

EDN: GMAWWN

УДК 621.396

Analysis of the Processes of Formation of Contact Radio Interference in the Complex Provision of Electromagnetic Compatibility on Mobile Objects of Radioelectronic Means

Boris V. Utkin* and Nikolay N. Grachev
HSE University
Russian Federation, Moscow

Received 06.11.2024, received in revised form 24.11.2024, accepted 03.12.2024

Abstract. The following article presents an analysis of electromagnetic interference formation caused by the secondary electromagnetic re-emissions formed by radio electronic devices. Based on the results of the conducted research, a method for predicting the spectral characteristics of contact interference to a radio receiver is proposed. The methodology for predicting the spectral composition of contact radio interference is included in the research. The methodology and mathematical apparatus are based upon deterministic and probability models of the contact radio interference formation. The methodology presented in this paper make it possible to predict contact radio interference on mobile communication facilities under various operating conditions while taking design features into account. The analysis of the contact radio interference formation presented in the research paper makes it possible to ensure electromagnetic compatibility of transceiver radio electronic devices on mobile objects and ensure the efficiency of this type of devices.

Keywords: contact radio interference, forecasting, spectral characteristics, electromagnetic compatibility, mobile objects.

Citation: Utkin B. V., Grachev N. N. Analysis of the processes of formation of contact radio interference in the complex provision of electromagnetic compatibility on mobile objects of radioelectronic means. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(8), 1077–1088. EDN: GMAWWN



Анализ процессов образования контактных радиопомех при комплексном обеспечении электромагнитной совместимости на подвижных объектах радиоэлектронных средств

Б. В. Уткин, Н. Н. Грачёв
*НИУ «Высшая школа экономики»
Российская Федерация, Москва*

Аннотация. В представленной статье проведен анализ образования и механизмов формирования электромагнитных помех, обусловленных механизмами образования вторичных электромагнитных переизлучений, образующихся при эксплуатации реальных конструкций радиотехнических устройств. По результатам проведенных исследований предлагается методика прогнозирования спектральных характеристик контактных помех радиоприему. В работе рассмотрен и проведен анализ методики прогнозирования спектрального состава контактных радиопомех. В основу разработанной методики и математического аппарата положены детерминированные и вероятностные модели образования контактных радиопомех. Рассмотренные в работе предложения, основанные на детерминированных и вероятностных моделях образования контактных помех, дают возможность осуществлять прогнозирование контактных радиопомех на мобильных объектах связи при различных условиях эксплуатации, с учетом конструктивных особенностей. Представленные в работе результаты анализа механизмов образования контактных радиопомех направлены на обеспечение электромагнитной совместимости различных приёмопередающих устройств на мобильных объектах.

Ключевые слова: контактные радиопомехи, прогнозирование, спектральные характеристики, электромагнитная совместимость, подвижные объекты.

Цитирование: Уткин Б. В. Анализ процессов образования контактных радиопомех при комплексном обеспечении электромагнитной совместимости на подвижных объектах радиоэлектронных средств / Б. В. Уткин, Н. Н. Грачёв // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(8). С. 1077–1088. EDN: GMAWWN

Введение

Использование большого числа различных радиоприёмных и радиопередающих устройств, размещённых на подвижных объектах в ограниченной области пространства, приводит к возникновению актуальной проблемы по обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. В общем случае данная проблема обусловлена образованием электромагнитных помех различной природы и, в частности, за счет образования помех от токопроводящих элементов конструкций радиоэлектронной аппаратуры, работающей в условиях сложного характера воздействия механических факторов, которые имеют место в процессе эксплуатации аппаратуры. При этом большинство подвижных объектов, таких как плавающие средства, наземный транспорт и летательные аппараты, содержат значительное число различных контактных соединений, которые, находясь в движении, оказывают влияние на спектральный состав радиосигналов, определяемый на этапе проектирования за счет образования контактных радиопомех. Таким образом, в процессе переизлучения электромагнитного поля, источником которого являются составные части приёмного и передающего оборудования, мобильных металлических конструктивных элементов, содержащих контакт-

ные механические соединения, происходит образование контактных радиопомех широкого спектра, которые, попадая в приёмопередающее оборудование радиоэлектронных средств, существенно влияют на качество радиосвязи.

Для обеспечения электромагнитной совместимости с учётом указанных условий возникает необходимость в анализе механизмов образования контактных радиопомех, прогнозировании их уровня и спектрального состава.

В настоящее время вопросам, связанным с процессами образования контактных радиопомех, посвящён ряд работ [1–9]. В работах [1–4] представлены общие положения теории образования контактных радиопомех, а также исследование отдельных методов снижения влияния широкополосных контактных радиопомех на приёмопередающую аппаратуру подвижных объектов, в [5–6] приводится описание параметров конструкций контактирующих соединений, которые непосредственно являются причиной образования контактных помех, а в [7–13] рассмотрены методики расчёта параметров контактных соединений. Следует отметить, что в рассмотренных работах не представлено в достаточной мере обоснование методов прогнозирования контактных радиопомех и методик определения их излучаемых уровней и спектральных составов.

В [14] было показано, что при определенной компоновке приемного и передающего оборудования радиотехнических средств образование контактных помех в зоне функционирования приемных антенн может превышать номинальные уровни сигналов, оговариваемых в технических условиях. В связи с этим основная цель представленной статьи заключается в прогнозировании уровней контактных помех радиоприёму и разработке методик по оценке их уровней с использованием детерминированных и вероятностных моделей образования контактных помех радиоприёму.

1. Процесс образования контактных радиопомех на подвижных объектах радиоэлектронных средств

Рассмотрим процесс образования контактных помех радиоприёму на примере радиотехнической системы связи, расположенной на мобильном объекте. Структурная схема формирования контактных радиопомех представлена на рис. 1.

Анализ представленной схемы показывает, что сигнал, излучённый передающей антенной, попадает в антенну приёмника и облучает подвижные токопроводящие конструктивные элементы конструкций, содержащих контактные соединения. В результате происходит переизлучение данного сигнала элементами конструкции. В случае если рассматриваемые элементы конструкции расположены на подвижных объектах, происходит модуляция переизлучаемого электромагнитного поля за счёт движения элементов конструкций или вибраций контактных соединений. Переизлучённое таким образом электромагнитное поле будет иметь более широкий спектральный состав по сравнению с облучающим полем [1–3]. Данное явление обусловлено формированием в переизлучаемом электромагнитном поле широкополосных контактных радиопомех.

Таким образом, приёмная антенна принимает два вида сигналов: прямой сигнал от передающей антенны и переизлучённый подвижным контактным соединением с широкополосными контактными радиопомехами.

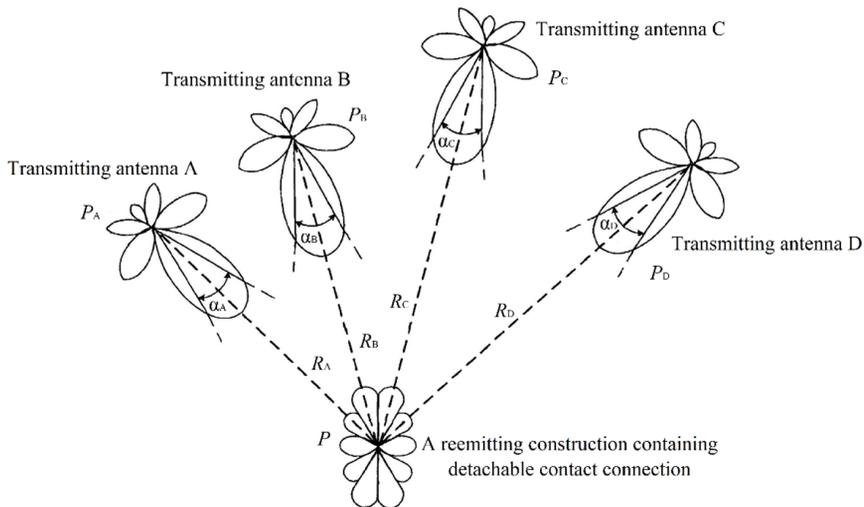


Рис. 1. Схема представления механизма формирования контактных радиопомех

Fig. 1. The scheme of representation of the mechanism of formation of contact radio interference

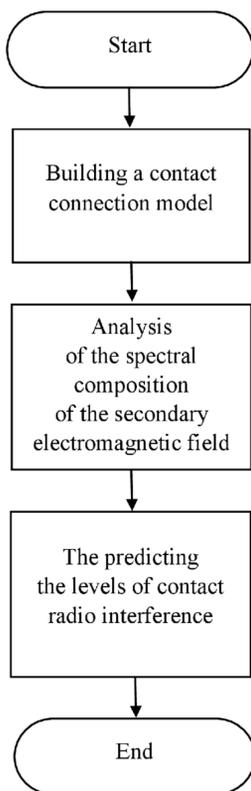


Рис. 2. Обобщённая блок-схема алгоритма прогнозирования контактных радиопомех

Fig. 2. Generalized block diagram of the algorithm for predicting contact radio interference

2. Алгоритм прогнозирования контактных радиопомех на мобильных объектах радиосвязи

Обобщённая блок-схема алгоритма прогнозирования контактных радиопомех представлена на рис. 2.

Рассматриваемый алгоритм включает в себя следующие этапы: построение и анализ модели контактного соединения, анализ спектрального состава вторичного электромагнитного поля на основании модели контактного соединения и осуществление прогнозирования контактных радиопомех на исследуемом объекте. Подробный анализ каждого из этапов рассмотренного алгоритма представлен в последующих разделах.

3. Построение модели контактного соединения для анализа процессов формирования контактных радиопомех

Одной из наиболее используемых на практике методик прогнозирования контактных радиопомех является представление электрического контакта в виде инерционного параметрического четырёхполюсника, представленного на рис. 3, с передаточной функцией $H(j\omega, t)$ [15].

В зависимости от условий образования контактных радиопомех электрические контакты можно разделить на линейные и нелинейные. Эквивалентная схема линейного контакта изображена на рис. 4.

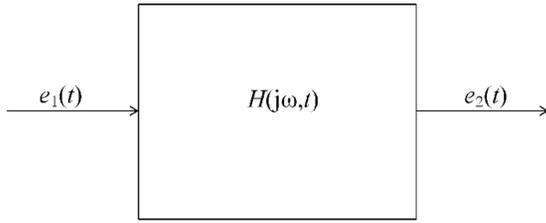


Рис. 3. Представление контакта как линейного параметрического четырёхполюсника

Fig. 3. Representation of the contact as a linear parametric four-pole

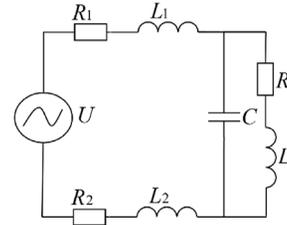


Рис. 4. Эквивалентная схема линейного контакта, облучаемого электромагнитным полем

Fig. 4. An equivalent circuit of a linear contact trained by an electromagnetic field

Исследование механизмов возникновения контактных помех радиоприёму для линейного контакта проведено для следующих условий: имеет место переменный контакт переключающегося типа, который облучается электромагнитным полем с некоторой гармоникой на ω_0 и определяемым соотношением:

$$e_1(t) = E_{1m} \cos \omega_0 t = E_{1m} \operatorname{Re}[e^{j\omega_0 t}], \quad (1)$$

где E_{1m} – величина амплитуды напряжённости облучающего электромагнитного поля.

При соблюдении указанных выше условий напряженность электромагнитного поля вторичного излучения переменного контакта определяется на основе анализа преобразования входного воздействия рассматриваемым линейным четырёхполюсником:

$$e_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_a(\omega) \dot{H}(j\omega, t) e^{j\omega t} dt, \quad (2)$$

где $\dot{S}_a(\omega)$ – энергетический спектр облучающего электромагнитного поля.

Рассматривая условие в качестве допущения о том, что функция, описывающая изменение контактного сопротивления, является периодической, изменение во времени передаточной функции $\dot{H}(j\omega, t)$ будет также происходить по периодическому закону.

Если принять основную частоту изменения передаточной функции $\dot{H}(j\omega, t)$ четырёхполюсника равной Ω , справедливо следующее разложение передаточной функции $H(j\omega, t)$ в ряд Фурье:

$$\dot{H}(j\omega, t) = \dot{H}_0(j\omega) + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{H}_n(j\omega) \cos(n\Omega t + \varphi_n). \quad (3)$$

В результате подстановки выражения (3) в выражение (2) и выполнения промежуточных преобразований можно получить выражение для напряжённости электромагнитного поля вторичного излучения:

$$e_2(t) = E_{1m} \operatorname{Re}[\dot{H}(j\omega, t) = E_{1m} \{H_0(\omega) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} H_n(\omega_0) [\cos < (\omega_0 + n\Omega)t + \psi_n + \varphi_n > + \cos < (\omega_0 - n\Omega)t + \varphi_n - \psi_n >]\},$$

где $H_0(\omega)$, $H_1(\omega)$, ..., $H_n(\omega)$ – амплитуды составляющих передаточной функции $H(j\omega, t)$ после её разложения в ряд Фурье; Ω – основная частота изменения передаточной функции; $\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n$ –

начальные фазы составляющих передаточной функции $H(j\omega, t)$; $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$ – фазовые сдвиги, вносимые контактными радиопомехами.

Энергетический спектр электромагнитного поля вторичного излучения будет определяться по формуле:

$$S_{e_2}(\omega) = \pi [E_{1m} H_0(\omega)]^2 [\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)] + \frac{\pi}{2} \sum_{n \geq 1} [E_{1m} H_n(\omega)]^2 \{ \delta(\omega + \omega_0 + n\Omega) + \delta(\omega + \omega_0 - n\Omega) + \delta(\omega - \omega_0 - n\Omega) + \delta(\omega + \omega_0 + n\Omega) \}.$$

Следует отметить, что выражения (2) и (3) получены для условий образования контактных радиопомех, при которых имеет место детерминированный характер излучающего электромагнитного поля и внешнего механического воздействия, вызывающего подвижность контактирующих частей. В случае невыполнения вышеуказанного условия используются вероятностные модели для прогнозирования спектральных характеристик контактных радиопомех.

Для анализа вероятностных моделей образования контактных радиопомех введём допущение о том, что случайный процесс, приводящий к изменению амплитуды и фазы передаточной функции параметрического четырехполюсника, не зависит от времени. В этом случае величина интервала корреляции передаточной функции будет значительно превышать значение периода изменения частоты первичного электромагнитного поля [1, 14].

В этом случае корреляционная функция облучающего электромагнитного поля будет определяться следующим выражением:

$$B_{e_1}(\tau) = \frac{E_{1m}^2}{2} \cos \omega_0 \tau. \quad (4)$$

Автокорреляционная функция случайного процесса, которая описывает изменение во времени параметров четырехполюсника, может быть определена по следующему выражению:

$$\dot{B}_H(t, \tau) = m_1 \{ \dot{H}(j\omega, t), H^*(j\omega, t + \tau) \}, \quad (5)$$

где: m_1 – математическое ожидание; $H^*(j\omega, t + \tau)$ – передаточная функция, комплексно сопряженная с передаточной функцией четырехполюсника.

Для проведения дальнейшего анализа удобно представлять выражение для автокорреляционной функции (5) в экспоненциальной форме:

$$\dot{B}_H(t, \tau) = m_1 \{ H[\varphi(\omega, \tau)], H[\varphi(\omega, t + \tau)] e^{j[\varphi(t) - \varphi(t + \tau)]} \}. \quad (6)$$

Используя допущение о стационарности случайного процесса изменения в компонентах передаточной функции исследуемого четырехполюсника, можно представить передаточную функцию четырехполюсника как сумму постоянной и флуктуирующей частей:

$$\dot{H}(j\omega, t) = \dot{H}_0(j\omega) + \Delta \dot{H}(j\omega), \quad (7)$$

где $\dot{H}_0(j\omega)$ – постоянная составляющая передаточной функции четырехполюсника; $\Delta \dot{H}(j\omega)$ – флуктуирующая составляющая передаточной функции четырехполюсника.

Исходя из этого, корреляционная функция процесса изменения передаточной функции может быть также определена как сумма постоянной и флуктуирующей частей:

$$\dot{B}_H(t, \tau) = \dot{B}_{H_0}(\tau) + \dot{B}_{\Delta H}(t, \tau). \quad (8)$$

Если принять во внимание допущение о том, что изменения составляющей передаточной функции $\Delta\dot{H}(j\omega)$ образуют случайный процесс с гауссовским распределением и с дисперсией $\sigma_{\Delta H}^2$ модуля флуктуирующей составляющей передаточной функции, корреляционная функция изменения передаточной функции может быть преобразована к следующему виду:

$$B_{\Delta H}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \text{Re}[\dot{B}_{\Delta H}(t, \tau)] dt = \sigma_{\Delta H}^2 e^{-k|\tau|}. \quad (9)$$

где k – коэффициент, определяющий величину скорости уменьшения корреляции между значениями $\Delta H(\omega t)$ в моменты t и $t+\tau$ с увеличением τ .

Если учесть, что корреляционная функция связана с постоянной составляющей передаточной функции, $H(j\omega, t)$ имеет следующий вид:

$$B_{H_0}(\tau) = H_0^2(\omega). \quad (10)$$

Применяя указанное условие, автокорреляционная функция может быть определена по следующей формуле:

$$B_H(\tau) = H_0^2(\omega) + \sigma_{\Delta H}^2 e^{-k|\tau|}. \quad (11)$$

Предполагая, что изменения в передаточной функции $H(j\omega, t)$ статистически не связаны с характеристиками излучающего электромагнитного поля, выражение для корреляционной функции напряженности вторичного электромагнитного поля вычисляется по следующей формуле:

$$B_{e_2}(\tau) = B_{e_1}(\tau) B_H(\tau). \quad (12)$$

При этом условии выражение (12) может быть представлено в следующем виде:

$$B_{e_2}(\tau) = \frac{E_{1m}^2}{2} [H_0^2(\omega) + \sigma_{\Delta H}^2 e^{-k|\tau|}] \cos \omega_0 \tau. \quad (13)$$

В этом случае энергетический спектр поля контактных радиопомех будет определяться следующим выражением:

$$S_{e_2}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} B_{e_2}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = \frac{\pi}{2} E_{1m}^2 H_0^2(\omega) [\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)] + E_{1m}^2 \sigma_{\Delta H}^2 k \left[\frac{1}{k^2 + (\omega - \omega_0)^2} + \frac{1}{k^2 + (\omega + \omega_0)^2} \right] \quad (14)$$

Графическое представление энергетического спектра вторичного излучения в области положительных частот приведено на рис. 5.

Результаты анализа выражения (14) позволяют сделать вывод о том, что спектральная характеристика вновь образованного электромагнитного поля будет включать в себя дискретную спектральную составляющую на частоте облучающего электромагнитного поля и сплошной спектр, который расположен симметрично частоте облучающего поля. Описанный вид спектральной характеристики наблюдается в случае, когда облучающее поле является моногармоническим, а величина контактного сопротивления изменяется во времени в соответствии с непрерывным случайным законом, имеющим ненулевое среднее значение.

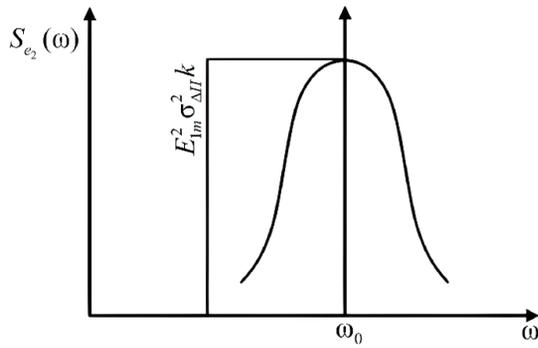


Рис. 5. Графическое представление энергетического спектра вторичного излучения в области положительных частот

Fig. 5. Graphical representation of the energy spectrum of secondary radiation in the region of positive frequencies

Представляется целесообразным проанализировать дополнительные условия, наиболее часто встречающиеся в практике, которые способствуют образованию контактных радиопомех. Представим облучающее поле моногармоническим сигналом с частотой ω_0 , фаза которого случайно распределена в интервале от $-\tau$ до $+\tau$.

При выполнении последующего анализа возникает необходимость выделения в одной из реализаций импульсного случайного процесса некоторой последовательности с чётным количеством импульсов. Среднее значение периода повторения между импульсами для такого процесса

будет равно T . Предположим, что паузы между импульсами имеют экспоненциальное распределение. Тогда выражение для энергетического спектра изменения передаточной функции четырёхполосника можно представить в следующем виде [1, 2]:

$$S_H(\omega) = \frac{2H_0(\omega)\tau_0^2}{T} |S(\omega)\tau_0|^2 \cdot \left\{ \frac{\sigma_H^2}{H_0^2(\omega)} + \frac{1}{1 + 2 \frac{\sin \omega\tau_0}{\omega(T-\tau_0)} + \left[\frac{\sin \frac{\omega\tau_0}{2}}{\frac{1}{2}\omega(T-\tau_0)} \right]^2} + \frac{\delta(\omega)}{T} \right\}, \quad (15)$$

где $H_0(\omega)$, – среднее значение коэффициента передачи четырёхполосника на частоте облучающего поля, σ_H^2 – дисперсия коэффициента передачи четырёхполосника на частоте облучающего поля, $|S(\omega)\tau_0|$ – спектральная плотность прямоугольного импульса единичной амплитуды и длительностью τ_0 . При этом следует учитывать, что:

$$|s(\omega\tau_0)| = \frac{\sin \frac{\omega\tau_0}{2}}{\frac{\omega\tau_0}{2}}. \quad (16)$$

Необходимо учитывать, что в процессе замыканий переменного контакта на время, равное τ_0 , значения коэффициента передачи подчиняются двухпараметрическому Γ -распределению вследствие нестабильности контактного сопротивления [1–3]:

$$f(H) = \frac{1}{\beta^{\alpha+1}\Gamma(\alpha+1)} H^\alpha e^{-H/\beta}. \quad (17)$$

С учётом этих условий среднее значение коэффициента передачи и дисперсия четырёхполосника на частоте облучающего поля будут определяться следующими выражениями:

$$H_0 = (\alpha + 1)\beta, \quad (18)$$

$$\sigma_H^2 = \beta^2 (\alpha + 1). \quad (19)$$

Выполнив подстановку выражений (18) и (19) в выражение (15), формулу для энергетического спектра изменения передаточной функции четырёхполюсника можно преобразовать к следующему виду:

$$S_H(\omega) = \frac{8(\alpha + 1)^2 \beta^2 \sin^2 \frac{\omega \tau_0}{2}}{T \omega^2} \left\{ \frac{1}{\alpha + 1} + \frac{1}{1 + 2 \frac{\sin \omega \tau_0}{\omega(T - \tau_0)} + \left[\frac{\sin \frac{\omega \tau_0}{2}}{\frac{1}{2} \omega(T - \tau_0)} \right]^2} + \frac{\delta(\omega)}{T} \right\}. \quad (20)$$

В случае если переключения в контактом соединении происходят достаточно редко, то есть при выполнении условия $\tau_0 \ll T_1 = T - \tau_0$, выражение (20) можно преобразовать к следующему виду:

$$S_H(\omega) \approx \frac{8(\alpha + 1)^2 \beta^2 \sin^2 \frac{\omega \tau_0}{2}}{T \omega^2} \cdot \left[\frac{2 + \alpha}{\alpha + 1} + \frac{\delta(\omega)}{T} \right] = S_h(\omega) + S_\delta(\omega). \quad (21)$$

Анализ выражения (21) показывает, что энергетический спектр передаточной функции четырёхполюсника содержит дискретную и непрерывную составляющие. При этом следует учесть, что спектр контактных радиопомех будет определяться только непрерывной составляющей энергетического спектра изменения передаточной функции четырёхполюсника. Моментная функция, которая соответствует вышеупомянутой непрерывной составляющей, определяется как её обратное преобразование Фурье, согласно теореме Винера-Хинчина:

$$B_h(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_h(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega = \frac{(\alpha + 1)(\alpha + 2)\beta^2 \tau_0}{\pi T} (\tau_0 - |\tau|). \quad (22)$$

С учётом выражения (22) корреляционная функция поля контактных радиопомех может быть определена по формуле:

$$B_{e_2}(\tau) = B_{e_1}(\tau) B_h(\tau) = \frac{(\alpha + 1)(\alpha + 2)\beta^2 \tau_0 E_m}{2\pi T} (\tau_0 - |\tau|) \cos \omega_0 \tau. \quad (23)$$

Графическое представление корреляционной функции поля контактных радиопомех приведено на рис. 6.

Анализируя выражение (23), можно сделать вывод о том, что с учётом введённых допущений корреляционная функция контактных радиопомех будет близка к корреляционной функции одиночного прямоугольного импульса длительностью τ_0 и с частотой заполнения ω_0 .

Важно отметить, что реальный спектр электромагнитного поля контактных радиопомех охватывает определённую полосу частот. При анализе спектра вторичного излучения переменного контактного соединения следует учитывать, что коэффициент передачи этого соединения изменится как во времени, так и по частоте. Для расчёта корреляционной функции и энергетического спектра вторичного излучения при условии, когда коэффициент передачи переменного контакта

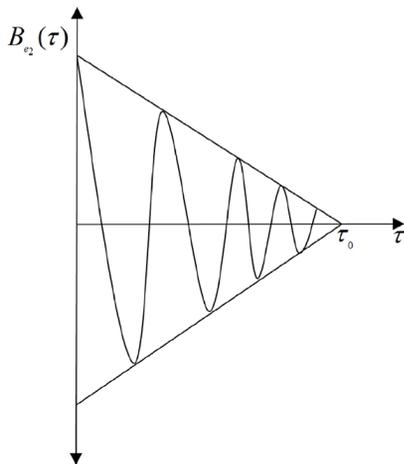


Рис. 6. Графическое представление корреляционной функции поля контактных радиопомех

Fig. 6. Graphical representation of the correlation function of the field of contact radio interference

статистически не зависит от параметров облучающего электромагнитного поля и является стационарным в широком смысле, можно использовать следующие соотношения, полученные опытным путём [1, 4]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{B}_{e_2}(\tau) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{B}_H(\tau, \omega) \dot{S}_{e_1}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega; \\ \dot{S}_{e_2}(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_{e_1}(\omega) \dot{\Gamma}(\omega, \omega') d\omega, \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где $\dot{\Gamma}(\omega, \omega')$ – спектральная плотность мощности флюктуаций передаточной функции линейного инерционного четырехполюсника для составляющей облучающего электромагнитного поля на частоте ω , при этом следует учитывать, что:

$$\dot{\Gamma}(\omega, \omega') = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{B}_H(\tau, \omega') e^{j\omega'\tau} e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (25)$$

4. Способы снижения влияния контактных радиопомех на радиоэлектронную аппаратуру подвижных объектов

Подавление источников помех, возникающих на подвижных устройствах, может быть осуществлено путем уменьшения величин высокочастотных токов, протекающих по металлическим конструкциям, или же путем устранения переменных механических сочленений в таких конструкциях. Уменьшение величины высокочастотного тока, протекающего по металлическим конструкциям подвижных объектов и приводящего к возникновению помех в переменных механических сочленениях, может быть достигнуто за счет максимально возможного удаления данных конструкций от передающих антенн радиосвязи, что будет способствовать уменьшению величин ЭДС, наводимых на токопроводящие конструкции при работе радиопередатчика. Аналогичным методом может быть уменьшено воздействие помех на приемные антенны радиосвязи. Для этого мешающие устройства целесообразно располагать на максимальном удалении от приёмных антенн. Другим возможным методом уменьшения интенсивности помех является обеспечение постоянства электрического контакта в механических сочленениях токопроводящих конструкций, что в значительной мере устранил возможность резких изменений протекающего тока, а следовательно, и образования паразитного излучения [1–2]. Для обеспечения постоянства электрического контакта и, следовательно, снижения контактного сопротивления соединения погружают в токопроводящие жидкости или обрабатывают токопроводящими смазками.

5. Заключение

Представленный в настоящей статье анализ механизмов формирования, а также детерминированные и вероятностные модели образования контактных радиопомех позволяют прогно-

зировать спектральные характеристики контактных радиопомех на подвижных объектах при различных условиях.

Следует отметить, что детерминированные модели образования контактных радиопомех необходимо использовать в том случае, если имеет место детерминированный характер излучающего электромагнитного поля и внешнего механического воздействия, вызывающего подвижность контактирующих частей. В случае невыполнения вышеуказанного условия используются вероятностные модели для прогнозирования спектральных характеристик контактных радиопомех.

Проведение прогнозирования спектральных характеристик контактных радиопомех позволяет обеспечить достоверность информации об их уровнях, что, в свою очередь, позволит учитывать их при проектировании сложных радиотехнических систем, расположенных на подвижных объектах и, как следствие, повышать надежность вышеупомянутых радиоэлектронных устройств и систем.

Список литературы/ References

[1] Клементенко А. Я., Панов Б. А., Свешников В. Ф. *Контактные помехи радиоприёму*, Москва: Воениздат, 1979. 116. [Klementenko A. Ya., Panov B. A., Sveshnikov V. F., *Contact interference to radio reception*, Moscow, Voenizdat, 1979, 116. (In Rus.)]

[2] Лазарев Д. В. Теория надежности для исследования контактных радиопомех: комплексный подход к оценке ЭМС подвижных объектов, *Седьмой Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии*, Санкт-Петербург: СПбГЭТУ, 2007, 280–283. [Lazarev D. V. Reliability theory for the study of contact radio interference: an integrated approach to the assessment of the EMC of mobile objects, *The Seventh International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology*, St. Petersburg, 2007, 280–283. (In Rus.)]

[3] Грачев Н. Н., Лазарев Д. В. Влияние контактных помех при обеспечении электромагнитной совместимости на подвижных объектах радиосвязи, *Технологии электромагнитной совместимости*, Москва: ООО «Издательский Дом «Технологии», 2007, 2(21), 22–32 [Grachev N. N., Lazarev D. V. Influence of contact interference in ensuring electromagnetic compatibility on mobile radio communication objects, *Technologies of electromagnetic compatibility*, Moscow, 2007, 2(21), 22–32. (In Rus.)]

[4] Лазарев Д. В. Контактные помехи радиоприему – природа явлений, методы подавления и решения проблемы ЭМС, *Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий: Материалы научно-практической конференции*, Москва: МИЭМ, 2006, 156–158. [Lazarev D. V. Contact interference to radio reception – the nature of phenomena, methods of suppressing and solving the problem of EMC, *Innovations in the context of the development of information and communication technologies: Materials of a scientific and practical conference*, Moscow, 2006, 156–158. (In Rus.)]

[5] Левин А. П. *Контакты электрических соединителей радиоэлектронной аппаратуры*, Москва: Советское радио, 1972. 216. [Levin A. P. *Contacts of electrical connectors of electronic equipment*, Moscow, Sovetskoe radio, 1972, 216. (In Rus.)]

[6] Holm R. *Electric contacts: theory and application*, Springer, Berlin, 1967, 484.

[7] Malucci R.D. Multispot Model of Contacts Based on Surface Features, *15 International Conference On Electrical Contacts*, Montreal, 1990, 625–634.

[8] Caven R. W., Jalali J. Predicting the contact resistance distribution of electrical contacts by modeling the contact interface, *Proceedings of the Thirty-Seventh IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Chicago, 1991, 83–89.

[9] Aukland N., Hardee H., Wehr A., Walker E., Klavens D. The interface resistance between a cadmium plated connector and an Alodined aluminum bracket, *Electronic Components and Technology Conference*, Seattle, 1998, 21–32.

[10] Callen W., Johnson B., King P., Timsit R. S., Abbott W.H. Environmental degradation of utility power connectors in a harsh environment, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2(23), 2000, 261–270.

[11] Fang Yao, Zhigang Li, Wenhua Li, Kui Li, Concerning contact resistance prediction based on time sequence and distribution character, *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts Electrical Contacts*, Seattle, 2004, 447–452.

[12] Fang Yao, Jianguo Lu, Jianrong Zheng, Zhangwu Huang, Research on the Failure Diagnostics Parameters and the Reliability Prediction Model of the Electrical Contacts, *Electrical Contacts – 2006. Proceedings of the 52nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Montreal, 2006, 69–72.

[13] Wen-hua Li, Xiang Sun, Hongxun Liu, Xiuping Su, Study on the test system of AC contactor for electrical parameters, *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, Chengdu, 2008, 1–4.

[14] Grachev N.N., Artamonov D.O., Utkin B.V., Development and Analysis of Models for the Formation of Contact Radio Interference under Deterministic and Random Mechanical Effects on the Contact Mechanical Joints of Moving Objects, *2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, Yaroslavl, 2021, 430–435.

[15] Лазарев Д. В. Исследование спектрального состава контактных радиопомех при параметрическом коэффициенте передачи, *Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ*, Москва, 2008, 283–285. [Lazarev D. V. Investigation of the spectral composition of contact radio interference with a parametric transmission coefficient, *Scientific and Technical Conference of Students, postgraduates and young specialists of MIEM*, Moscow, 2008, 283–285.]