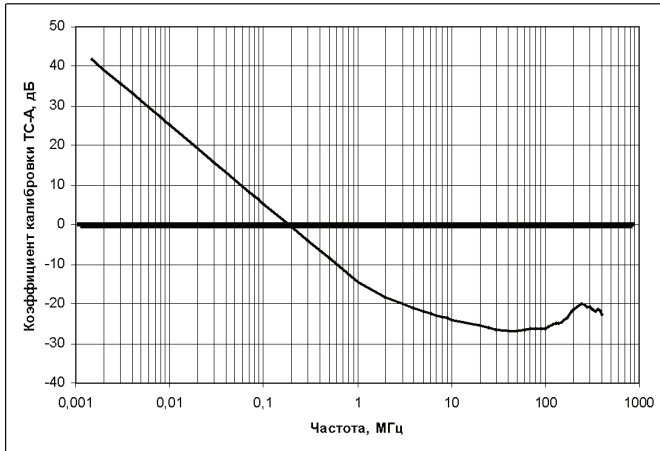


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента калибровки токосъемника ТС-А от частоты

Методика измерения ЭТРП. Измерение ЭТРП производится традиционным способом по следующей методике (рис. 11).

1. ИП-ТС одевается на проводник, отходящий от БАО (это или проводник электропитания, или линия связи по стандарту КТ-160D, или межблочные линии связи, включающие в себя все проводники, отходящие от БАО по стандарту ОСТ В1 02696-90).

2. К выходу ИП-ТС подключается измерительный приемник SMV-11 в диапазоне частот от 10 кГц до 30 МГц или SMV-8,5 в диапазоне частот от

3. 30 МГц до 100 МГц. В диапазоне частот от 1,5 кГц до 10 кГц применяется селективный нановольтметр Unipan 237.

4. Плавно перестраивая частоту измерительного приемника по его стрелочному прибору находим всплески ЭТРП при включенном БАО (при отключенном БАО выясняем это ЭТРП от БАО или это «фон»).

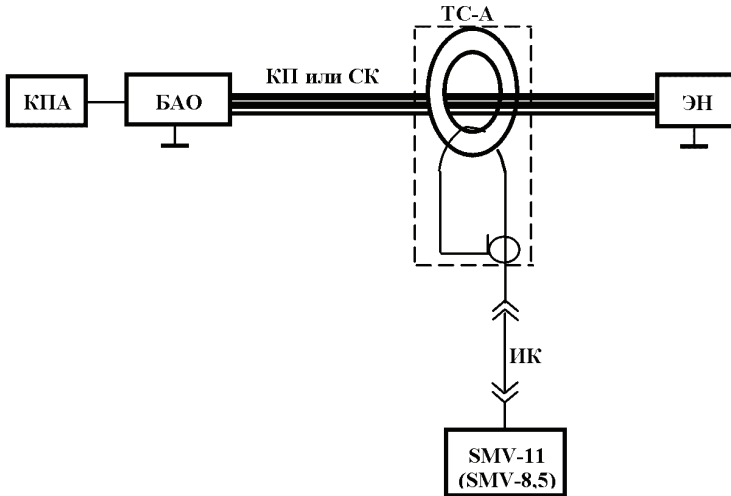
5. Результаты измерения всех всплесков заносим в протокол испытаний, после чего рассчитываем токи ЭТРП по формуле:

$$I_K(\text{дБ}) = U_{\text{ИП}}(\text{дБ}) + K_K(\text{дБ}). \quad (10)$$

6. Полученные результаты сравниваем с нормами по рис. 1 – 4 (в зависимости от вида БАО) и отмечаем все частоты, на которых эти нормы пре-

вышаются.

С недавнего времени в ИЛ НИПКИ «Молния» появился анализатор спектра FSL3, который позволяет автоматически перестраивать частоту измерения, и тем самым получать наглядную спектрограмму напряжения радиопомех с одновременным нанесением норм на радиопомехи на экране анализатора спектра. Курсорами анализатора можно определить в численном выражении как частоты, так и величины напряжений, превышающих нормы.



ЭН – эквивалент нагрузки;

КП – кабель питания БАО;

СК – соединительный кабель БАО;

ТС-А – токосъемник;

SMV-11 и SMV-8,5 – селективные микровольтметры;

КПА – контрольно-проверочная аппаратура

Рисунок 11 – Схема измерения тока радиопомех, создаваемого БАО в цепях электропитания и соединительном кабеле

Обычно в мировой практике анализатор спектра применяется совместно с эквивалентом сети для измерения эмиссии напряжения радиопомех. Это объясняется тем, что коэффициент калибровки эквивалента сети величина постоянная, не зависящая от частоты измерения. Поэтому для получения реальной картины достаточно из норм на эмиссию напряжения радиопомех вычесть этот коэффициент и сравнить полученные значения с реальным напряжением (рис. 12).

Однако применить этот метод для измерения токов непросто, так как для ТС-А (рис. 10) коэффициент калибровки зависит от частоты и поэтому сложно вычесть его из норм на ЭТРП во всем частотном диапазоне. Тем не менее, в ИЛ НИПКИ «Молния» была проведена работа по использованию

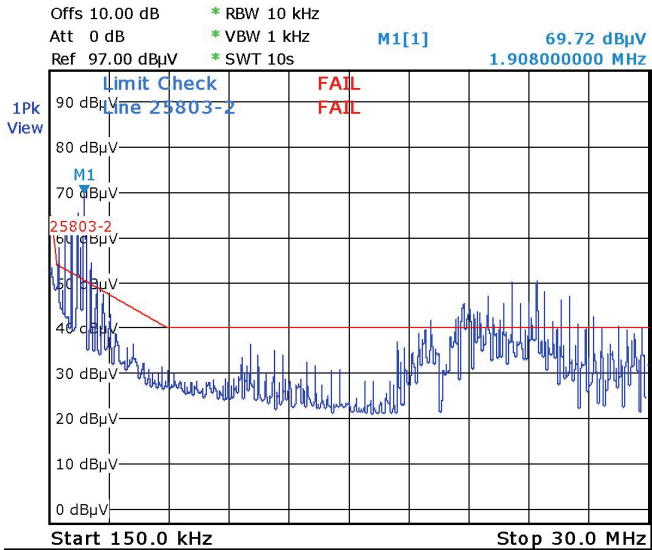


Рисунок 12 – Спектрограмма квазипиковых напряжений радиопомех в цепи электропитания



Рисунок 13 – Рабочее место при измерении эмиссии тока радиопомех

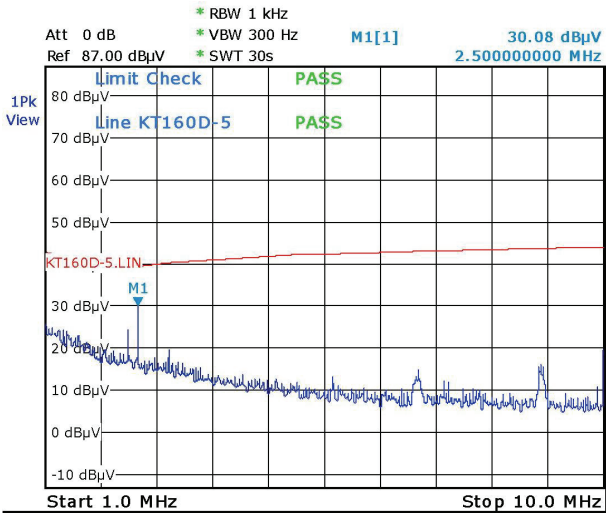


Рисунок 14 – Спектрограмма эмиссии тока радиопомех в линиях электропитания (изделие включено) в диапазоне частот от 1 до 10 МГц

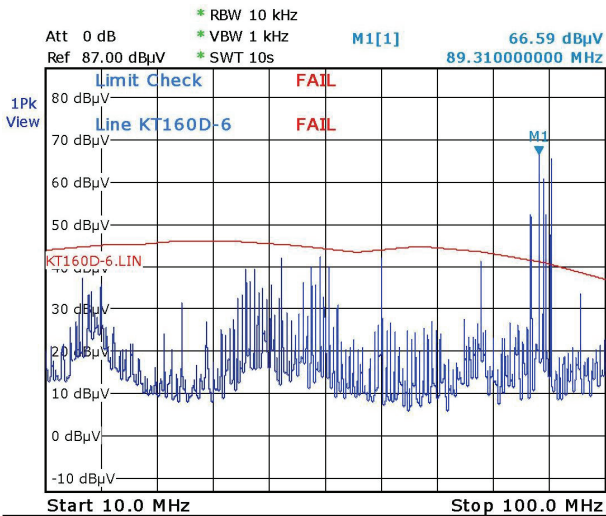


Рисунок 15 – Спектрограмма эмиссии тока радиопомех в линиях электропитания (изделие включено) в диапазоне частот от 10 до 100 МГц

анализатора спектра для измерения ЭТРП. Для этого были проделаны следующие работы:

- вместо норм ИТРП были получены нормы на напряжения с выхода ТС-А $U_{III}^{норм}(\delta Б)$ исходя из формулы:

$$U_{III}^{норм}(\delta Б) = I_{РП}^{норм}(\delta Б) - K_K(\delta Б), \quad (11)$$

где $I_{РП}^{норм}(\delta Б)$ – нормы на ЭТРП из рис. 2-4;

$K_K(\delta Б)$ – коэффициент калибровки ТС-А по рис. 10.

- весь диапазон частот измерения ЭТРП (10 кГц – 100 МГц) был разбит на 4 фрагмента (10 кГц – 100 кГц; 100 кГц – 1 МГц; 1 МГц – 10 МГц; – 10 МГц – 100 МГц), что позволило минимизировать нелинейность $U_{III}^{норм}(\delta Б)$ от частоты, а также увеличить точность измерения ЭТРП.

На рис. 13 приведено рабочее место измерения ЭТРП с применением анализатора спектра, а на рис. 14 - 15 приведены полученные по новому методу спектрограммы ЭТРП от одного из испытываемых БАО, которые позволили быстро и квалифицированно сделать заключение о соответствии БАО нормам на ЭТРП.

Выводы. Приведенные выше данные о методике автоматизированного измерения ЭТРП при помощи ТС-А позволяют сделать заключение о возможности реализации требований по измерению эмиссии токов радиопомех по всем действующим в Украине стандартам.

Список литературы: 1. ОСТ В1 02696-90 Оборудование бортовое. Общие требования на допустимые уровни создаваемых электромагнитных помех и методы их измерений. 2. Нормы ГКРЧ 11А-84 Общесоюзные нормы допускаемых промышленных радиопомех. Оборудование и объекты военного назначения. Нормы и методы испытаний. 3. КТ-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.

Bibliography (transliterated): 1. OST V1 02696-90 Oborudovanie bortovoe. Obshhie trebovanija na dopustimye urovni sozdavaemyh jelektromagnitnyh pomeh i metody ih izmerenij. 2. Normy GKRC h 11A-84 Obshhesojuznye normy dopuskaemyh industrial'nyh radiopomeh. Oborudovanie i ob#ekty voennogo naznachenija. Normy i metody ispytanij. 3. KT-160D Kvalifikacionnye trebovanija. Uslovjia jekspluatacii i okružhajushhej sredy dlja bortovogo aviacionnogo oborudovanija. (Vnesh-nie vozdejs tvujushhie faktory - VVF). Trebovanija, normy i metody ispytanij. Razdel 21.0 Izluchenie radiochastotnoj jenergii.

Поступила (received) 11.03.2014