



УДК 621.396.6

Г. А. Грошев, А. В. Масаль

## МЕТОДИКА АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ РАДИОПОМЕХ

105

*Предложен подход к анализу электромагнитной безопасности радиоэлектронных средств, основанный на частотно-ограниченных моделях характеристики спектральной плотности мощности источника помех и характеристики частотной избирательности приемника помех. Для комплексной оценки электромагнитной безопасности предлагается интегральный критерий, включающий в себя энергетический критерий и критерий блокирования. Энергетический критерий учитывает вклад отдельных излучений источников помех в совокупный сигнал взаимных помех, а также приращение мощности продуктов интермодуляции, обусловленных эффектом интермодуляции в приемнике помех. Критерий блокирования учитывает совокупность парциальных коэффициентов блокирования от отдельных источников помех.*

*The approach to the analysis of electromagnetic safety of radio electronic means based on is frequency the limited models of the characteristic of spectral density of power of a source of handicaps and characteristic frequency selectivity receptor of handicaps is offered. For a complete rating of electromagnetic safety the integrated criterion including power criterion and criterion of blocking is offered. The power criterion takes into account the contribution of separate radiations of sources of handicaps to total power of handicaps, and also contribution of power of products intermodulation, caused by effect intermodulation in receptor of handicaps. The criterion of blocking takes into account the contribution of partial of factors of blocking from separate sources of handicaps.*

**Ключевые слова:** частотный анализ помех, энергетическая оценка помех, эффект блокирования, эффект интермодуляции, допустимый уровень мощности помех.

**Key words:** frequency the analysis of handicaps, power rating of handicaps, effect of blocking, effect of intermodulation, allowable level of power of handicaps.

Радиоэлектронные средства (РЭС) всегда функционируют в условиях реальной электромагнитной обстановки (ЭМО). ЭМО — это совокупность электромагнитных процессов в определенной области пространства (рис. 1). Среди источников искусственных непреднамеренных радиопомех (НРП) особое место занимают радиопередающие устройства (далее источники помех (ИП)), обуславливающие внутрисистемные и межсистемные НРП.

Одним из ключевых свойств РЭС, определяющих эффективность, является электромагнитная безопасность. Электромагнитная безопасность РЭС при воздействии НРП — это свойство, характеризующее допустимое снижение качества функционирования, при котором РЭС способно выполнять требуемую функцию. Безопасное функциониро-

вание РЭС зависит от ЭМО, уровней НРП от различных ИП и помехоустойчивости радиоприемного устройства (далее рецептора помех (РП)), на которое воздействуют ИП.

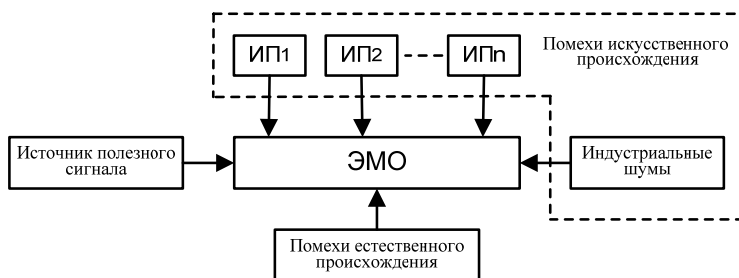


Рис. 1. Формирование ЭМО излучаемыми НРП

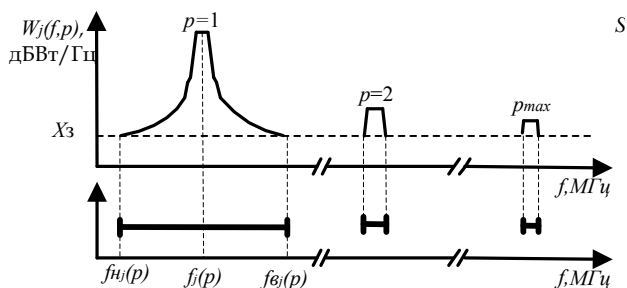
С целью оценки электромагнитной безопасности возникает задача определения на выходе РП отношения уровня сигнала к уровню совокупного сигнала взаимных помех (с/п), определяющего качество функционирования РЭС. Необходимо учитывать приращение мощности помех на выходе РП от основного излучения (ОИ), внеполосного (ВИ) или побочных излучений ИП, проникающих через основной канал приема (ОКП), соседний (СКП) либо побочные каналы приема (ПКП) РП, а также воздействие излучений, не соответствующих частотам ОКП и ПКП, на входную часть РП (усилитель радиочастоты, смеситель).

В качестве РП рассматривается радиоприемник супергетеродинного типа. Суммарная мощность помех, поступающая от  $j$ -го ИП на РП по всем каналам проникновения помех (КПП), определяется как:

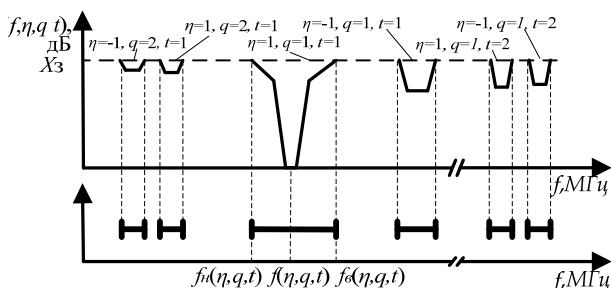
$$P_{\Sigma j} = \int_0^{\infty} (W_j(f) + Lc\beta_j(f) - S(f)) df, \quad (1)$$

где  $W_j$  – характеристика спектральной плотности мощности  $j$ -го ИП дБВт/Гц;  $Lc\beta_j$  – параметр связи между  $j$ -м РПД и РП, дБ;  $S(f)$  – характеристика частотной избирательности РП, дБ. Для решения выражения (1) используются частотно-ограниченные модели характеристик РЭС [1]. Частотно-ограниченная модель характеристики ИП (ЧОМ ИП) – это модель огибающей характеристики спектральной плотности мощности ОИ с учетом ВИ и ПИ на гармониках, ограниченная на заданном уровне  $X_3$ . На рисунке 2, а и б представлены ЧОМ ИП и частотная модель ИП (ЧМ ИП) соответственно.

ЧМ ИП – проекция на ось частоты участка ограничительной линии  $X_3$ , заключенного между точками пересечения с огибающей СПМ  $p$ -го излучения. Параметр  $p$  учитывает максимальный номер гармоники  $p$ -го ПИ, относительный уровень  $a_{ПИ}(p)$  которого не ниже уровня  $X_3$ :  $a_{ПИ}(p) > X_3$ . ЧМ ИП имеет параметры: центральную частоту  $f_j(p)$ , граничные частоты  $f_{Hj}(p)$ ,  $f_{Bj}(p)$  и ширину полосы частот  $B_j(p)$ .



а



б

Рис. 2. Частотно-ограниченные характеристики РЭС

Характеристика СПМ  $W_j(f, p)$   $p$ -го излучения имеет место в пределах граничных частот  $f_{Hj}(p)$  и  $f_{Bj}(p)$ :

$$\begin{cases} p = 1, \dots, p_{\max}, \\ f_j(p), f_{Hj}(p), f_{Bj}(p), B_j(p), \\ W_j(f, p), f \in [f_{Hj}(p), f_{Bj}(p)]. \end{cases} \quad (2)$$

Частотно-ограниченная модель характеристики РП (ЧОМ РП) — это модель огибающей характеристики частотной избирательности ОКП с учетом СКП и ПКП, образованных параметрами  $\eta, q, t$ , ограниченная на заданном уровне  $X_3$  ( $= 1, -1$  при суммарном, либо разностном преобразовании частоты гетеродина и сигнала в смесителе,  $q$ -гармоника входного сигнала, которая образуется при воздействии на РП,  $t$ -номер гармоники гетеродина). На рисунке 2в и 2г представлены ЧОМ РП и частотная модель РП (ЧМ РП) соответственно. ЧМ РП получается аналогично ЧМ ИП. Параметры  $q_{\max}$  и  $t_{\max}$  учитывают максимальный номер ПКП, до которого уровень относительной избирательности по ПКП  $b_{\text{пкп}}(\eta, q, t)$  меньше уровня заданной ограничительной линии  $X_3$ , дБ:  $b_{\text{пкп}}(\eta, q, t) < X_3$ . ЧМ РП имеет параметры: граничные частоты и ширину полосы частот  $B(\eta, q, t)$  на уровне  $X_3$ . ХЧИ  $S(f, \eta, q, t)$  имеет место в пределах граничных частот  $f_H(\eta, q, t)$  и  $f_B(\eta, q, t)$ :



$$\begin{cases} \eta = 1, -1, q = 1, \dots, q_{\text{max}}, t = 1, \dots, t_{\text{max}}, \\ f(\eta, q, t), f_{\text{H}}(\eta, q, t), f_{\text{B}}(\eta, q, t), B(\eta, q, t), \\ S(f, \eta, q, t), f \in [f_{\text{H}}(\eta, q, t), f_{\text{B}}(\eta, q, t)]. \end{cases} \quad (3)$$

В [2] представлены разработанные и реализованные в программной среде алгоритмы моделирования частотно-ограниченных характеристик ИП и РП, позволяющие получить все необходимые параметры (2) и (3). Характеристика частотной избирательности РП определяется в области линейного режима работы радиоприемника. Статистические данные для относительного уровня избирательности по ПКП, определенные экспериментально либо из [3], учитывают влияние избирательных свойств входной цепи (ВЦ), амплитудной характеристики усилителя высокой частоты (УВЧ). Для оценки степени блокирования и эквивалентного уровня интермодуляционной помехи в РП следует определить мощность помех на входе УВЧ с учетом избирательных свойств ВЦ. Таким образом, для оценки нелинейных эффектов в РП необходимо иметь модель характеристики частотной избирательности ВЦ. Частотная модель ВЦ определяет граничные частоты ВЦ  $f_{\text{ВЦн}}, f_{\text{ВЦв}}$  на уровне  $X_3$ , в пределах которых имеет место ХЧИ ВЦ  $S_{\text{ВЦ}}$ :

$$\begin{cases} f_{\text{ВЦн}}, f_{\text{ВЦв}}, B_{\text{ВЦ}}, \\ S_{\text{ВЦ}}(f), f \in [f_{\text{ВЦн}}, f_{\text{ВЦв}}]. \end{cases} \quad (4)$$

На основе моделей характеристик РЭС (2), (3) и (4) предлагается методика анализа электромагнитной безопасности РЭС. Методика основана на трехэтапной схеме анализа (рис. 3):

- 1) частотный анализ помех (ЧАП);
- 2) пространственный анализ помех (ПАП);
- 3) энергетическая оценка помех (ЭОП).

Для суммарной мощности помех от  $j$ -го ИП, воздействующей на РП через все  $k_{\text{max}}$  каналы проникновения помех (КПП), выражение (1) можно записать в виде

$$P_{\Sigma j} = \sum_{k=1}^{k_{\text{max}}} \int_{f_{\text{H}j}(k)}^{f_{\text{B}j}(k)} \left( W_j [f, p(k)] + L_{\text{св}j}(f(k), R_j) - S[f, \eta(k), q(k), t(k)] \right) df, \quad (5)$$

где  $k_{\text{max}}$  – количество КПП;  $f_{\text{H}j}, f_{\text{B}j}$  – нижняя и верхняя граничные частоты  $k$ -го КПП соответственно;  $p(k)$  – номер ПИ, соответствующего  $k$ -му КПП;  $W_j$  – огибающая характеристики спектральной плотности мощности  $p$ -го излучения  $j$ -го ИП в пределах  $k$ -го КПП;  $L_{\text{св}j}$  – параметр связи между  $j$ -м ИП и РП в пределах  $k$ -го КПП;  $\eta(k)$  – суммарное, либо разностное преобразование,  $q(k)$  – номер гармоники помехи, возникающей при воздействии на РП,  $t(k)$  – номер гармоники гетеродина РП, соответствующей  $k$ -му КПП;  $S$  – огибающая характеристики частотной избирательности РП в пределах  $k$ -го КПП.

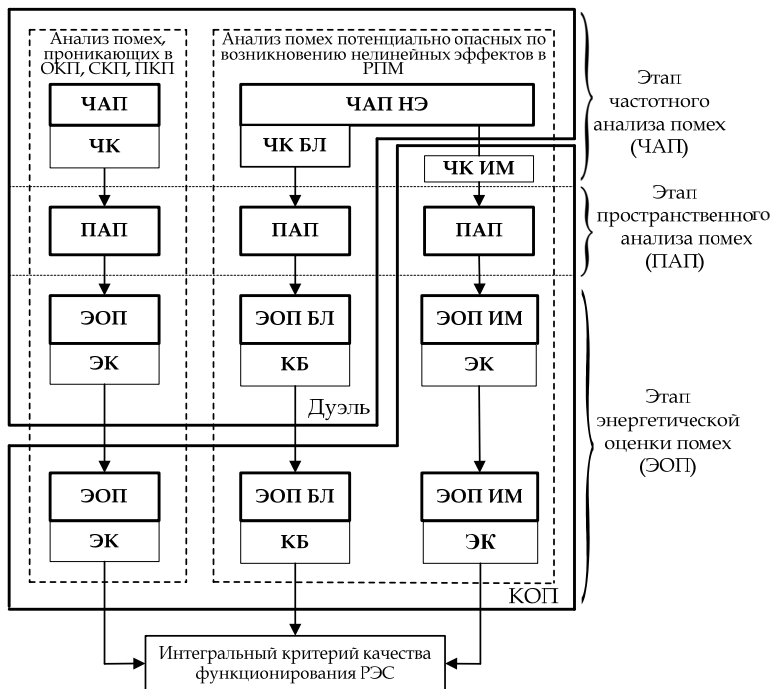


Рис. 3. Схема анализа электромагнитной безопасности РЭС

На этапе ЧАП осуществляется отбор помех по частотному критерию (ЧК) попадания ОИ, ВИ и ПИ в ОКП, СКП и ПКП и определение частотных параметров КПП. Для этого на этапе ЧАП производится моделирование характеристик ЧОМ ИП, ЧОМ РП и определение параметров частотных моделей ЧМ ИП и ЧМ РП (3), (4) соответственно.

Для выявления наличия КПП используется частотный критерий:

$$|f_j(p) - f(\eta, q, t)| < (B_j(p) - B(\eta, q, t)) / 2. \tag{6}$$

Частотный критерий (6) позволяет оценить излучения ИП (ОИ, ВИ или ПИ на  $p$ -х гармониках) и каналы приема. При условии выполнения (6) определяются граничные частоты КПП:

$$f_{Hj}(k) = \begin{cases} f_{Hj}(p(k)), & f_{Hj}(p(k)) \geq f_H(\eta(k), q(k), t(k)), \\ f_H(\eta(k), q(k), t(k)), & f_{Hj}(p(k)) < f_H(\eta(k), q(k), t(k)), \end{cases} \tag{7}$$

$$f_{Bj}(k) = \begin{cases} f_{Bj}(p(k)), & f_{Bj}(p(k)) \leq f_B(\eta(k), q(k), t(k)), \\ f_B(\eta(k), q(k), t(k)), & f_{Bj}(p(k)) > f_B(\eta(k), q(k), t(k)), \end{cases} \tag{8}$$

Выражения (7) и (8) позволяют учесть все возможные случаи взаимного расположения частотных моделей излучений ИП и частотных моделей каналов приема РП относительно друг друга. В результате проверки ЧК и определения параметров КПП получаем граничные частоты и ширины полосы частот для каждого  $k$ -го КПП:



$$\begin{cases} k = 1, \dots, k_{\max}, \\ f_j(k), f_{H_j}(k), f_{B_j}(k), B_j(k). \end{cases} \quad (9)$$

Алгоритм проверки ЧК (6) и расчета параметров КПП (7), (8) и (9) представлены в [2]. На этапе ПАП определяется параметр связи между антеннами ИП и РП с учетом направленных свойств антенн и условий распространения радиоволн:

$$L_{\alpha_j}(f) = G_j(\varphi_j, \theta_j, f) + G(\varphi, \theta, f) + K_{\text{п}} - K_{\Phi_j}(f) - K_{\Phi}(f) - L_j(R_j, f),$$

где  $G_j$  и  $G$  – коэффициенты усиления трехмерных диаграмм направленности антенн  $j$ -го ИП и РП в направлении друг на друга ( $\varphi_j, \varphi, \theta_j, \theta$  – азимуты и углы места ДНА  $j$ -го ИП и  $i$ -го РП в направлении друг на друга);  $K_{\text{п}}$  – коэффициент поляризационных потерь;  $K_{\Phi_j}, K_{\Phi}$  – коэффициенты потерь в фидерах  $j$ -го ИП и РП;  $L_j$  – потери на трассе между  $j$ -м ИП и РП;  $R_j$  – расстояние между  $j$ -м ИП и РП. Значение  $L_{\alpha_j}$  определяется в пределах  $k$ -го КПП только для его средней частоты  $f_j(k) = [f_{H_j}(k) + f_{B_j}(k)]/2$ .

На этапе ЭОП определяются мощности помех, проникающих на выход РП через определенные КПП (9), и выявляются наиболее опасные ИП. ЭОП основана на выражении (5), в котором каждое подынтегральное выражение  $k$ -го КПП вычисляется численным методом прямоугольников:

$$P_j(k) = \Delta h(k) \sum_{s=0}^{l-1} W_j^s(f(s, k)),$$

где  $\Delta h(k) = [f_{B_j}(k) - f_{H_j}(k)]/l$  – шаг расчета значений мощности в пределах  $k$ -го КПП;  $l$  – количество шагов;  $W_j(f(s, k))$  – СПМ в  $k$ -м КПП для  $s$ -го интервала,  $0 \leq s \leq l-1$ . СПМ в  $k$ -м КПП для  $s$ -го интервала определяется (рис. 4):

$$W_j(f(s, k)) = 10 \left\{ \frac{W_{\text{mj}} - W_j[f(s, k) + h(k)/2, p(k)] - S[f(s, k) + h(k)/2, \eta(k), q(k), t(k)] + L_{\alpha_j}[R_j, f_j(k)]}{10} \right\},$$

где  $W_{\text{mj}} = 10 \lg(0,99 P_0 / B_{99})$  – максимальное значение СПМ  $j$ -го ИП;  $P_0$  – пиковое значение мощности ИП, поступающей в фидер;  $B_{99}$  – полоса частот, в пределах которой сосредоточено 99 % мощности излучения;  $W_j[f(s, k) + h(k)/2, p(k)]$  – нормированное значение СПМ  $p$ -го излучения соответствующего  $k$ -му КПП, рассчитанное для  $s$ -го интервала;  $S[f(s, k) + h(k)/2, \eta(k), q(k), t(k)]$  – нормированная ХЧИ канала приема, образованного параметрами  $\eta, q, t$ , соответствующая  $k$ -му КПП и рассчитанная для  $s$ -го интервала;  $L_{\alpha_j}[R_j, f_j(k)]$  – значение параметра связи между антеннами  $j$ -го ИП и  $i$ -го РП на средней частоте  $k$ -го КПП. Суммарная мощность по всем КПП от  $j$ -го ИП равна



$$P_{\Sigma_j} = \sum_{k=1}^{k_{\max}} P_j(k).$$

Для отбора наиболее опасных помех используется энергетический критерий (ЭК) для отдельного излучения и совокупности излучений  $j$ -го ИП соответственно:

$$P_j(k) \leq P_{\text{п доп.}}, \quad P_{\Sigma_j} \leq P_{\text{п доп.}}, \tag{10}$$

где  $P_{\text{п доп.}} = P_{\text{ср}} - A$  — допустимый уровень помехи в совмещенном канале. Первым на этапе частотного анализа нелинейных эффектов (ЧАП НЭ) используется частотный критерий блокирования (ЧК БЛ):

$$\begin{cases} f_j(p) \neq f(\eta, q, t), \\ f_j(p) \in [f_{\text{ВЦн}}, f_{\text{ВЦб}}]. \end{cases} \tag{11}$$

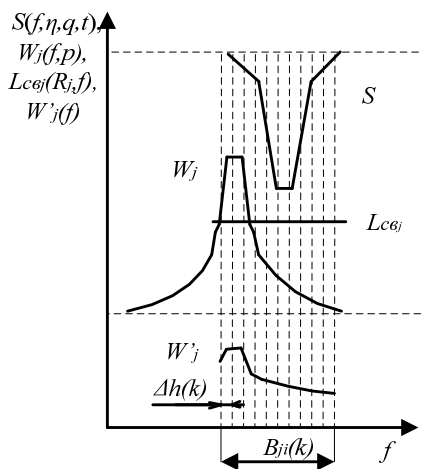


Рис. 4. Определение спектральной плотности мощности на выходе РП

Степень блокирования РП характеризуется коэффициентом блокирования

$$K_{\text{бл } j} = \frac{K_{\text{бл доп}} P_j^i / 10}{10^{S_{\text{вц доп}}(\Delta f) / 10} 10^{P_{\text{мин}} / 10} 10^{D_{\text{бл}} / 10}},$$

где  $K_{\text{бл доп}}$  — допустимый коэффициент блокирования РП;  $P_j^i$  — мощность помехи на входе УВЧ, определяется на этапе энергетической оценки помех блокирования (ЭОП БЛ):

$$P_{\text{НЭ } j} = \int_{\Delta f_{\text{НЭ } j}} (W_j(f, p) + Lc\beta_j(f, R_j) - S_{\text{ВЦ}_i}(f)) df;$$

$S_{\text{вц доп}}$  — избирательность ВЦ РП при расстройке  $\Delta f$  относительно частоты настройки РПМ, при которой уровень мощности блокирующей помехи равен допустимому значению, дБ;  $P_{\text{мин}}$  — чувствительность РПМ, дБВт;



$D_{\text{бл}}$  — динамический диапазон РПМ по блокированию, дБ;  
 $\Delta f_{\text{НЭ}j} = f_{\text{НЭН}j} - f_{\text{НЭВ}j}$  — ширина полосы частот, в котором помеха проходит через ВЦ на вход усилителя радиочастоты. Для отбора помех, вызывающих эффект блокирования, используется критерий блокирования (КБ):

$$K_{\text{бл}j} \leq K_{\text{бл доп}}. \quad (12)$$

После перебора всех дуэльных ситуаций осуществляется комплексная оценка помех (КОП). Суммарная мощность от всех  $j$ , отобранных на этапе ЧАП, ИП, включая те из них, которые удовлетворяют выполнению критериев (10), определяется как

$$P_{\Sigma} = \sum_j P_{\Sigma j}.$$

Коэффициент блокирования от совокупности  $K$ , отобранных на этапе ЧАП НЭ, ИП, включая те из них, которые удовлетворяют выполнению критерия (12), вычисляются по формуле

$$K_{\text{бл}} \cong \sum_K K_{\text{бл}j}.$$

Для отбора помех интермодуляции совместно с частотными условиями (11) необходимо выполнение частотного критерия интермодуляции (ЧК ИМ):

$$f_{\text{Н}}(\eta, q, t) < f_{\text{ИМ}q} < f_{\text{В}}(\eta, q, t),$$

где  $f_{\text{ИМ}q} = |mf_1 + nf_2|$  — частота  $q$ -го продукта интермодуляции  $N$ -го порядка;  $N = |m| + |n|$ ;  $m, n = \pm 1, 2, \dots$  Эквивалентный уровень  $q$ -й помехи интермодуляции равен:

$$P_{\text{ИМ}q} = |m|P_{\text{П1}} + |n|P_{\text{П2}} - K_{\text{ИМ}},$$

где  $K_{\text{ИМ}}$  — коэффициент взаимной модуляции РП, определяемый выражением  $K_{\text{ИМ}} = (N-1)P_s + N\sigma_{\text{ИМ}} + 3N + A$ . Здесь  $P_s$  — чувствительность РП;  $\sigma_{\text{ИМ}}$  — параметр двухсигнальной интермодуляционной избирательности;  $A$  — защитное отношение РП в совмещенном канале. Суммарная мощность  $Q$  продуктов интермодуляции, проникающих на выход РП, определяется формулой

$$P_{\text{ИМ}\Sigma} = \sum_{q=1}^Q P_{\text{ИМ}q}.$$

Для отбора и оценки степени воздействия помех интермодуляции используется энергетический критерий интермодуляции (ЭК ИМ) для  $q$ -й и совокупности  $q$ -х помех интермодуляции соответственно:

$$P_{\text{ИМ}q} \leq P_{\text{п доп}}, \quad P_{\text{ИМ}\Sigma} \leq P_{\text{п доп}}.$$

Заключительным этапом является проверка интегрального критерия безопасности функционирования, учитывающего суммарную мощность помех на выходе РП:

$$\begin{cases} P_{\Sigma} + P_{\text{ИМ}\Sigma} \leq P_{\text{п доп}}, \\ K_{\text{бл}\Sigma} \leq K_{\text{бл доп}}. \end{cases}$$





Невыполнение любого из системы критериев свидетельствует о нарушении функциональной безопасности РЭС.

Таким образом, предложена методика анализа электромагнитной безопасности, основанная на частотно-ограниченных моделях радиоэлектронных средств. Такой подход позволяет определить излучения ИП и каналы приема РП, образующих канал проникновения помехи (КПП), оценить энергетический вклад отдельного КПП в совокупный сигнал взаимных помех с учетом формы огибающей спектральной плотности мощности излучения и характеристики частотной избирательности канала приема, а также количественно оценить нелинейные эффекты блокирования и интермодуляции в РП.

### Список литературы

1. Грошев Г. А. Электромагнитная совместимость в группировке радиоэлектронных средств : учебное пособие / БГАРФ. Калининград, 2001.
2. Масаль А. В. Алгоритм спектрального метода анализа электромагнитной совместимости, основанный на частотно-ограниченных моделях радиоэлектронных средств // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2011. №6.
3. Уайт Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи / пер. с англ. ; под ред. А. И. Сапгира. М., 1977. Вып. 1.

### Об авторах

Георгий Александрович Грошев – канд. техн. наук, проф., Балтийская государственная академия, Калининград.

E-mail: amasal@mail.ru

Андрей Витольдович Масаль – асп., Балтийская государственная академия, Калининград.

E-mail: amasal@mail.ru

### About the authors

Dr Georgy Groshev – Prof., Baltic State Academy, Kaliningrad.

E-mail: amasal@mail.ru

Andrey Masal – PhD student, Baltic State Academy, Kaliningrad.

E-mail: amasal@mail.ru