

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 621.391.82

### ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СБОРКИ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ И АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

**Грачев Н.Н.**

*Высшая школа экономики,  
ул. Мясницкая, 20, Москва, 101000, Россия  
e-mail: ngrachev@mail.ru*

---

Приведены результаты исследований, направленных на обеспечение качества сборки элементов конструкций электронных средств летательных аппаратов. В результате исследований установлено, что к основным недостаткам, влияющим на качество сборки, относится несоблюдение моментов затяжки резьбовых соединений в конструкциях электронных средств летательных аппаратов. Проведенные исследования показали возможность использования бесконтактного метода определения качества сборки элементов конструкций бортовых радиоэлектронных средств (РЭС) на основе анализа уровня контактных радиопомех. Предложенный метод основан на сравнении спектральных составляющих уровней излучений от реальных и эталонных конструкций блоков бортовых РЭС. По результатам сравнения уровней излучения оценивается качество сборки блоков бортовых РЭС, оказывающее существенное влияние на общий уровень электромагнитной обстановки на борту ЛА.

*Ключевые слова:* контактные помехи, электромагнитная обстановка, качество сборки, способ диагностики.

---

Исследованию образования контактных радиопомех (КРП), возникающих в результате воздействия электромагнитного поля радиопередатчиков на токопроводящие механические контакты с нелинейным и переменным во времени сопротивлением, или просто на переменные контакты, а также образования электромагнитных помех на летательных аппаратах посвящено достаточное число работ [1–9]. Если на наземных радиостанциях имеется возможность территориально разнести передающие и приемные антенны и тем самым обеспечить в месте расположения приемной антенны

уровень КРП, близкий к уровню внешних шумов, то на самолетах и других подвижных объектах обеспечить необходимое пространственное разнесение невозможно. Кроме того, когда летательный аппарат находится в движении, количество переменных контактов возрастает и, соответственно, увеличивается как уровень КРП, так и полоса частот, занимаемая этими помехами. Эти проблемы становятся существенными, когда решается общая задача обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) летательного объекта [10].

Особенно остро проблема образования КРП проявляется при движении летательного аппарата, когда сопротивление контактов в элементах конструкции в результате вибрации, толчков и других механических воздействий начинает случайным образом изменяться. Тогда переменные контакты при излучении радиопередатчиков становятся источниками достаточно интенсивных и широкополосных КРП. Следует отметить, что КРП имеют жесткую корреляционную связь с излучением радиопередатчиков и зависят от мощности и частотного спектра излучаемого ими электромагнитного поля.

Было выяснено, что причиной возникновения повышенного уровня помех радиоприему на летательных аппаратах является воздействие электромагнитного поля их радиопередатчиков на несовершенные по изготовлению контакты конструкций. Излучающие радиопередатчики наводят на металлических корпусах и других элементах конструкции летательного средства электродвижущую силу (ЭДС) значительного уровня. Уровень ЭДС зависит от многих факторов: мощности излучения, частоты и спектра излучаемого колебания, геометрических размеров, материала, формы и технического состояния облучаемых конструкций [11–13].

Протекание тока, вызванного наведенной ЭДС, по элементам конструкции самолета приводит к излучению этими элементами вторичного электромагнитного поля, взаимодействующего с первичным облучающим электромагнитным полем радиопередатчика.

Полосы частот, образующихся при воздействии КРП, возникают не только около основных и гармонических излучений радиопередатчиков. Этим помехам подвергаются также полосы частот приема, в которые попадают комбинации частот одновременно работающих радиопередатчиков [14–17].

Для решения проблемы образования КРП, в современном проектировании и производстве летательных аппаратов, конструкций радиоэлектронных средств летательных аппаратов, для оценки качества создаваемых механических конструкций, включающей проведение испытаний на уровень прочности конструкций, используются, как правило, различные виды механических воздействий. При этом, по снятым с конструкций РЭС сигналам датчиков механических величин, которые содержат диагностическую информацию, делается заключение о техническом состоянии конструкций, наличии в них дефектов. Одним из основных дефектов сборки является несоблюдение моментов затяжки резьбовых соединений. Указанный анализ сопряжен с обработкой значительных объемов данных о характеристиках измеряемых вибросигналов и не дает

однозначной информации о наличии и месте дефектов в конструкциях. Поэтому создание простых и достоверных экспресс-методов диагностики конструкций РЭС летательных аппаратов является актуальным.

Проведенные исследования могут быть положены в основу разработки бесконтактного экспресс-метода оценки качества сборки и монтажа конструкций. Метод основан на регистрации и анализе искусственно возбуждаемых контактных помех при воздействии механических колебаний и гармонического электрического сигнала высокой частоты на элементы конструкций летательных аппаратов, образующих контур фазо-амплитудно-модулированных колебаний (ФАМ), которые регистрируются анализатором спектра или приемником ФАМ или амплитудно-модулированных колебаний (АМ). При этом измеряются уровни его спектральных составляющих при изменении частоты механических воздействий в диапазоне, определяемом условиями эксплуатации. Измеренный уровень спектральных составляющих излучаемых амплитудно-модулированных колебаний сравнивается с уровнем спектральных составляющих сигнала, излучаемого конструкцией эталонного блока с заданными механическими параметрами, имеющего нормируемый уровень контактных помех.

Рассматриваемое в области ЭМС как нежелательное явление, образование КРП может быть использовано для оценки механических свойств конструкций самых различных авиационных технических средств и устройств, включая качество сборки и монтажа (особенно связанных с усилием затяжки крепежных элементов).

Предложенный метод может быть использован для определения частот механических резонансов в конструкциях электронной аппаратуры. Максимальные значения измеренных уровней спектральных составляющих при изменении частот механических воздействий позволяют устанавливать значения резонансных частот в конструкциях [16].

В современном производстве конструкций РЭС для оценки качества производимых конструкций изделий применяются различные способы оценки качества сборки конструкций, использующие различные виды механических воздействий на конструкции, с помощью которых оценивают качество сборочно-монтажных работ. Механические испытания РЭС позволяют выявить наличие дефектов в конструкции, провести оценку влияния конструктивных факторов на параметры качества РЭС, проверить соответствие параметров аппаратуры требованиям ТУ.

Известные способы оценки качества сборки конструкций блоков РЭС, заключающиеся в проведении механических испытаний на вибропрочность, ветроустойчивость, ударную прочность, не позволяют выявить дефекты в конструкциях РЭС и адекватно оценить качество сборочно-монтажных работ. Определение резонансных частот амплитуд колебаний, а также максимальных механических напряжений в элементах конструкций не позволяет оценивать качество сборки изделия, особенно в узлах крепления, где присутствуют нормируемые величины затяжек крепежных элементов, деформации при сочленении отдельных деталей. Существующие датчики для измерения амплитуд и ускорений не позволяют оценивать перемещения сочленяемых деталей в конструкциях.

Электрические контакты являются важной частью электрических и механических конструкций радиоэлектронной аппаратуры летательных аппаратов. Условия, при которых происходит эксплуатация электрических контактов, оказывают серьезное влияние на параметры последних. К таким условиям относятся следующие внешние воздействующие факторы: электрические, тепловые, механические, климатические. Примером, характеризующимся значительными механическими воздействиями, являются подвижные объекты, такие, как летательные аппараты (ЛА), на которых размещаются бортовые радиоэлектронные средства, содержащие большое число соединенных между собой металлических элементов, образующих систему электрических контактов. Одни из них благодаря жесткому или надежному соединению элементов оказываются постоянными, другие же при движении, особенно в случае нежесткого соединения элементов объекта, оказываются переменными. Одной из важных задач является исследование электрических характеристик контакта при воздействии механических факторов.

В условиях отсутствия механических внешних воздействий на соединяемые элементы конструкции имеет место устойчивый во времени контакт между этими элементами, что позволяет при излучении радиопередающих устройств рассматривать корпус и отдельные элементы конструкций как проводящие тела, помещенные в высокочастотное электромагнитное поле.

Точный расчет ЭДС, наводимой облучающим электромагнитным полем на проводниках произвольной конфигурации, представляет сложную проблему [17]. Протекание тока в облучаемых проводниках сопровождается возникновением вторичного электромагнитного поля, имеющего ту же спектральную структуру, что и облучающее элект-

ромагнитное поле, но отличающегося от него амплитудой и фазой. Взаимодействие излучающего и вторичного электромагнитных полей приводит к искажению структуры суммарного электромагнитного поля вблизи металлических поверхностей исследуемых объектов, но никакие дополнительные спектральные составляющие при этом не возникают.

На рис. 1 представлены эскиз болтового соединения и его эквивалентная параметрическая схема полного сопротивления переменного контакта.

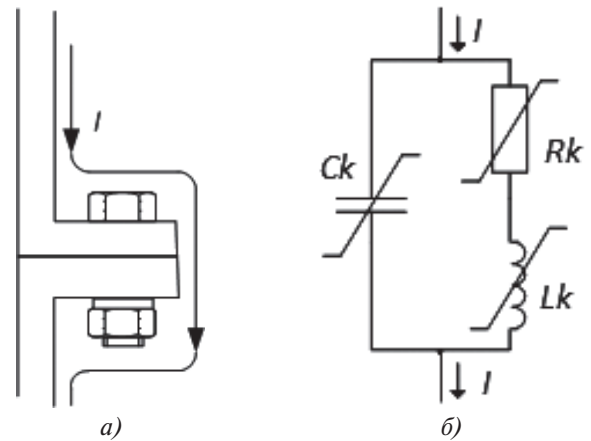


Рис. 1. Болтовое соединение (а) и эквивалентная параметрическая схема полного сопротивления переменного контакта (б)

Под действием внешнего облучающего электромагнитного поля на контактную пару (рис. 1,а) на эквивалентном проводнике (контактной паре) наведется ЭДС со спектральной структурой излучающего поля. Предположим, что излучатель излучает узкополосный сигнал, образованный путем модуляции гармонического сигнала по амплитуде и фазе. Тогда напряжение, наводимое на эквивалентном проводнике, можно записать в виде

$$\dot{U}(t) = U(t) \cos[\omega_0 t + \Phi(t) + j_0], \quad (1)$$

где  $\dot{U}(t)$  — амплитуда напряжения, определяемая законом амплитудной модуляции облучающего электромагнитного поля;

$\omega_0$  — круговая частота облучающего электромагнитного поля;

$\Phi(t)$  — закон фазовой модуляции;

$\Phi_0$  — начальная фаза.

Ток проводимости в эквивалентном проводнике можно вычислить по формуле

$$i_k(t) = \frac{u(t)}{Z(t)} = u(t)y(t), \quad (2)$$

где  $y(t) = 1/Z(t)$  — проводимость эквивалентного проводника.

Запишем  $u(t)$  и  $y(t)$  в комплексной форме:

$$\begin{aligned} u(t) &= \operatorname{Re}\{U(t)e^{j(\omega_0+y(t)\varphi_0)}\}; \\ y(t) &= \operatorname{Re}\{Y(t)e^{j\varphi(t)}\}, \end{aligned} \tag{3}$$

где  $U(t) = U(t)e^{j\varphi(t)}$  — комплексная огибающая напряжения, в которой заключена информация о модулированном сигнале, передаваемом облучающим электромагнитным полем.

Тогда ток проводимости в эквивалентном проводнике можно записать в виде

$$\begin{aligned} i_k(t) &= \operatorname{Re}\{U(t)Y(t)e^{j\varphi(t)}e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)}\} = \\ &= U(t)Y(t)\cos[\omega_0 t + \varphi(t) + \varphi_0 + \varphi(t)]. \end{aligned} \tag{4}$$

Из этого выражения следует, что спектр тока отличен от спектра облучающего электромагнитного поля. Он содержит дополнительные спектральные составляющие, обусловленные изменением контактного сопротивления.

В данной ситуации происходят амплитудные и фазовые искажения, и, следовательно, электромагнитное поле вторичного излучения переменного контакта будет существенно отличаться по спектральной структуре от первоначально облучающего поля.

Из вышесказанного однозначно следует вывод о том, что регистрация спектральных составляющих, образующихся при переизлучении, позволяет определить параметры, характеризующие состояние контактного сопротивления, или, другими словами, параметры, характеризующие качество сборки элементов конструкции (рис. 2,а).

Другим вариантом исследования может являться регистрация спектра сигнала с фазово-амплитудной модуляцией, излучаемого конструкцией ЭС и ее элементами, при которой осуществляется анализ спектра излучения конструкции и ее элементов. При этом конструкция включается в контур излучения высокочастотного генератора. Анализ спектра и измерение параметров модулированного сигнала осуществляются с помощью приемников ФАМ-сигналов (рис. 2,б).

Для решения поставленных задач первостепенным является исследование поведения контактной пары механического соединения, а именно определению вклада параметров  $R, L, C$  в уровень модуляции и спектральный состав электромагнитных излучений контактной пары [18–20].

На рис. 1,а представлен фрагмент болтового соединения конструкций, характерный для многих подвижных объектов. При воздействии механических факторов на это соединение (тряски, вибрации, удара, акустического шума) электрический контакт, образованный конструкциями, будет менять свои электрические параметры. На рис. 1,б представлена эквивалентная параметрическая схема полного

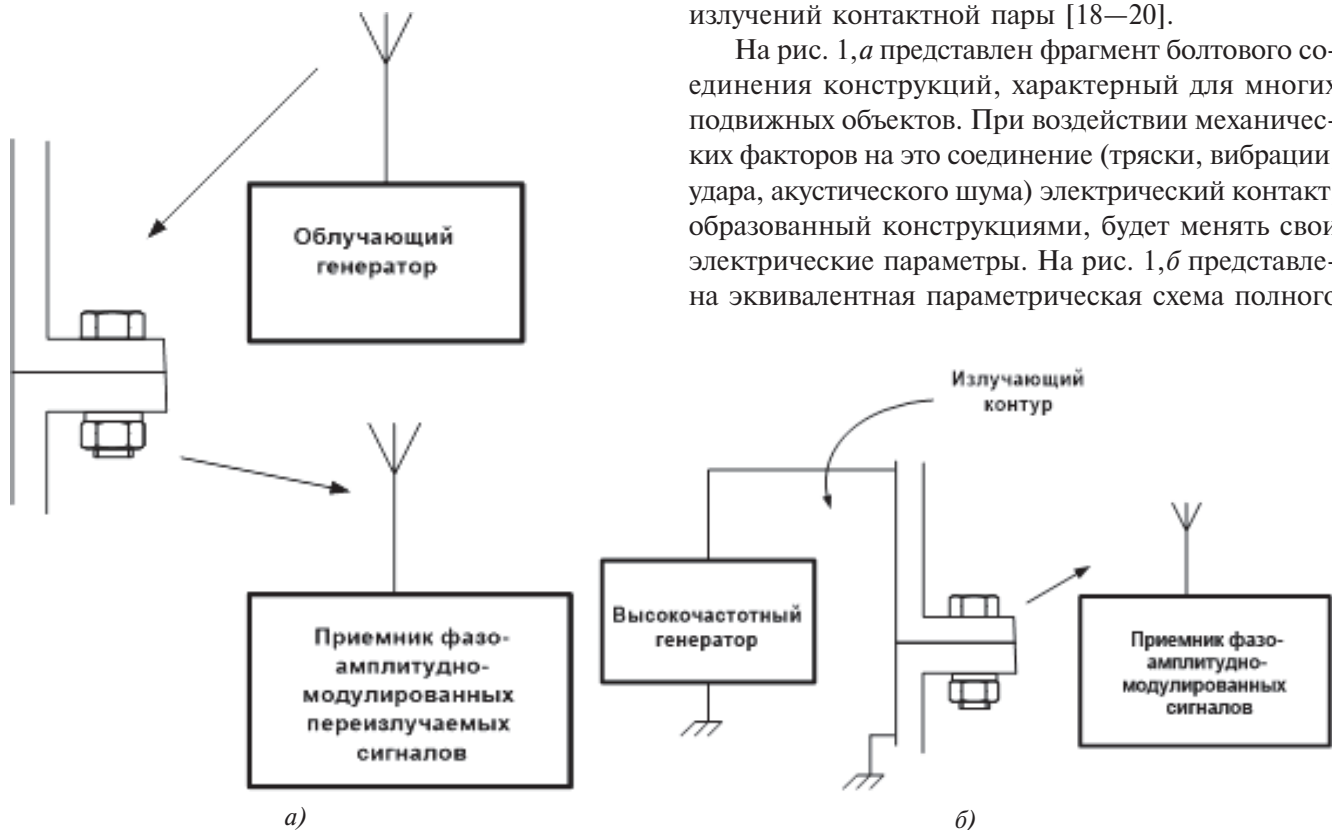


Рис. 2 Методы получения информации о качестве сборки: а — регистрация информации о параметрах сигнала переизлучения; б — регистрация информации о параметрах сигнала излучения

сопротивления электрического контакта для высоких частот проходящего сигнала при механических воздействиях на контакт.

Полное переходное электрическое сопротивление контакта в статическом состоянии

$$\dot{Z}_k(\omega, R_k, L_k, C_k) = \frac{R_k}{(1 - \omega^2 C_k L_k)^2 + \omega^2 R_k^2 C_k^2} + j \frac{\omega L_k (1 - \omega^2 L_k C_k) - \omega R_k^2 C_k}{(1 - \omega^2 C_k L_k)^2 + \omega^2 R_k^2 C_k^2}, \tag{5}$$

где  $R_k$  — резистивность контактного перехода;  
 $L_k$  — индуктивность контактного перехода;  
 $C_k$  — емкость контактного перехода.

В дальнейшем опустим индекс «к» при резистивности, индуктивности и емкости электрического контакта, понимая, что речь идет о параметрах контакта.

Из формулы (5) следует, что полное переходное сопротивление является комплексной частотно-зависимой величиной и характеризуется амплитудно-фазовыми параметрами [18—20].

Из рис. 1,б следует, что электрический контакт представляет собой электрический контур, для которого при некоторых частотах проходящего электрического сигнала характерен резонанс токов. Это явление характеризуется тем, что коэффициент передачи по току в каждой из ветвей (индуктивной и емкостной) может оказаться больше единицы.

Рассмотрим амплитудно-фазовые характеристики (АФХ) коэффициентов передачи электрического контакта.

По определению коэффициент передачи по току в индуктивной ветви

$$\dot{K}_L = \frac{\dot{I}_L}{\dot{I}} = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_L} = \frac{\dot{Z}_k}{j\omega L_k + R_k}, \tag{6}$$

где  $I$  — ток в неразветвленной части цепи;  $I_L$  — ток в индуктивной ветви.

После арифметических преобразований полная модель коэффициента передачи по току в индуктивной ветви

$$\dot{K}_L(\omega, R, L, C) = \frac{R^2 + (\omega L)^2 - \omega^2 R^2 C L - \omega^4 C L^3 + j(-\omega C R^3 - \omega^3 C L^2 R)}{((1 - \omega^2 C_k L_k)^2 + \omega^2 R_k^2 C_k^2) \cdot (R^2 + (\omega L)^2)} \tag{7}$$

На рис. 3 и 4 представлены АФХ коэффициента передачи по току в индуктивной ветви, т.е. зависимость модуля и фазы коэффициента передачи от частоты. Графики приведены для следующих параметров электрического контакта:  $R = 10^{-3}$  Ом,  $L = 8 \cdot 10^{-11}$  Гн,  $C = 3 \cdot 10^{-10}$  Ф. Частота проходящего сигнала рассматривается в диапазоне  $2\pi \cdot (0,3 \div 30) \cdot 10^6$  Гц.

Из графиков видно, что резонансная частота контакта при данных условиях находится значительно выше рассматриваемого диапазона. Для данных условий она равна  $5,8 \cdot 10^9$  Гц. Тем не менее некоторое изменение амплитуды и фазы коэффициента передачи по току происходит. При  $\omega = 0$  модуль коэффициента передачи равен единице, так как в этом случае весь ток проходит через резис-

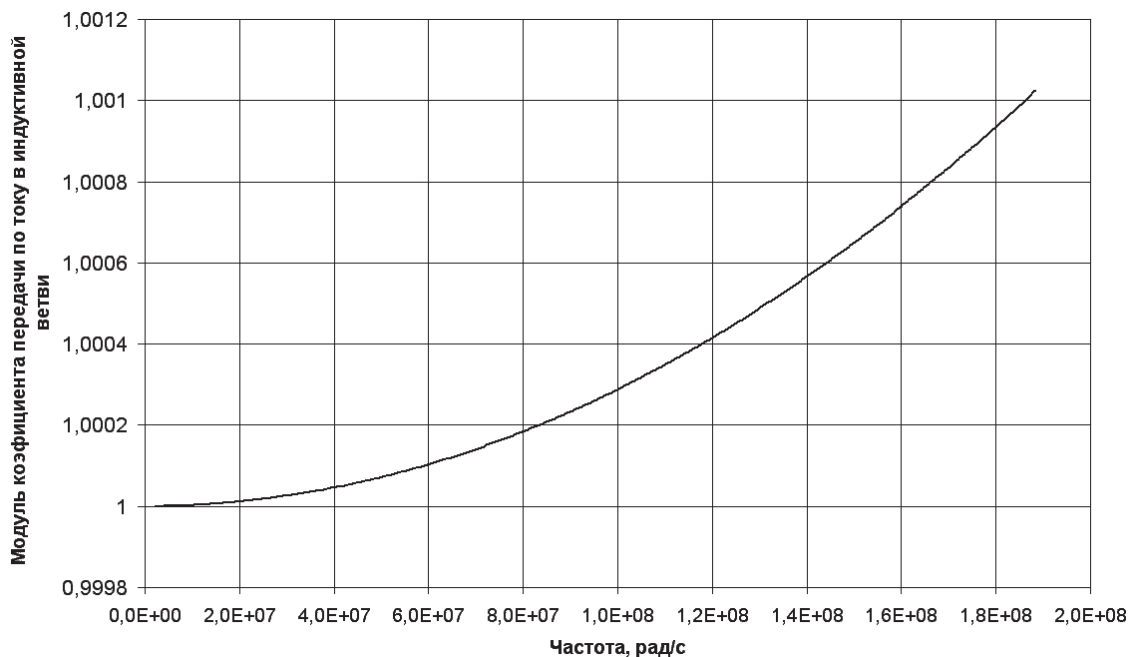


Рис. 3. Зависимость модуля коэффициента передачи по току в индуктивной ветви от частоты сигнала

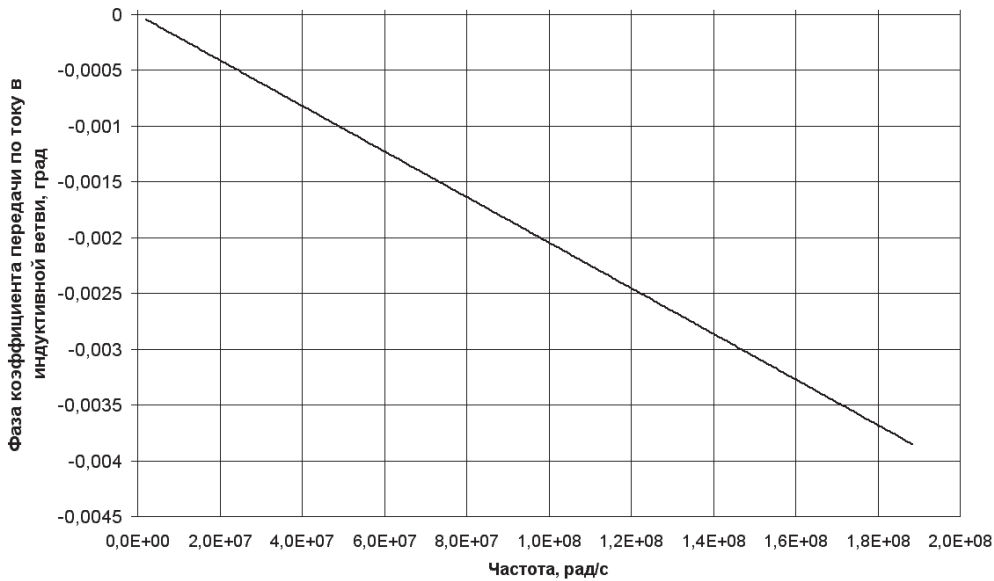


Рис. 4. Зависимость фазы коэффициента передачи по току в индуктивной ветви от частоты сигнала

тивную ветвь. При повышении частоты модуль коэффициента передачи повышается. В рассматриваемом диапазоне частот он увеличивается на 0,1 %.

При  $\omega = 0$  фаза коэффициента передачи равна нулю, так как в этом случае образуется чисто резистивная ветвь. При повышении частоты фаза коэффициента передачи понижается. В рассматриваемом диапазоне частот она уменьшается на 0,4 %.

По определению коэффициент передачи по току в емкостной ветви

$$\dot{K}_C = \frac{\dot{I}_C}{\dot{I}} = \frac{\dot{Z}_K}{\dot{Z}_C} = \frac{-\dot{Z}_K \omega C_K}{j} \tag{8}$$

После арифметических преобразований полная модель коэффициента передачи по току в емкостной ветви

$$\dot{K}_C(\omega, R, L, C) = \frac{\omega^4 C^2 L^2 + \omega^2 C^2 R^2 - \omega^2 LC + j\omega CR}{(1 - \omega^2 C_K L_K)^2 + \omega^2 R_K^2 C_K^2} \tag{9}$$

На рис. 5 и 6 представлены АФХ коэффициента передачи по току в емкостной ветви. Графики приведены для тех же параметров электрического контакта, что и в случае индуктивной ветви.

При  $\omega = 0$  модуль коэффициента передачи равен нулю, так как в этом случае весь ток проходит

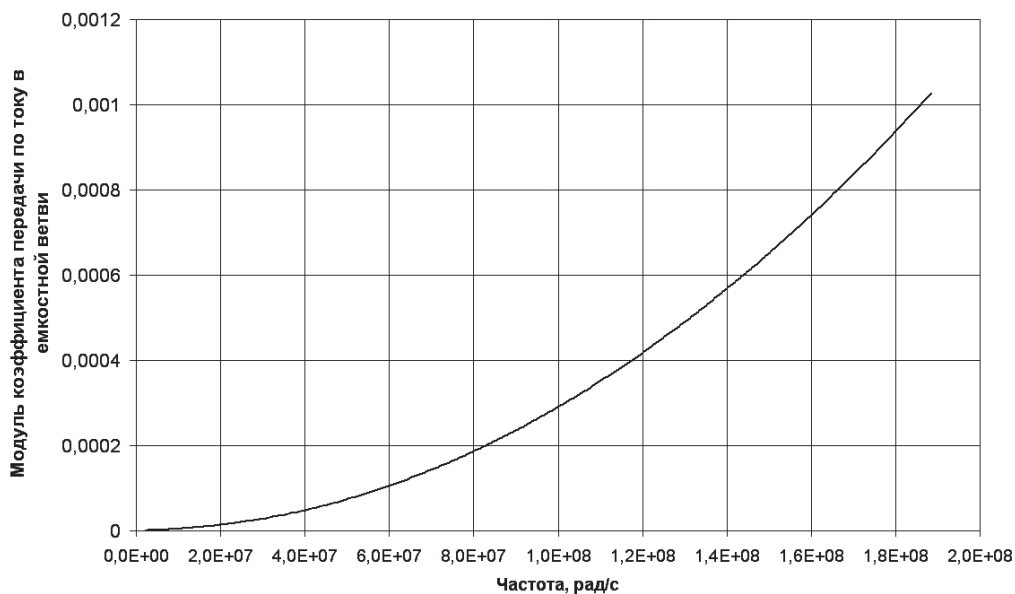


Рис. 5. Зависимость модуля коэффициента передачи по току в емкостной ветви от частоты сигнала

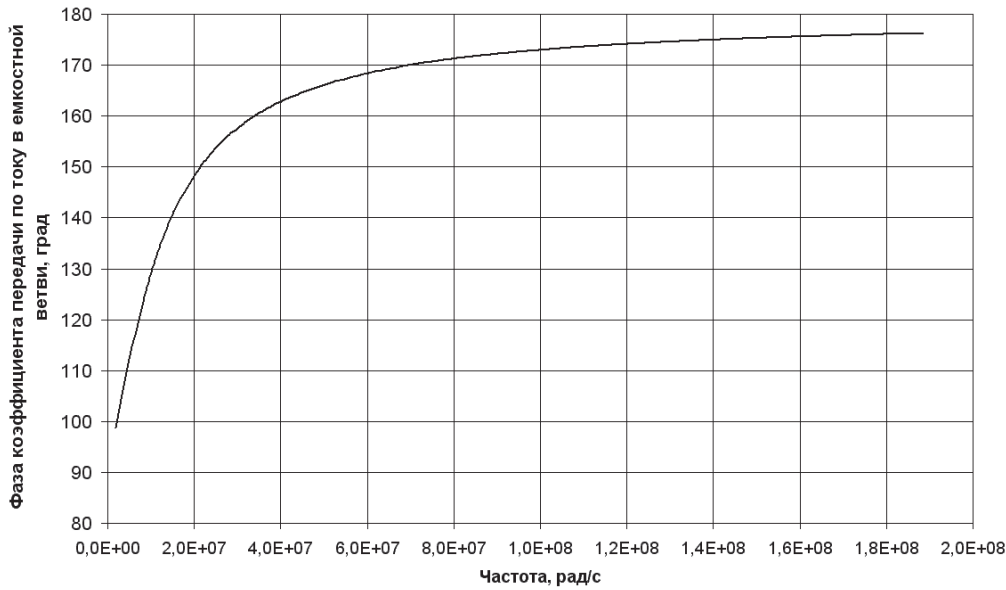


Рис. 6. Зависимость фазы коэффициента передачи по току в емкостной ветви от частоты сигнала

через резистивную ветвь. При повышении частоты модуль коэффициента передачи повышается. В рассматриваемом диапазоне частот он увеличивается на 0,1 %.

При  $\omega = 0$  фаза коэффициента передачи стремится нулю. При повышении частоты фаза коэффициента передачи значительно повышается. В рассматриваемом диапазоне частот она увеличивается на 78 %.

Рассмотрим теперь динамический характер поведения коэффициентов передачи по току. Для этого используем формулы зависимости резистивности, индуктивности и емкости электрического контакта от контактного усилия.

Для резистивности она имеет вид

$$R_k = c\rho \frac{\sqrt{H}}{P_k^b}, \tag{10}$$

где  $c$  — коэффициент, зависящий от способа, чистоты обработки и состояния поверхности;  $\rho$  — удельная проводимость материала контакта;  $H$  — поверхностная твердость по Бринеллю;  $P_k$  — контактное усилие;  $b$  — показатель степени, зависящий от характера деформации, вида и формы зоны контактирования.

Индуктивность переходной зоны контакта

$$L_k = \mu(1,545(D - 2a) - 0,533D) \cdot 10^{-7}, \tag{11}$$

где  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость материала контакта;  $D$  — диаметр кажущейся контактной поверхности;  $a$  — радиус площадки контактирования.

Емкость переходной зоны контакта без наличия пленки

$$C_k = 5,5 \cdot 10^{-11} \ln(r/2a), \tag{12}$$

где  $r$  — радиус вершины микронеровности;  $a$  — радиус площадки контактирования.

Для расчета зависимости радиуса площадки контактирования от контактного усилия воспользуемся формулой Герца для контактирования двух сфер в рамках теории упругости:

$$a(P_k) = 0,00872 \sqrt[3]{\frac{P_k}{10} \left( \frac{\frac{10^{-5}}{E_1} + \frac{10^{-5}}{E_2}}{\frac{1}{100r_1} + \frac{1}{100r_2}} \right)}, \tag{13}$$

где  $P_k$  — контактное усилие;  $E_1$  и  $E_2$  — модули упругости контактирующих материалов;  $r_1$  и  $r_2$  — радиусы контактирующих сфер.

При изменении контактного усилия от  $P_{k1} = 10$  Н до  $P_{k2} = 90$  Н первичные электрические параметры контакта, рассчитанные по вышеприведенным формулам, будут равны:

$$R_{k1} = 38,09 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, R_{k2} = 19,7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

$$L_{k1} = 8,095 \cdot 10^{-11} \text{ Гн}, L_{k2} = 8,094 \cdot 10^{-11} \text{ Гн};$$

$$C_{k1} = 4,38 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}, C_{k2} = 3,98 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}.$$

Из приведенных расчетов видно, что при таком значительном размахе изменения контактного усилия наиболее значительное изменение характерно для резистивности электрического контакта.

Рассмотрим влияние резистивности на коэффициенты передачи по току в обеих ветвях. Для этого сначала найдем выражение для абсолютных функций чувствительности коэффициентов передачи по току.

Согласно определению, абсолютная функция чувствительности выходной характеристики от совокупности параметров равна

$$A_{q^r}^y = \frac{1}{r!} \left( \frac{\partial^p y}{\partial^r q} \right)_{q_0}, \tag{14}$$

где  $y$  — выходная характеристика;  $p$  — порядок частной производной выходной функции;  $q$  — параметр чувствительности;  $r$  — порядок частной производной параметра чувствительности;  $q_0$  — вектор расчетных значений параметров, при которых вычисляется частная производная.

Для абсолютной функции чувствительности модуля коэффициента передачи по току в индуктивной ветви от резистивности электрического контакта получена следующая расчетная модель:

$$A_R^{KL}(\omega, R, L, C) = \frac{1}{2 \sqrt{\frac{(C^2 + \omega^2 R^2 - \omega^2 C^2 LR - \omega^4 LR^3)^2}{((\omega LC)^2 + (\omega^2 LR - 1)^2)^2 \cdot (C^2 + \omega^2 R^2)^2} + \frac{[(-\omega)LC^3 - \omega^3 LR^2 C]^2}{((\omega LC)^2 + (\omega^2 LR - 1)^2)^2 \cdot (C^2 + \omega^2 R^2)^2}}} \times$$

$$\times \left[ \frac{1}{((\omega LC)^2 + (\omega^2 LR - 1)^2)^2 (C^2 + \omega^2 R^2)^2} \right] \left[ 2(C^2 + \omega^2 R^2 - \omega^2 C^2 LR - \omega^4 LR^3)(2\omega R^2 - 2\omega C^2 LR - 4\omega^3 LR^3) - \right.$$

$$\left. - \frac{2(C^2 + \omega^2 R^2 - \omega^2 C^2 LR - \omega^4 LR^3)^2 (2\omega^4 L^2 R - 2\omega^2 L)}{(\omega LC)^2 + (\omega^2 LR - 1)^2} - \frac{4(C^2 + \omega^2 R^2 - \omega^2 C^2 LR - \omega^4 LR^3)^2 \omega^2 R}{(C^2 + \omega^2 R^2)} - \right.$$

$$\left. - 4(-\omega)LC^3 - \omega^3 LR^2 C)(\omega^3 LRC) - \frac{2(-\omega)LC^3 - \omega^3 LR^2 C)^2 (2\omega^4 L^2 R - 2\omega^2 L)}{(\omega LC)^2 + (\omega^2 LR - 1)^2} - \frac{4(-\omega)LC^3 - \omega^3 LR^2 C)^2 \omega^2 R}{(C^2 + \omega^2 R^2)} \right]. \tag{15}$$

Для абсолютной функции чувствительности фазы коэффициента передачи по току в индуктивной ветви от резистивности электрического контакта получена следующая расчетная модель:

$$A_R^{\phi KL}(\omega, R, L, C) = \frac{(-2)\omega^3 LRC}{C^2 + \omega^2 R^2 - \omega^2 C^2 LR - \omega^4 LR^3} - \frac{(-\omega)LC^3 - \omega^3 LR^2 C}{(C^2 + \omega^2 R^2 - \omega^2 C^2 LR - \omega^4 LR^3)^2} (2\omega^2 R - \omega^2 C^2 L - 3\omega^4 LR^2)$$

$$= \frac{1 + \frac{((- \omega)LC^3 - \omega^3 LR^2 C)^2}{(C^2 + \omega^2 R^2 - \omega^2 C^2 LR - \omega^4 LR^3)^2}}{1 + \frac{((- \omega)LC^3 - \omega^3 LR^2 C)^2}{(C^2 + \omega^2 R^2 - \omega^2 C^2 LR - \omega^4 LR^3)^2}}. \tag{16}$$

На рис. 7 представлена зависимость относительной функции чувствительности модуля коэффициента передачи по току в индуктивной ветви от активного сопротивления контакта, а на рис. 8 — зависимость относительной функции чувствительности фазы коэффициента передачи по току в индуктивной ветви от активного сопротивления контакта.

Для сравнения влияния отдельных параметров на одну и ту же выходную характеристику используют относительную функцию чувствительности:

$$S_{q^r}^y = A_{q^r}^y \frac{q_0^r}{y_0}, \tag{17}$$

где  $A_{q^r}^y$  — абсолютная функция чувствительности;  $q_0^r$  — вектор расчетных значений параметров, при которых вычисляется частная производная  $r$ -го порядка;  $y_0$  — значения выходной характеристики при  $q_0^r$ .

Графики представляют зависимости при изменении резистивности контакта от  $10^{-4}$  до  $10^{-3}$  Ом. Данные зависимости показывают влияние изменения резистивности контакта на его коэффициент передачи по току в индуктивной ветви как по модулю, так и по фазе.



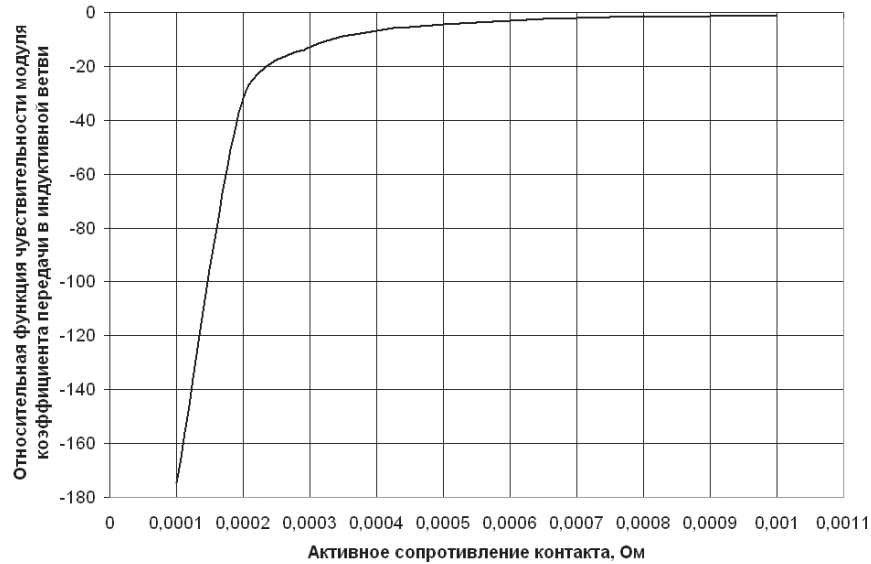


Рис. 7. Зависимость относительной функции чувствительности модуля коэффициента передачи по току в индуктивной ветви от активного сопротивления контакта

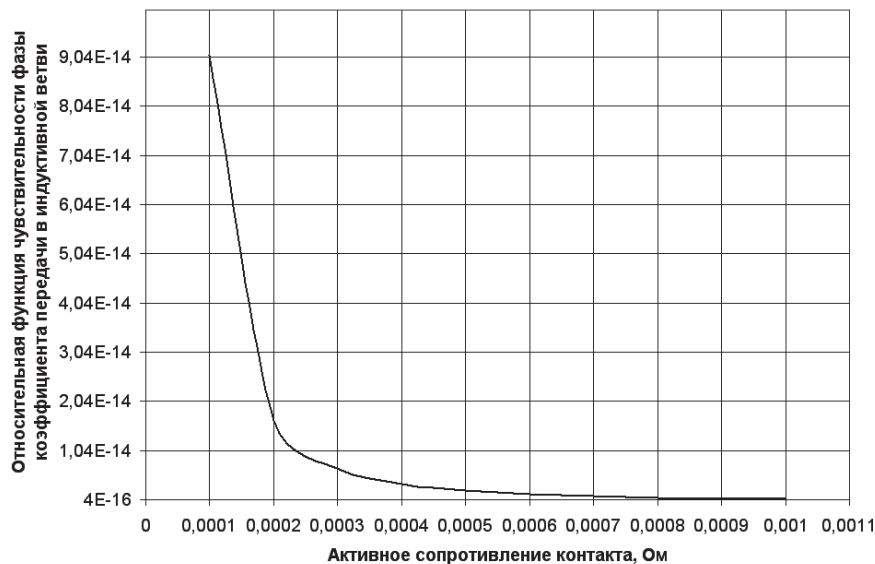


Рис. 8. Зависимость относительной функции чувствительности фазы коэффициента передачи по току в индуктивной ветви от активного сопротивления контакта

Для абсолютной функции чувствительности модуля коэффициента передачи по току в емкостной ветви от резистивности электрического контакта получена следующая расчетная модель:

$$A_R^{Kc}(\omega, R, L, C) = \frac{1}{2 \sqrt{\left[ \frac{(\omega^4 C^2 L^2 + \omega^2 C^2 R^2 - \omega^2 LC)^2}{((\omega^2 CL - 1)^2 + (\omega CR)^2)^2} + \frac{(\omega CR)^2}{((\omega^2 CL - 1)^2 + (\omega CR)^2)^2} \right]}} \times \left[ \frac{1}{((\omega^2 CL - 1)^2 + (\omega CR)^2)^2} \left[ 4(\omega^4 C^2 L^2 + \omega^2 C^2 R^2 - \omega^2 LC)\omega^2 C^2 R - 4 \frac{(\omega^4 C^2 L^2 + \omega^2 C^2 R^2 - \omega^2 LC)^2 \omega^2 C^2 R}{(\omega^2 CL - 1)^2 + (\omega CR)^2} + 2\omega^2 C^2 R - 4 \frac{\omega^4 C^4 R^3}{(\omega^2 CL - 1)^2 + (\omega CR)^2} \right] \right]. \tag{18}$$

Для абсолютной функции чувствительности фазы коэффициента передачи по току в емкостной ветви от резистивности электрического контакта получена следующая расчетная модель:

$$A_R^{\phi_{KC}}(\omega, R, L, C) = \frac{\omega \frac{C}{\omega^4 C^2 L^2 + \omega^2 C^2 R^2 - \omega^2 LC} - 2\omega^3 C^3 \frac{R^2}{(\omega^4 C^2 L^2 + \omega^2 C^2 R^2 - \omega^2 LC)^2}}{1 + \frac{\omega^2 C^2 R^2}{(\omega^4 C^2 L^2 + \omega^2 C^2 R^2 - \omega^2 LC)^2}}. \tag{19}$$

На рис. 9 и 10 представлены зависимости относительных функций чувствительности модуля и фазы коэффициента передачи по току в емкостной ветви. Графики на рис. 9 и 10 представляют зависимости при изменении резистивности контакта от  $10^{-4}$  до  $10^{-3}$  Ом. Данные зависимости показывают влияние изменения резистивности контакта на его коэффициент передачи по току в емкостной ветви как по модулю, так и по фазе.

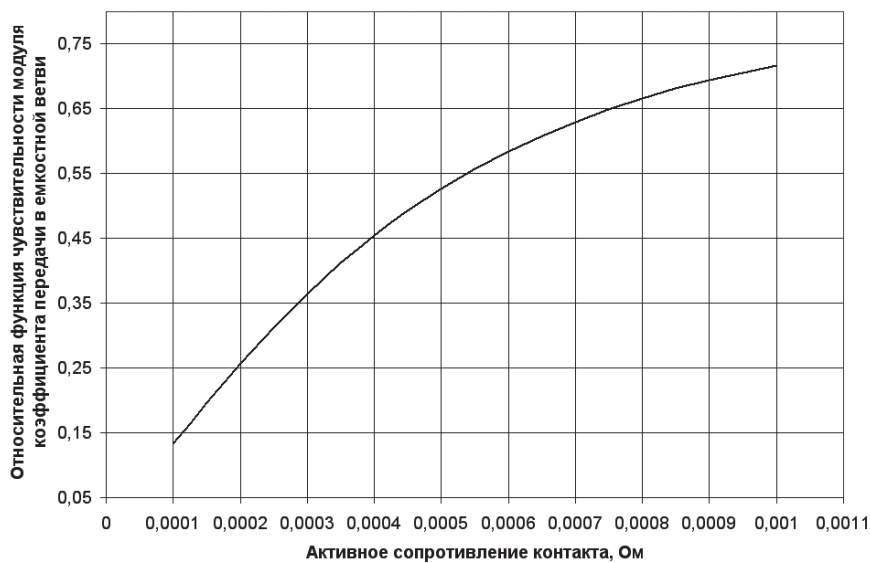


Рис. 9. Зависимость относительной функции чувствительности модуля коэффициента передачи по току в емкостной ветви от активного сопротивления контакта

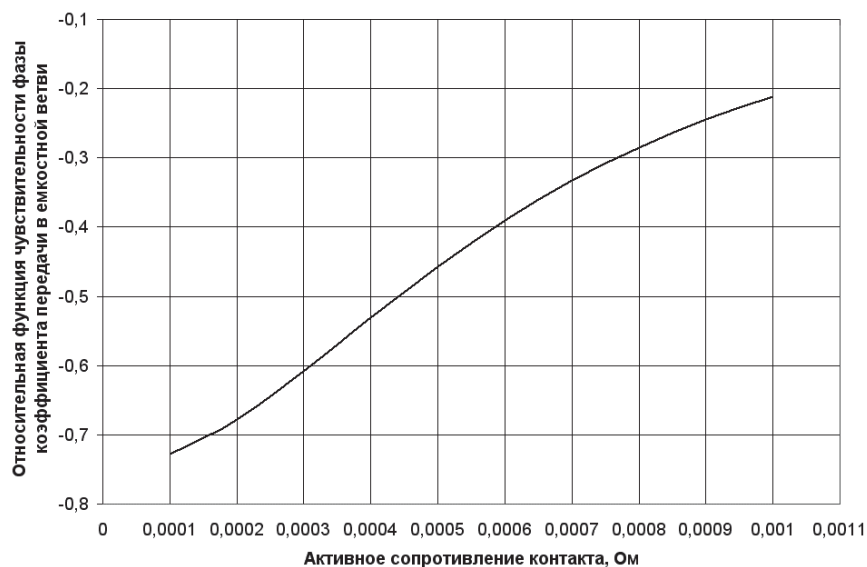


Рис. 10. Зависимость относительной функции чувствительности фазы коэффициента передачи по току в емкостной ветви от активного сопротивления контакта

Полный коэффициент передачи по току электрического контакта равен векторной сумме коэффициентов передачи по току в индуктивной и емкостной ветви:

$$\dot{K}(\omega, R, L, C) = \dot{K}_L(\omega, R, L, C) + \dot{K}_C(\omega, R, L, C).$$

В статических условиях полный коэффициент передачи по току равен единице, т.е. проходящий ток не испытывает изменений по амплитуде и фазе (не считая тепловых потерь). В динамике происходят изменения первичных электрических параметров контакта, которые влияют на проходящий ток по амплитуде и фазе.

Например, при изменении контактного усилия от  $P_{K1} = 10$  Н до  $P_{K2} = 90$  Н коэффициент передачи по току в индуктивной ветви изменяется по модулю от  $K_{L1} = 1,000139$  до  $K_{L2} = 1,000127$ , по фазе от  $\phi_{KL1} = -0,06^\circ$  до  $\phi_{KL2} = -0,02^\circ$ . Коэффициент передачи по току в индуктивной ветви при тех же условиях изменяется по модулю от  $K_{C1} = 1,058 \cdot 10^{-3}$  до  $K_{C2} = 5,091 \cdot 10^{-4}$ , по фазе от  $\phi_{KC1} = 97,54^\circ$  до  $\phi_{KC2} = 104,44^\circ$ .

При этом надо отметить, что изменение модуля коэффициента передачи по току в емкостной ветви на порядок превосходит изменение модуля коэффициента передачи по току в индуктивной ветви, а изменение фазы коэффициента передачи по току в емкостной ветви на четыре порядка превосходит изменение фазы коэффициента передачи по току в индуктивной ветви.

В динамике изменение полного коэффициента передачи электрического контакта будет равно

$$\begin{aligned} \Delta \dot{K}(\omega, R, L, C) = & \left( \left| \dot{K}_{L1} \right| - \left| \dot{K}_{L2} \right| \right) \cdot e^{j(\phi_{KL1} - \phi_{KL2})} + \\ & + \left( \left| \dot{K}_{C1} \right| - \left| \dot{K}_{C2} \right| \right) \cdot e^{j(\phi_{KC1} - \phi_{KC2})}, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $\left| \dot{K}_{L1} \right|, \left| \dot{K}_{L2} \right|, \phi_{KL1}, \phi_{KL2}$  — модули и фазы коэффициента передачи по току в индуктивной ветви в разные моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ ;

$\left| \dot{K}_{C1} \right|, \left| \dot{K}_{C2} \right|, \phi_{KC1}, \phi_{KC2}$  — модули и фазы коэффициента передачи по току в емкостной ветви в разные моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ .

Для рассматриваемого примера изменение модуля полного коэффициента передачи по току равно  $5,62 \cdot 10^{-4}$ , а изменение фазы составляет  $6,74^\circ$ .

### Выводы

Таким образом, при действии периодической механической силы на электрический контакт бу-

дет происходить периодическое изменение полного коэффициента передачи — по току по амплитуде и фазе, т.е. будет осуществляться АФМ проходящего электрического тока.

Регистрируя и анализируя спектральный состав излучения механически соединенных элементов конструкции РЭС, можно контролировать качество сборки элементов конструкции.

Проводя комплексную диагностику на основе измерения спектрального состава всего изделия, располагая измерительные антенны вокруг исследуемого изделия, можно получить достоверные оценки качества сборки как отдельных механических элементов, так и всей конструкции РЭС в целом.

### Библиографический список

1. Кириллов В.Ю., Томилин М.М. Исследование экранирующих свойств гибких материалов с целью их дальнейшего применения для защиты изделий аэрокосмической техники от электромагнитных воздействий // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 1. С. 121-125.
2. Волковский А.С., Важенин Н.А. Помехоустойчивость систем цифровой передачи информации при совместном воздействии шумовых и импульсных помех // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 6. С. 109-119.
3. Жуков П.А., Марченко М.В., Кириллов В.Ю. Влияние переходного сопротивления на эффективность экранирования бортовой кабельной сети летательных атмосферных и космических аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 121-126.
4. Юдин В.Н., Носов Н.В. Помехоустойчивость спутниковой радионавигационной системы по отношению к помехам внутрисистемного типа // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 6. С. 120-124.
5. Анненков А.М. Анализ помехоустойчивости телеметрических сигналов // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 2. С. 175-179.
6. Ткачев А.Б. Новые способы повышения помехоустойчивости сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 5. С. 72-77.
7. Важенин Н.А. Анализ совместного воздействия аддитивного белого гауссовского шума и случайных импульсных помех на помехоустойчивость информационного канала и каналов синхронизации радиолинии космической связи // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 5. С. 111-123.
8. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х., Томилин М.М. Математическая модель воздействия электростатических разрядов на бортовую кабельную сеть космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 3. С. 118-127.

9. Кириллов В.Ю., Томилин М.М. Расчет перекрестных помех в электрических цепях рулевого привода самолета // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 137-144.
10. Жихарев Д.Ю., Кириллов В.Ю. Моделирование электромагнитной обстановки в виде излучаемого электромагнитного поля во внутреннем пространстве конструкции космических аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 132-138.
11. Henkel R., Mealey D. Electromagnetic Compatibility Operational Problems Aboard the Apollo Spacecraft Tracking Ship // IEEE Electromagnetic Compatibility Symposium Record, Washington, DC, USA, 18-20 July, 1967, pp. 47-50. DOI: 10.1109/ISEMC.1967.7570013
12. Виноградов Е.М., Винокуров В.И., Харченко И.П. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. — Л.: Судостроение, 1986. — 264 с.
13. Воршевский А.А., Воршевский П.А., Агафонов А.М. Испытания на электромагнитную совместимость электронного оборудования, расположенного на ходовом мостике судна // Технологии электромагнитной совместимости. 2007. № 2(21) С. 10-21.
14. Кравченко В.И. Устранение контактных помех // Техника и вооружение. 1973. № 1. С. 36-37.
15. Лютов С.А. Контактные помехи // Техника и вооружение. 1969. № 5. С. 22-23.
16. Григорьев А.Г., Матисен А.И., Патрин В.С. Защита радиоприема на судах от помех. — Л.: Судостроение, 1973. — 208 с.
17. Петров Б.В., Грачев Н.Н. Способ контроля качества сборки блоков радиоэлектронных средств. Патент РФ 2054839. Бюлл. № 5, 20.02.96.
18. Клементенко А.Я., Панов Б.А., Свешников В.Ф. Контактные помехи радиоприему. — М.: Воениздат, 1979. — 116 с.
19. Лазарев Д.В. Анализ активной и реактивных составляющих переходного электрического сопротивления контакта // Проектирование телекоммуникационных и информационных средств и систем: Сб. научных трудов / Под ред. Л.Н. Кечиева. — М.: МИЭМ, 2007. С. 56-63.
20. Грачев Н.Н., Лазарев Д.В. Оценка качества контактных соединений, подвергающихся внешним механическим и коррозионным воздействиям, по критериям ЭМС // Качество. Инновации. Образование. 2008. № 11(42). С. 53-61.
21. Грачев Н.Н., Лазарев Д.В. Измерение спектрально-энергетических характеристик контактных радиопомех типовых механических соединений и построение их эксплуатационных макромоделей // Измерительная техника. 2009. № 1. С. 57-61.

## QUALITY EVALUATION OF AIRCRAFT ELECTRONIC INSTRUMENTATION ASSEMBLING BASED ON REGISTRATION AND ANALYSIS OF MECHANICAL JOINTS ELECTROMAGNETIC EMISSION

Grachev N.N.

*Higher School of Economics,  
20, Myasnitskaya str., Moscow, 101000, Russia  
e-mail: nngrachev@mail.ru*

### Abstract

The scientific significance of the results outlined in the work consists in studying mechanisms of contact radio interference originating, occurring due to the magnetic field effect of radio transmitters, located onboard an aircraft, on current-conducting mechanical contacts of the structures with non-linear variable resistance, as well as electromagnetic interference generation. The scientific results obtained from the studies demonstrated mechanisms of forming the current, induced by EMF, passing through the aircraft structural elements, which leads to formation of a mechanism of secondary electromagnetic field radiation, interacting with the primary irradiating magnetic field of the radio transmitter. There is a possibility to control

the structural elements assembly quality by registering and analyzing the spectral composition of the electromagnetic radiation of the mechanically connected structural elements. Performing complex diagnostics, based on measuring the spectral content of the whole product, and placing antennae around the product under study allows performing reliable estimations of the assembly quality of both separate mechanic components and the entire structure.

The studies performed in this work can be applied to the development and study of a contactless express-method for assessing the structures assembly and erection quality. This method is based on the registration and analysis of artificially generated contact interference under the impact of mechanical vibrations and a high-

frequency harmonic electrical signal on the aircraft structures' elements, forming phase-amplitude-modulated oscillation circuits, which can be recorded by either spectrum analyzer or a FAM receiver, or AM oscillations. With this, the levels of their spectral components are measured at a change of mechanical impacts frequency in the range determined by the operating conditions. The measured level of the spectral components of the emitted amplitude-modulated oscillations is compared with the level of the spectral components of the signal emitted by the reference block with given mechanical parameters and normalized level of contact interference.

The main result of these studies allows fruitfully employ the contact interference formation, considered as undesirable phenomenon in the field of electromagnetic compatibility, for estimating the mechanical qualities of the structures (their assembly quality) of various aircraft equipment and units, including assembly and erection quality (especially associated with fixture elements tightening force).

**Keywords:** flying vehicles, electronic instrumentation, assembly quality, diagnostics, mechanical joints, electromagnetic emission, contact interference.

## References

1. Kirillov V.Yu., Tomilin M.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 121-125.
2. Volkovskii A.S., Vazhenin N.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2010, vol. 17, no. 6, pp.109-119.
3. Zhukov P.A., Marchenko M.V., Kirillov V.Yu. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2017, vol. 24, no.3, pp. 121-126.
4. Yudin V.N., Nosov N.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2010, vol. 17, no.6, pp. 120-124.
5. Annenkov A.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 175-179.
6. Tkachev A.B. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 5, pp. 72-77.
7. Vazhenin N.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2013, vol. 20, no. 5, pp. 111-123.
8. Kirillov V.Yu., Klykov A.V., Nguen V.Kh., Tomilin M.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 118-127.
9. Kirillov V.Yu., Tomilin M.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 137-144.
10. Zhikharev D.Yu., Kirillov V.Yu. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 132-138.
11. Henkel R., Mealey D. Electromagnetic Compatibility Operational Problems Aboard the Apollo Spacecraft Tracking Ship. *IEEE Electromagnetic Compatibility Symposium Record, Washington, DC, USA, 18-20 July, 1967*, pp. 47-50. DOI: 10.1109/ISEMC.1967.7570013
12. Vinogradov E.M., Vinokurov V.I., Kharchenko I.P. *Elektromagnitnaya sovместimost' radioelektronnykh sredstv* (Electromagnetic compatibility of radio electronic means), Leningrad, Sudostroenie, 1986, 264 p.
13. Vorshevskii A.A., Vorshevskii P.A., Agafonov A.M. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovместimosti*, 2007, no. 2(21), pp. 10-21.
14. Kravchenko V.I. *Tekhnika i vooruzhenie*, 1973, no. 1, pp. 36-37.
15. Lyutov S.A. *Tekhnika i vooruzhenie*, 1969, no. 5, pp. 22-23.
16. Grigor'ev A.G., Matisen A.I., Patrin V.S. *Zashchita radiopriema na sudakh ot pomekh* (Radio reception protection from interference on vessels), Leningrad, Sudostroenie, 1973, 208 p.
17. Petrov B.V., Grachev N.N. *Patent RF 2054839*, 20.02.96.
18. Klementenko A.Ya., Panov B.A., Sveshnikov V.F. *Kontaktnye pomekhi radiopriemu* (Contact interference to radio reception), Moscow, Voenizdat, 1979, 116 p.
19. Lazarev D.V. *Proektirovanie telekommunikatsionnykh i informatsionnykh sredstv i system. Sbornik nauchnykh trudov*, Moscow, MIEM, 2007, pp. 56-63.
20. Grachev N.N., Lazarev D.V. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie*, 2008, no. 11(42), pp. 53-61.
21. Grachev N.N., Lazarev D.V. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2009, no. 1, pp. 57-61.