

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Киндрук Николай Николаевич

магистрант кафедры проектирования информационно-компьютерных систем

УО «Белорусский государственный университет

информатики и радиоэлектроники»

(Республика Беларусь)

В рамках методики обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС) на основе полумарковского процесса предлагается разработка алгоритма оценки ЭМС РЭС, представленного в соответствии с рисунком 1, а также методе управления частотным ресурсом в качестве основы радиоэлектронной защиты (РЭЗ).

В соответствии с ГОСТ 30804.6.1-2013 в рамках полумарковского процесса РЭС при воздействии помех преднамеренного или непреднамеренного характера (далее – ПП и НП соответственно) должна соответствовать критерию качества функционирования А. Так, в период и после прекращения воздействия ПП или НП РЭС должно продолжать функционировать в соответствии с назначением. Не допускается ухудшение качества функционирования ПП или НП в сравнении с уровнем качества функционирования, установленным изготовителем применительно к использованию ТС в соответствии с назначением, или прекращение выполнения функции ТС. Минимальный уровень качества функционирования ТС может быть заменен допустимым ухудшением качества функционирования. Если минимальный уровень качества функционирования или допустимое ухудшение качества функционирования не установлены изготовителем, они могут быть определены на основе анализа

эксплуатационных и технических документов на ТС конкретных видов или исходя из результатов применения ТС в соответствии с назначением.

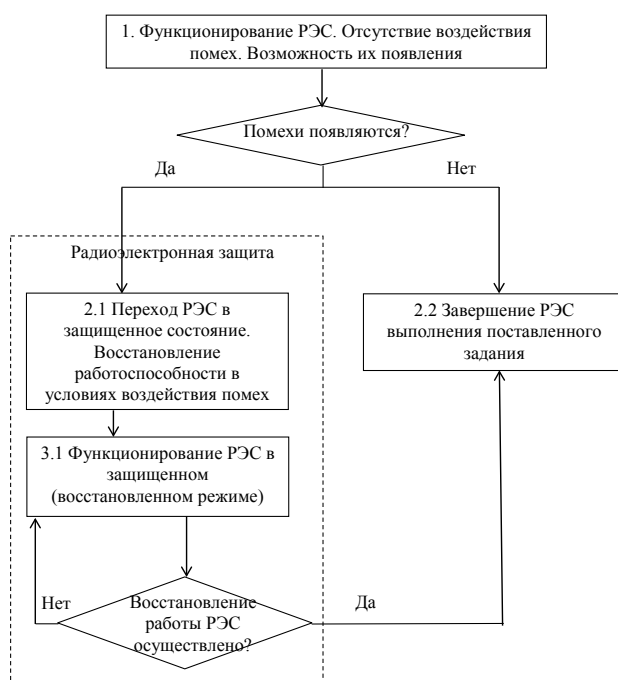


Рис.1. Алгоритм обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в рамках полумарковского процесса

Применительно к обеспечению ЭМС РЭС полумарковская система представляет собой следующую ситуацию: некоторая РЭС с заданной эффективностью функционирует на интервале времени $t_0 - t_1$, на котором предполагается отсутствие воздействия преднамеренных помех на РЭС.

Далее в момент наступления момента времени t_2 РЭС (в частности, его приемные тракты) подвергаются воздействию ПП или НП. Это происходит на временном интервале $t_1 - t_2$.

Так, с момента времени t_3 необходимо осуществления мероприятий по РЭС и обеспечения электромагнитной устойчивости (далее – ЭМУ) РЭС посредством управления его параметрами (их перестройка). Таким образом, на интервале времени $t_2 - t_3$ осуществляется радиоэлектронная защита. На данном отрезке времени осуществляется переход РЭС в защищенное состояние.

При этом осуществляется восстановление работоспособности в условиях воздействия помех.

Далее в результате РЭЗ на интервале времени $t_3 - t_4$ предполагается функционирование в защищенном (восстановленном) режиме. При полном восстановлении работы РЭС оно ведет к завершению устройством выполнения поставленного задания.

Представленным состояниям соответствуют определенные условные обозначения полумарковского процесса, которые будут использоваться далее. Данные условные обозначения представлены в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1. Условные обозначения состояния РЭС

Условные обозначения	Характеристика
1	2
Условные обозначения <i>состояния</i> полумарковского процесса функционирования РЭС в условиях воздействия помех	
e_1	РЭС не подвергается воздействию ПП и НП; их появление возможно
e_2	Переход РЭС в защищенное состояние с восстановлением работоспособности в условиях воздействия ПП и НП
e_3	РЭС функционирует в защищенном (восстановленном) режиме
e_4	РЭС завершает выполнение поставленного задания
Условные обозначения <i>вероятности состояния</i> полумарковского процесса функционирования РЭС в условиях воздействия помех	
$P_{12}(t)$	Вероятность при возникновении ПП и НП перехода РЭС в защищенное состояние с восстановлением его работоспособности
$P_{23}(t)$	Вероятность функционирования РЭС в защищенном (восстановленном) режиме
$P_{34}(t)$	Вероятность завершения выполнения РЭС поставленного задания под влиянием помех (при осуществлении РЭЗ)
$P_{14}(t)$	Вероятность завершения выполнения РЭС поставленного задания (без влияния помех)

Основой полумарковского процесса является определение вероятностей нахождения исследуемой системы во всех возможных состояниях. Процесс определения данных параметров системы предваряет построение графовой модели исследуемой системы, в рамках которого важным является учет всех существенных для решаемой задачи обеспечения ЭМС РЭС связи, выражаемые числом состояний и переходов в виде графа состояний и переходов [1, с. 39].

На основе представленного в соответствии с рисунком 1 алгоритма целесообразно построение графа, отражающего динамику состояний полумарковского процесса функционирования РЭС в условиях воздействия ПП и НП с возможностью РЭЗ посредством управления параметрами РЭС. Данная динамика представлена в соответствии с рисунком 2.

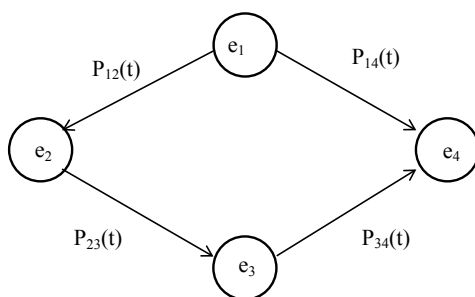


Рис.2. Полумарковский процесс функционирования радиоэлектронных средств при воздействии на его ПП и НП

Таким образом, нахождение полумарковского процесса в состоянии e_2 будет продолжаться по достижении требуемого уровня защищенности и полного восстановления работоспособности РЭС в условиях воздействия ПП и НП. После этого будет осуществлен переход полумарковского процесса в состояние e_3 . Длительность нахождения РЭС в данном состоянии (на протяжении временного интервала $t_3 - t_4$) будет определена решением поставленной задачи РЭС после восстановления ее работоспособности в рамках воздействия ПП и НП. После решения данной задачи полумарковский процесс перейдет в состояние e_4 .

В рамках разработки модели обеспечения ЭМС РЭС в условиях полумарковского процесса целесообразно формирования ряда элементов-систем, которые представлены в соответствии с рисунком 3.

Таким образом, одним из основных элементов модели обеспечения ЭМС РЭС является определение вероятностей выполнения задачи РЭС в условиях полумарковского процесса при возникновении ПП и НП.

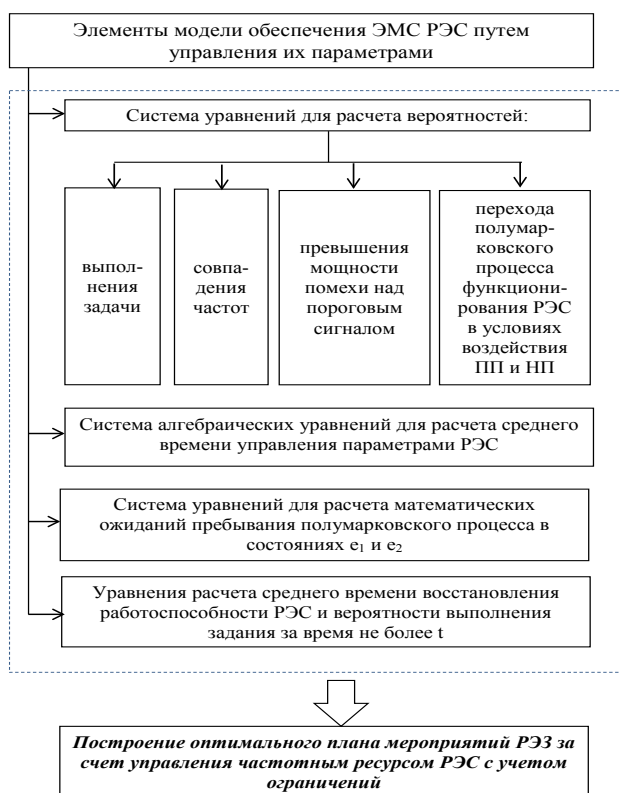


Рис.3. Элементы модели обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств

На основе исследований А. К. Гришко, Н. В. Горячева, Н. К. Юркова [2; 3] и др. может быть сформирована система функций распределения времени успешного завершения процесса с условием его начала в состоянии (1):

$$\begin{cases} \Psi_1(t) = \int_0^t \Psi_2(t-u) dP_{12}(u) + P_{14}(t), i = 1 \dots (n-1), \\ \Psi_2(t) = \int_0^t \Psi_3(t-u) dP_{23}(u), \\ \Psi_3(t) = P_{34}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\Psi_i(t)$ – функция распределения времени успешного завершения процесса с условием его начала в состоянии ($i = 1, 2, 3$); P_{ij} – вероятность перехода полумарковского процесса из состояния e_i в состояние e_j , при условии, что полумарковский процесс в состоянии e_j находился в течение времени t .

Данная система интегральных уравнений может быть решена посредством преобразования Лапласа численным или аналитическим способом относительно показателя $\Psi_i(t)$.

В результате применения данного преобразования может быть получено следующее:

1. Функция распределения времени успешной работы РЭС в условиях действия ПП и НП.
2. Значение вероятности выполнения поставленной задачи за период времени составит не более t .

РЭС в условиях радиоэлектронного противодействия в рамках рассматриваемой модели осуществляется посредством управления параметрами РЭС, ввиду чего необходимо определение средней величины времени, в течение которого управление параметрами РЭС будет происходить. Для этого может быть сформирована система алгебраических уравнений (2) [4; 5]:

$$\begin{cases} \tau_1 = \xi_1 + p_{12}\tau_2, \\ \tau_2 = \xi_2 + p_{23}\tau_3, \\ \tau_3 = \xi_3 \end{cases} \quad (2)$$

где τ_i – значение среднего времени успешного завершения процесса при условии начала данного процесса в состоянии e_i ($i = 1, 2, 3$); p_{ij} – значение вероятностей переходов из состояния e_i в состояние e_j ; ξ_i – значение

математического ожидания времени нахождения полумарковского процесса в состоянии e_i .

Среднее время успешной работы РЭС в условиях воздействия ПП и НП может быть осуществлено посредством решения данной системы относительно показателя численным или аналитическим способом.

Значения вероятностей перехода полумарковского процесса функционирования РЭС из состояния e_i в состояние e_j в условиях воздействия ПП и НП может быть рассчитаны посредством системы алгебраических уравнений, составленных на основе исследований [4; 5]:

$$\begin{cases} P_{12}(t) = [1 - (1 - \rho_f)] \int_0^t G_{\Pi}(u) dG_p(t), \\ P_{14}(t) = \int_0^t G_p(u) dG_{\Pi}(t) + (1 - \rho_f)(1 - \rho_p) \int_0^t \int_0^t G_{\Pi}(u) dG_s(t), \\ P_{23}(t) = G_B(t), \\ P_{34}(t) = G_p(t), \end{cases} \quad (3)$$

где G_p – функция распределения времени работы РЭС; G_{Π} – функция распределения времени до появления ПП или НП; G_B – функция распределения времени восстановления работоспособности РЭС в условиях действия ПП или НП; ρ_f – вероятность совпадения частот РЭС; ρ_p – вероятность превышения случайного значения мощности помехи.

Подстановка выражений (3) в систему интегральных выражений (1) позволяет решить ее и определить функцию распределения времени выполнения поставленной перед РЭС задачи $\Psi_i(t)$.

При $t = \infty$ из уравнений (3) получают значения вероятностей перехода:

$$\begin{cases} p_{12} = P_{12}(t = \infty), \\ p_{14} = 1 - p_{12}, \\ p_{23} = P_{23}(t = \infty) = 1. \end{cases} \quad (4)$$

Эти значения подставляются в систему алгебраических уравнений полумарковского процесса (2).

В системе (3) для расчета значений вероятностей перехода полумарковского процесса функционирования РЭС из состояния e_i в состояние e_j в условиях воздействия ПП и НП также фигурируют показатели вероятности совпадения частот РЭС (ρ_f) и показатель вероятности превышения случайного значения мощности помехи (ρ_p). Важность данных показателей обусловлен необходимостью дополнительно учитывать вероятность возможного совпадения частот РЭС и вероятность возможного превышения над пороговым сигналом мощности ПП и НП.

Важным элементов модели обеспечения ЭМС РЭС является определение значений математических ожиданий пребывания полумарковского процесса в состояниях e_1 и e_2 . Данные показатели рассчитываются в соответствии с системой (5), построенной на основе исследований [4; 5; 6]:

$$\begin{cases} \xi_1 = \int_0^{\infty} [1 - G_p][1 - G_{\Pi}]d(t), \\ \xi_2 = \int_0^{\infty} [1 - G_B]d(t), \\ \xi_3 = \int_0^{\infty} [1 - G_p]d(t), \end{cases} \quad (5)$$

где ξ_i – значение математического ожидания математических ожиданий пребывания полумарковского процесса в состояниях e_1 и e_2 ; G_p – функция распределения времени работы РЭС; G_{Π} – функция распределения времени до появления ПП или НП; G_B – функция распределения времени восстановления работоспособности РЭС в условиях действия ПП или НП.

Получаемые значения (5) также подставляются в систему алгебраических уравнений полумарковского процесса (2).

В рамках РЭС важными аспектами являются:

1. Максимально быстрое восстановление работоспособности РЭС.
2. Выполнения РЭС задания за время не более t .

Таким образом, важным является определение среднего времени восстановления работоспособности РЭС. Данный показатель может быть рассчитан в соответствии с формулой (6) [2; 5; 6]:

$$\tau_1 = \xi_1 + p_{12}(\xi_2 + \xi_3). \quad (6)$$

Данное уравнение (6) является результирующим выражением (относительно показателя τ_1) аналитического решения системы алгебраических уравнений с учетом равенства значения p_{23} (вероятность перехода полумарковского процесса из состояния e_2 в состояние e_3 ; формула 4) 1 (единице).

Следует отметить, что каждый определенный РЭС имеет конкретный алгоритм восстановления работоспособности при воздействии ПП или НП посредством управления параметрами его излучений. Также следует отметить ряд факторов, оказывающих влияние на значение случайного времени восстановления способности РЭС к дальнейшей работе, среди которых могут быть выделены электронные схемы РЭС и входные случайные параметры ПП или НП.

В рамках осуществления расчетов функция распределения случайного времени ($\Psi(t)$) должна быть аппроксимирована посредством нормального закона. При условии успешного выполнения задания РЭС функция распределения случайного времени $\Psi(t)$ может быть рассчитана в соответствии с формулой (7), которая была рассчитана на основе исследований [4-6]:

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} = \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(u-\tau_1)^2}{2\sigma^2}} d(u), \quad (7)$$

Показатель τ_1 рассчитывается в соответствии с формулой (7).

Таким образом, посредством представленных формул может быть оценена эффективность функционирования РЭС – вероятность успешного выполнения поставленного задания за время не более t .

Финальным этапом предлагаемого алгоритма РЭС и обеспечения ЭМС РЭС является формирование оптимального плана по управлению параметрами РЭС. На основе изучения методик, представленных в исследованиях [7] был выбран метод перебороч.

Данный выбор был сделан, ввиду того, что он является простейшим из методов поиска значений действительных функций по какому-либо из критериев сравнения, ввиду чего он может быть легко применен на практике.

Так, из множества различных способов, направленных на обеспечение ЭМС РЭС, будет осуществлен выбор таких, которые будут обеспечивать следующие показатели и ограничители системы: минимальный допустимый уровень помех ($\min \Delta$); интегральный логарифмический показатель уровня помех РЭС (Δ_{ij}); показатель ($P_{ij\text{нпп}}(t)$); показатель ($P_{ij\text{пп}}(t)$).

Показатель $\min \Delta$ рассчитывается в соответствии с формулой (8):

$$\min \Delta = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{S_i} \Delta_{ij} \delta_{ij}, \quad (8)$$

где Δ_{ij} – интегральный логарифмический показатель уровня помех РЭС (рассчитывается в соответствии с формулой (9)); δ_{ij} – способ изменения j -го параметра i -го РЭС; i – число РЭС; i – количество изменяемых параметров i -го РЭС.

$$\Delta_{ij} = \ln \left(P_{ij\text{нпп}}(t) P_{ij\text{пп}}(t) \right), \quad (9)$$

где $P_{ij\text{нпп}}(t)$ определяется в соответствии с формулой 7 (10); $P_{ij\text{пп}}(t)$ определяется в соответствии с формулой 8 (11).

$$P_{ij\text{НПП}}(t) = P \cdot \left(\left(\frac{P_c}{P_{\text{нНПП}}} \right) < K_{\text{нНПП}} \right) = \int_0^{K_{ij\text{нНПП}}} g \left(\frac{P_c}{P_{\text{нНПП}}} \right) d \frac{P_c}{P_{\text{нНПП}}}, \quad (10)$$

где $K_{\text{нНПП}}$ – коэффициент подавления НП; $g \left(\frac{P_c}{P_{\text{нНПП}}} \right)$ – значение плотности вероятности отношения мощности сигнала к НП; $d \frac{P_c}{P_{\text{нНПП}}}$ – интегральный логарифмический показатель уровня НП РЭС.

$$P_{ij\text{ПП}}(t) = P \cdot \left(\left(\frac{P_c}{P_{\text{нПП}}} \right) < K_{\text{нПП}} \right) = \int_0^{K_{ij\text{ПП}}} g \left(\frac{P_c}{P_{\text{нПП}}} \right) d \frac{P_c}{P_{\text{нПП}}}, \quad (11)$$

где $g \left(\frac{P_c}{P_{\text{нПП}}} \right)$ – значение плотности вероятности отношения мощности сигнала к ПП; $d \frac{P_c}{P_{\text{нПП}}}$ – интегральный логарифмический показатель уровня ПП РЭС; $K_{\text{нПП}}$ – коэффициент подавления ПП.

Также в рамках расчета показателей в соответствии с формулами (7)-(11) необходим учет определенных ограничений, представленных в соответствии с системой (12), представленных в соответствии с исследованиями [2; 4]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{S_i} C_i^k \delta_{ij} \leq \max C_i^k, k = \overline{1, \omega_i}, i = \overline{1, l}, \\ \sum_{i=1}^{S_i} C_i^k \delta_{ij} \leq \min C_i^k, \\ \sum_{i=1}^{S_i} \delta_{ij} = 1, i = \overline{1, l}, \end{cases} \quad (12)$$

где C_i^k – k -й параметр для i -го РЭС при использовании j -го способа обеспечения его функционирования; S_i – количество способов изменения параметров в i -м РЭС; l – количество РЭС, интегрированных в общий комплекс (систему); ω_i – количество параметров в i -м устройстве, которые учитываются в ограничениях; $\sum_{i=1}^{S_i} \delta_{ij} = 1$ – показывает для i -го устройства обязательное применение одного из S_i способов.

Предложенная комплексная модель позволит осуществлять планирование и управления частотного ресурса в целях уменьшения уровня помех для РЭС, влияющих на их работу.

Список использованных источников

1. Емелин, Н. М. Марковские и полумарковские модели сложных систем: преимущества и недостатки / Н. М. Емелин // Известия института инженерной физики. – 2019. – № 1 (51). – С. 39-41.
2. Гришко, А. К. Динамический анализ и синтез оптимальной системы управления радиоэлектронными средствами / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 141–147.
3. Гришко, А. К. Анализ математических моделей расчета электроакустических полей и дальности действия радиолокационных систем методом последовательного анализа / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 35, № 2-1. – С. 16.
4. Вентцель, Е. С. Теория вероятности / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 2005. – 576 с.
5. Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий. – СПб.: БХВПетербург, 2005. – 416 с.
6. Andreyev, P. The Temperature Influence on the Propagation Characteristics of the Signals in the Printed Conductors / P. Andreyev, A. Grishko, N. Yurkov // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science 2016, № 4 (18) (TCSET). – Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. – P. 376-378.
7. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, S. Brostilov, N. Yurkov // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering,

Telecommunications, and Computer Science (TCSET). – Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. – P. 214-218.