

Сравнение измеренных частотных характеристик печатных плат с модальным резервированием до и после отказа при разных температурах

А. Алхадж Хасан, Т. Р. Газизов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

✉ alhaj.hasan.adnan@yandex.ru

Аннотация

Введение. Модальное резервирование (МР) – новый способ резервирования электрических цепей за счет сильной электромагнитной связи между их проводниками, не только повышающий надежность, но и обеспечивающий электромагнитную совместимость. МР может быть полезным для критически важных радиоэлектронных устройств, например космических аппаратов, которые должны работать не только стабильно и непрерывно, но и при экстремальных температурах. Между тем до сих пор МР исследовалось только при комнатной температуре, без учета климатических условий.

Цель работы. Представление результатов экспериментального исследования частотных характеристик печатных плат с МР при низкой и высокой температурах для оценки эффективности МР до и после отказов.

Материалы и методы. В НПЦ "Полюс" (г. Томск) изготовлены макеты печатных плат (ПП) из отечественного материала марки СТФ, содержащие микрополосковую линию без МР и с его применением, имитирующие работу без отказов и с отказами двух видов. С помощью векторного анализатора цепей исследовались частотные зависимости S -параметров макетов при изменении температуры в климатической камере тепла-холода от -50 до 150 °С. Измерялись коэффициенты передачи и отражения в обоих направлениях распространения сигналов.

Результаты. Показано, что в рабочей цепи печатных плат с МР при повышении температуры от комнатной до 150 °С все S -параметры увеличиваются максимально до 2 дБ при отсутствии отказов и до 29 дБ при их наличии. При снижении температуры до -50 °С эти параметры увеличиваются максимально до 0.8 дБ при отсутствии отказов и до 23 дБ при их наличии. При низкой температуре наблюдается повышение резонансных частот до 500 МГц, а при высокой – их снижение. Выявлено, что почти во всем исследуемом диапазоне частот параметры $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ для печатных плат с МР до 1.2 дБ меньше, чем без МР, а после отказов до 0.5 дБ меньше, чем до отказов. Параметры $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ после отказа типа короткого замыкания в среднем на 5 дБ меньше, чем до отказа и без МР, а после отказа типа холостого хода – на 4 дБ выше.

Заключение. Показано, что эффект МР сохраняется после отказа, почти не влияя на полезный сигнал, за исключением высоких температур, при которых диапазон рабочих частот полезного сигнала может значительно уменьшиться. В перспективе целесообразно уменьшение чувствительности характеристик к изменению температуры за счет выбора других материалов ПП, а также исследование излучаемых эмиссий от печатных плат с МР до и после отказов при влиянии климатических условий.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, модальное резервирование, надежность, сверхкороткий импульс, излучаемые эмиссии, температура, отказы

Для цитирования: Алхадж Хасан А., Газизов Т. Р. Сравнение измеренных частотных характеристик печатных плат с модальным резервированием до и после отказа при разных температурах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 2. С. 37–51. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-37-51

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование поддержано Российским научным фондом (проект 19-19-00424) и Министерством науки и высшего образования (проект FEWM-2022-0001) в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники.

Статья поступила в редакцию 12.10.2022; принята к публикации после рецензирования 20.02.2023; опубликована онлайн 28.04.2023



Comparing the Measured Frequency Characteristics of PCBs with Modal Reservation Before and After Failure at Different Temperatures

Adnan Alhaj Hasan, Talgat R. Gazizov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

✉ alhaj.hasan.adnan@yandex.ru

Abstract

Introduction. Modal reservation (MR) is a new way of reserving electrical circuits by means of strong electromagnetic coupling between their conductors, which not only increases their reliability, but also ensures their electromagnetic compatibility. Although showing much promise for critical radio electronic devices, MR has so far been studied exclusively at room temperature, without taking climatic conditions into account.

Aim. Presentation of the results of an experimental study into the frequency characteristics of printed circuit boards (PCBs) with MR based on coupled microstrip lines under climatic impacts in the form of low and high temperatures to evaluate the MR effectiveness before and after failures.

Materials and methods. PCB prototypes based on a microstrip line from a domestic material of the STF brand without and with MR (before and after two types of failure) were manufactured at the Polyus research and production center, Tomsk, Russia. These prototypes simulated the device operation before and after two types of failures. Using a vector network analyzer, frequency dependences of *S*-parameters of the prototypes were experimentally investigated in a heat-cold climatic chamber at temperatures ranging between minus 50 and 150 °C. Transmission and reflection coefficients in both directions of signal propagation were measured.

Results. It is shown that for the working circuit of PCBs with MR, before and after failures, an increase in temperature from room temperature to 150 °C leads to a decrease in the transmission and reflection coefficients in both directions (to a maximum of 2 dB and 29 dB, respectively). Conversely, a decrease in temperature results in an increase in these coefficients (to a maximum of 0.8 dB and 23 dB, respectively). At low and high temperatures, a shift of resonances (up to 500 MHz) towards high and low frequencies, respectively, is observed.

Conclusion. The MR effect is shown to remain after failure, having almost no influence on the useful signal, except at high temperatures, at which the operating frequency range of the useful signal can be significantly reduced. Future research should be aimed at reducing the sensitivity of the characteristics to temperature changes by means of selecting other PCB materials, as well as at investigating the radiated emissions from PCBs with MR before and after failures under the impact of climatic conditions.

Keywords: electromagnetic compatibility, modal reservation, reliability, ultrashort pulse, radiation, temperature, failures

For citation: Alhaj Hasan A., Gazizov T. R. Comparing the Measured Frequency Characteristics of PCBs with Modal Reservation Before and After Failure at Different Temperatures. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 1, pp. 37–51. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-37-51

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. The research was supported by the Russian Science Foundation (project 19-19-00424) and the Ministry of Science and Higher Education (project FEWM-2022-0001) at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Submitted 12.10.2022; accepted 20.02.2023; published online 28.04.2023

Введение. Модальное резервирование (МР), предложенное для защиты радиоэлектронных устройств (РЭУ) от сверхширокополосных импульсов, основано на известном подходе, называемом модальной фильтрацией (МФ) [1]. Эффекта защиты можно достичь, если длительность импульса меньше, чем разни-

ца задержек его мод, распространяющихся в связанных проводниках. В этом случае импульс будет разложен на серию малых импульсов.

Недостатком МФ без МР является необходимость трассировки дополнительного (пассивного) проводника, сильно связанного с активным (для любой цепи). При наличии МР роль

пассивного проводника выполняет одноименный проводник резервной цепи [2]. Благодаря связи между проводниками резервируемой и резервирующей цепей ПП может быть достигнут эффект МФ [3], но только для ПП, изготовленных с определенными параметрами стека и трасс [4]. Таким образом, МР может повысить надежность РЭУ, поскольку резервирующая цепь ПП продолжит работу в случае любого отказа резервируемой цепи, а также обеспечит их электромагнитную совместимость [5]. В связи с этим МР превосходит классический подход холодного резервирования, основанный только на резервировании и избыточности [6], [7]. В результате МР может быть полезным при проектировании критически важных РЭУ [8], [9].

Такие РЭУ, например в космических аппаратах, должны работать стабильно и непрерывно, в том числе и при экстремальных температурах [10]. До сих пор исследователи интенсивно изучали характеристики ПП с МР до и после отказа с точки зрения кондуктивной эмиссии [11–13]. Однако эти исследования проводились только при комнатной температуре. Частотные характеристики ПП с МР и их изменения после отказов с учетом климатических условий не исследовались. В связи с этим важно исследовать характеристики ПП с МР для оценки его эффективности, особенно после отказов типа короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ). Такая оценка важна для дальнейших исследований излучения от ПП с МР с помощью ТЕМ-камеры [14].

В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования частотных характеристик ПП с МР на основе боковой

связи при климатическом воздействии (низкой и высокой температурах) для оценки эффективности МР до и после отказов. В статье описаны исследуемые конструкции, а также экспериментальная установка и используемые приборы. Далее приведены и проанализированы полученные частотные зависимости параметров ПП с МР до и после отказов. В заключение представлен анализ результатов и намечены направления дальнейшей работы.

Исследуемые структуры и используемые приборы. Исследования характеристик и отказов ПП с резервированием и без него в различных температурных условиях выполнены на макетах ПП с размерами 98×98 мм: одиночная микрополосковая линия (МПЛ) без МР (рис. 1, а) и связанные МПЛ с различными граничными условиями: МПЛ, согласованные с обеих сторон резисторами (рис. 1, б), с КЗ (рис. 1, в) и ХХ (рис. 1, г) на одном конце резервирующего (пассивного) проводника. Длина МПЛ около 60 мм, отводы МПЛ до субминиатюрных соединителей версии А (SMA) с каждой стороны имеют длину 10 мм, отступ соединителей от краев платы 10 мм.

Поперечные сечения исследуемых структур (рис. 2) имеют следующие размеры: ширина проводников $w = 255$ мкм; толщина проводников $t = 105$ мкм; расстояние между активным и пассивным проводниками $s = 450$ мкм; расстояние от края диэлектрика до активного проводника $d = 38.8$ мм; толщина подложки $h = 290$ мкм; относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 4.7$ (материал СТФ).

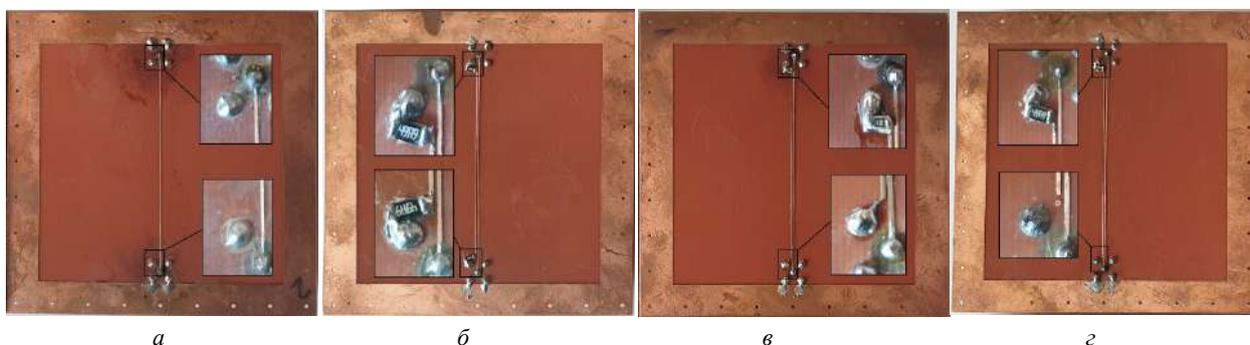


Рис. 1. Макеты печатных плат: а – одиночная МПЛ; б–г – связанные МПЛ (б – обе МПЛ согласованы с обоих концов; в – КЗ резервирующей МПЛ на нижнем вводе; г – ХХ резервирующей МПЛ на нижнем вводе)

Fig. 1. Printed circuit models: а – Single MSL; б–г – coupled MSLs (б – both MSLs are matched at both ends; г – short circuit of the reserve MSL at the lower input; г – open circuit of the reserve MSL at the lower input)

Сравнение измеренных частотных характеристик печатных плат с модальным резервированием до и после отказа при разных температурах
Comparing the Measured Frequency Characteristics of PCBs with Modal Reservation Before and After Failure at Different Temperatures

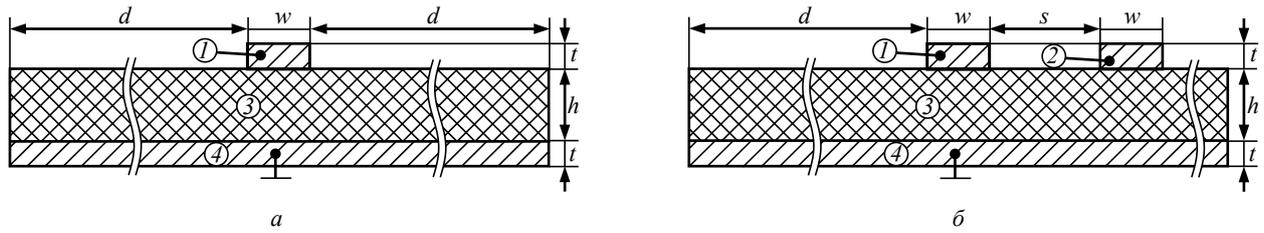


Рис. 2. Поперечные сечения исследуемых структур: а – без МР; б – с МР
 (1 – активный проводник; 2 – пассивный проводник; 3 – диэлектрическая подложка; 4 – общий провод)

Fig. 2. Cross sections of the structures under study: а – without MR; б – with MR
 (1 – active conductor; 2 – passive conductor; 3 – dielectric substrate; 4 – common wire)

Экспериментальные исследования. На рис. 3 приведены эквивалентные схемы подключения исследуемых макетов в процессе измерений: ПП без МР (рис. 3, а), ПП с МПЛ, согласованными с обеих сторон (рис. 3, б), ПП с КЗ (рис. 3, в) и с ХХ (рис. 3, г) на одном конце пассивного проводника. Прямоугольниками обозначены отрезки одиночной или связанных линий передачи длиной l , описываемые матрицами погонных параметров L, C, R, G . Согласование произведено резисторами $R1 = R2 = R3 = R4 = 50$ Ом в соответствии с волновым сопротивлением измерительных трактов приборов. Возбуждение активного проводника МПЛ выполнено источником гармонического воздействия с амплитудой ЭДС 1 В.

Экспериментальные исследования макетов состояли в изучении частотных зависимостей S -параметров макетов МПЛ при изменении тем-

пературы от -50 до 150 °С. Исследования проведены на установке в составе векторного анализатора цепей (ВАЦ) R&S ZVA 40 и климатической испытательной камеры ESPEC SU-262 (рис. 4, а). Размещенные в климатической камере макеты ПП (рис. 4, б) соединялись с ВАЦ измерительными кабелями Rohde Schwarz ZVZ195 (внешний кабель) и Semflex 60637 (термостабильный внутренний кабель).

В качестве результатов исследований далее рассмотрены частотные зависимости S -параметров макетов ПП при различных температурах $|S_{pq}|_{t^{\circ}}$ ($p, q = 1, 2; t = -50; 23; 150$ °С): комнатной $t = 23$ °С, низкой $t = -50$ °С и высокой $t = 150$ °С, а также разности этих параметров при различных указанных температурах

$$\Delta S_{pq|t_1^{\circ}t_2^{\circ}} = |S_{pq|t_1^{\circ}}| - |S_{pq|t_2^{\circ}}|.$$

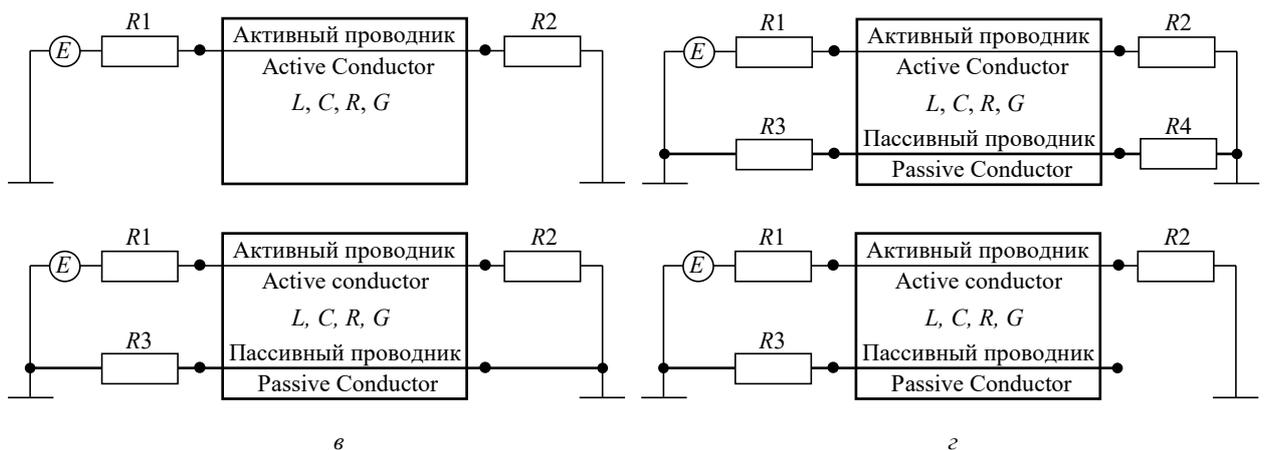


Рис. 3. Эквивалентные схемы макетов МПЛ: а – без МР; б – с МР при полном согласовании пассивного проводника; в – с МР при КЗ пассивного проводника на выходе; г – с МР при ХХ пассивного проводника на выходе

Fig. 3. Equivalent circuits of microstrip layout: а – without MR; б – with MR in case of full matching of the passive conductor; в – with MR in case of a short circuit of the passive conductor at the output; г – with MR in case of an idle of the passive conductor at the output

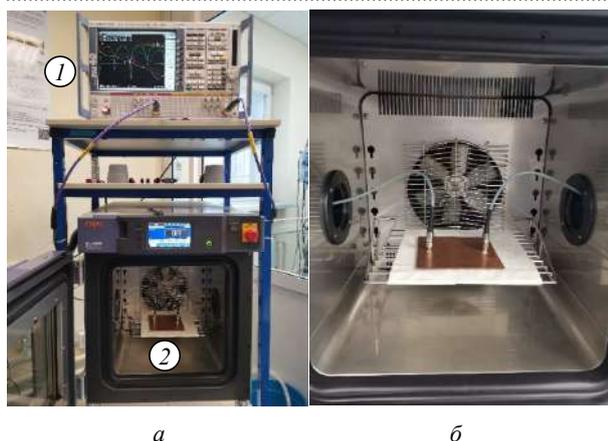


Рис. 4. Экспериментальная установка (а), макет ПП в климатической камере (б) (1 – ВАЦ R&S ZVA 40; 2 – климатическая камера)

Fig. 4. Experimental installation (a), circuit board layout in a climatic chamber (b) (1 – ВАЦ R&S ZVA 40; 2 – climatic chamber)

S-параметры ПП без МР. Частотные зависимости S -параметров для ПП без МР при разных температурах представлены на рис. 5. На рис. 6 приведены частотные зависимости разницы значений S -параметров для ПП без МР при -50 и 150 °С и значений при комнатной температуре (23 °С).

Как показано на рис. 5, 6, все S -параметры ПП уменьшаются с ростом температуры и увеличиваются с ее уменьшением по сравнению с результатами, полученными при комнатной температуре. Например, максимальное отклонение $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ от значений при комнатной температуре составило 1.63 дБ (разница растет с ростом частоты), а от -50 до 150 °С – 2.28 дБ, тогда как для $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ – 10 дБ и более 20 дБ соответственно. С понижением температуры заметно повышение резонансных частот с уменьшением значений $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ и увеличением $|S_{22}|$ и $|S_{11}|$, причем с ростом частоты этот сдвиг увеличивается и достигает 0.5 ГГц. Из-за этого сдвига наблюдаются колебания результатов $|S_{22}|$ и $|S_{11}|$ в резонансных областях. На высокой температуре наблюдается обратный эффект изменения резонансных частот и значений S -параметров. Диапазон рабочих частот, определенный по уровню -3 дБ $|S_{21}|$, при низкой и комнатной температурах превышает 5 ГГц, а на высокой температуре уменьшается

до 4.77 ГГц. Указанные эффекты объясняются изменением характеристик МПЛ с изменением температуры, связанным с изменением диэлектрической проницаемости и геометрических параметров линии.

S-параметры ПП с МР в нормальном режиме работы. Частотные зависимости S -параметров для ПП с МР при разных температурах представлены на рис. 7. Частотные зависимости разницы значений S -параметров для ПП с МР при -50 и 150 °С и значений при комнатной температуре приведены на рис. 8.

Из рис. 7, 8 для ПП с МР можно сделать такие же выводы, что и для ПП без МР. Разница значений $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ при низкой и комнатной температурах увеличивается с ростом частоты до 0.74 дБ и до 2 дБ – при комнатной и высокой. Разница в значениях $|S_{11}|$ значительно увеличивается на резонансных частотах, достигая 22 дБ на низкой температуре и 17 дБ – на высокой. Разница в значениях $|S_{22}|$ больше, чем для $|S_{11}|$, особенно при высокой температуре. Однако в линейной мере эти различия незначительны. Диапазон рабочих частот МПЛ уменьшается и на высоких температурах составляет 3.48 ГГц. При низкой температуре заметен сдвиг резонансов в сторону более высоких частот с уменьшением значений $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ и увеличением $|S_{22}|$ и $|S_{11}|$. При высокой температуре сдвиг наблюдается в сторону низких частот. Следует отметить, что различия в результатах измерений для $|S_{22}|$ и $|S_{11}|$ обусловлены асимметрией исследуемой структуры относительно плоскости, расположенной поперек ее проводников посередине структуры, а также различием граничных условий в начале и в конце структуры (нагрузки, соединители и неоднородности).

S-параметры ПП с МР при отказе типа КЗ. Частотные зависимости S -параметров для ПП с МР при КЗ на одном конце пассивного проводника при разных температурах представлены на рис. 9. Частотные зависимости разницы значений этих параметров при -50 и 150 °С и значений при комнатной температуре приведены на рис. 10.

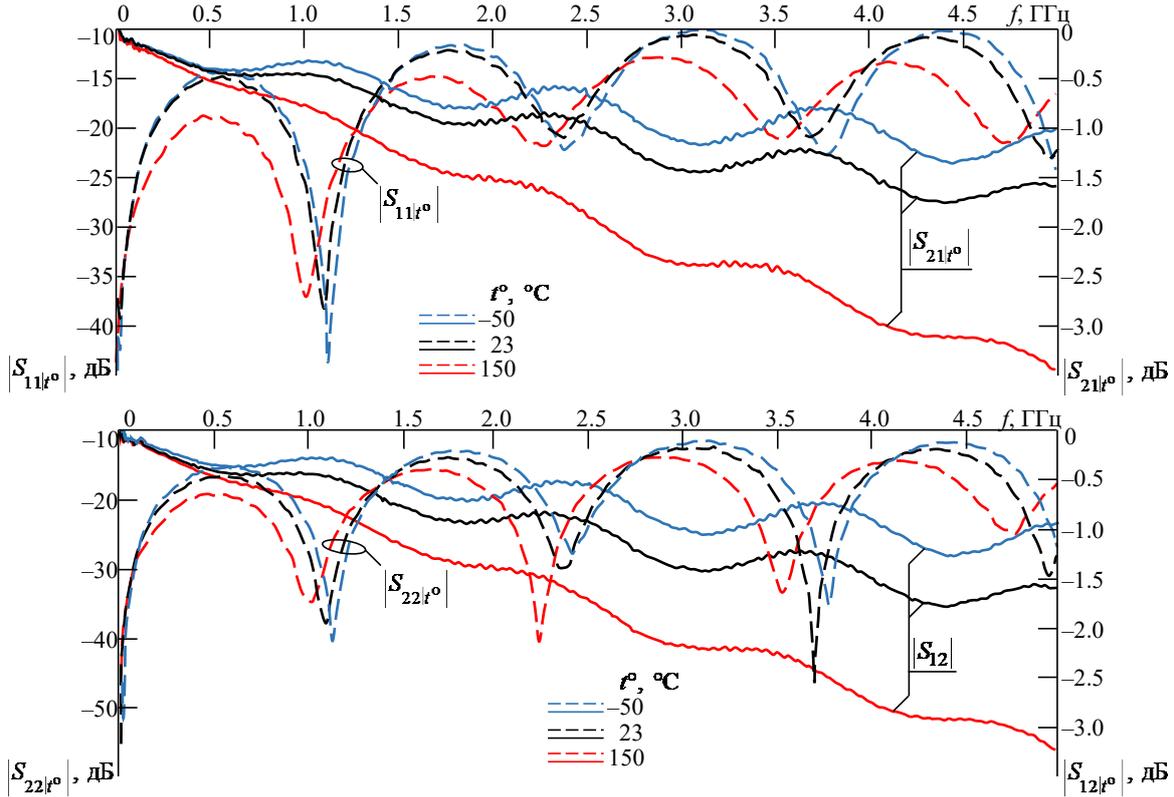


Рис. 5. Частотные зависимости S -параметров печатных плат без МР при разных температурах
 Fig. 5. Frequency dependences of S -parameters of printed circuit boards without MR at different temperatures

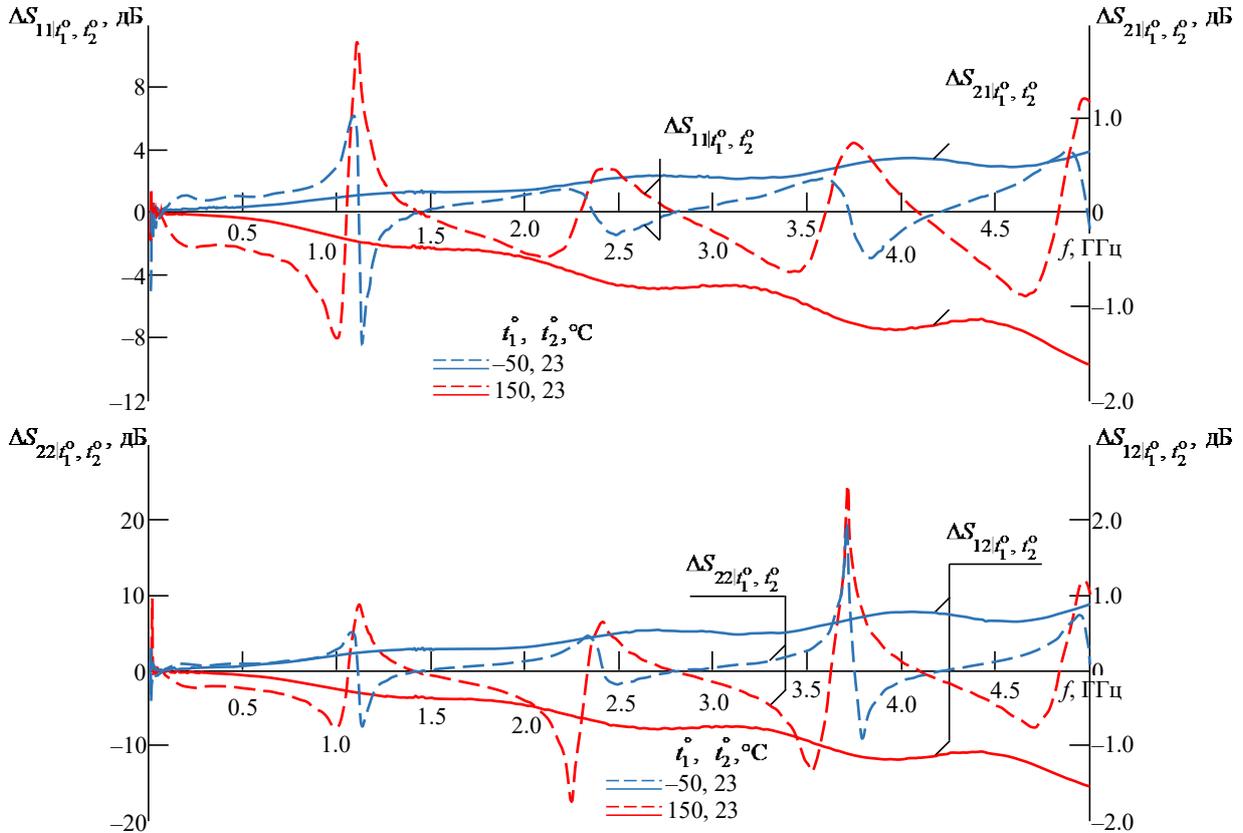


Рис. 6. Частотные зависимости разницы значений S -параметров печатных плат без МР при температурах -50 и 150 °C и при комнатной температуре

Fig. 6. Frequency dependences of the difference in S -parameters of printed circuit boards without MR at temperatures of -50 and 150 °C and at room temperature

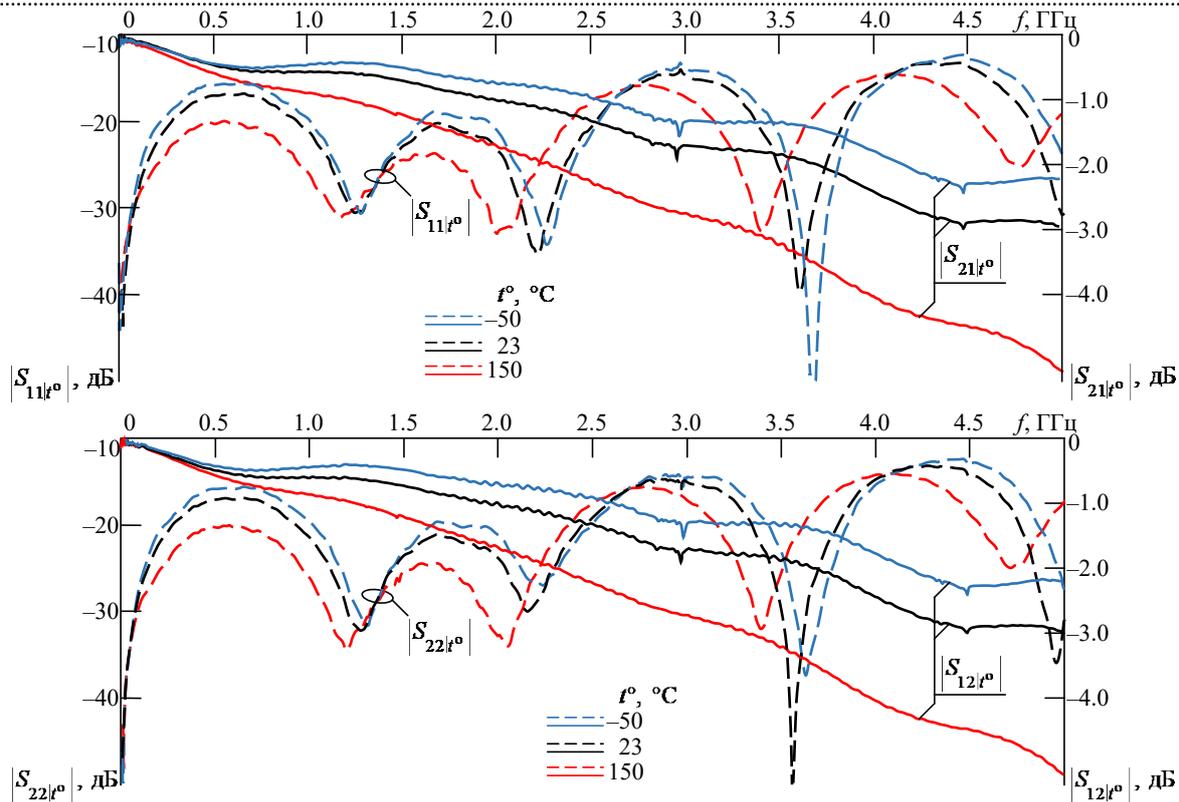


Рис. 7. Частотные зависимости S -параметров печатных плат с МР при разных температурах

Fig. 7. Frequency dependences of S -parameters of printed circuit boards with MR at different temperatures

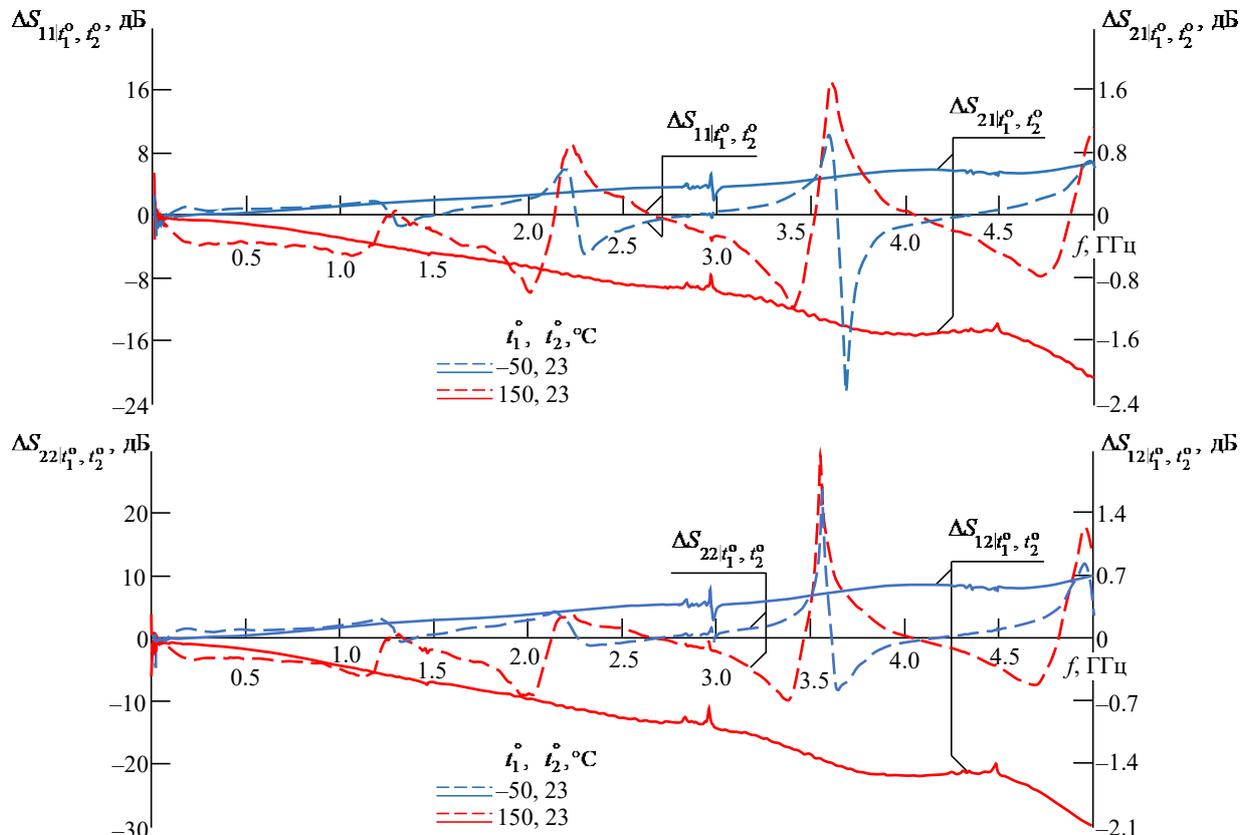


Рис. 8. Частотные зависимости разницы значений S -параметров печатных плат с МР при температурах -50 и 150 °C и при комнатной температуре

Fig. 8. Frequency dependences of the difference in S -parameters of printed circuit boards with MR at temperatures of -50 and 150 °C and at room temperature

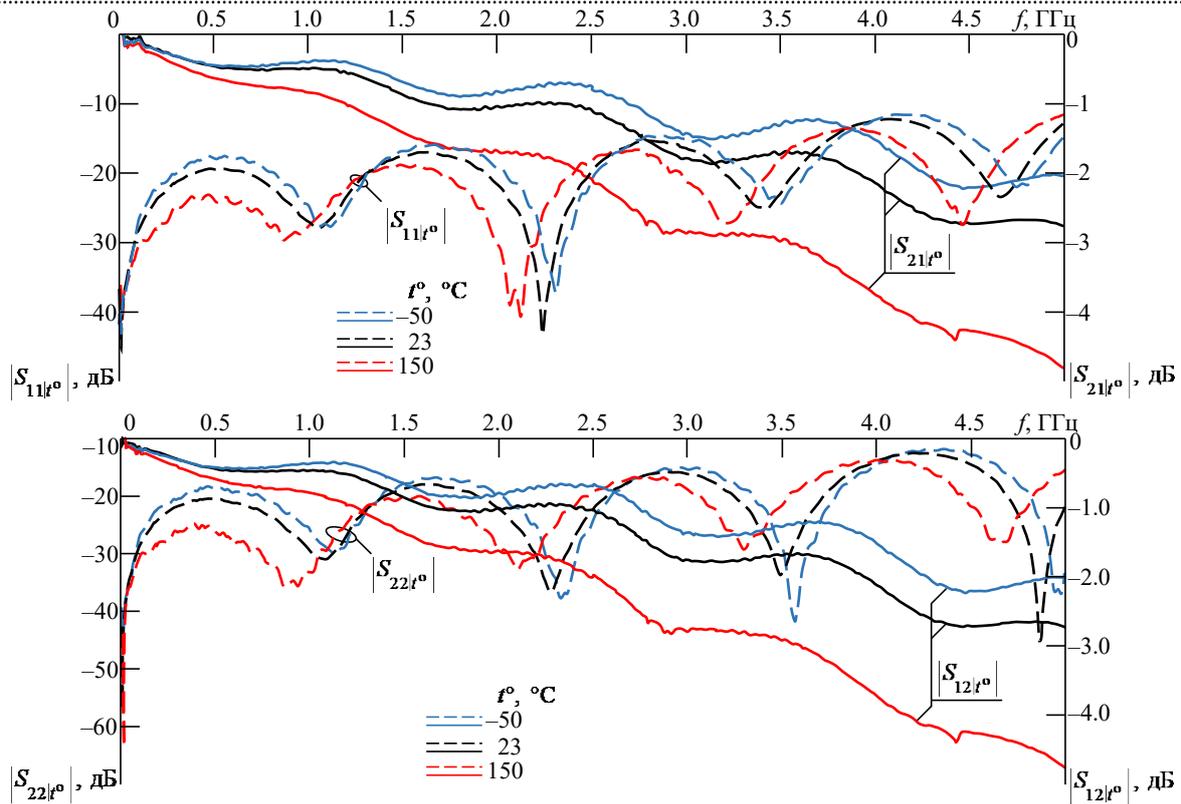


Рис. 9. Частотные зависимости S -параметров печатных плат с МР и отказом типа КЗ при разных температурах
 Fig. 9. Frequency dependences of S -parameters of printed circuit boards with MR and SC type failure at different temperatures

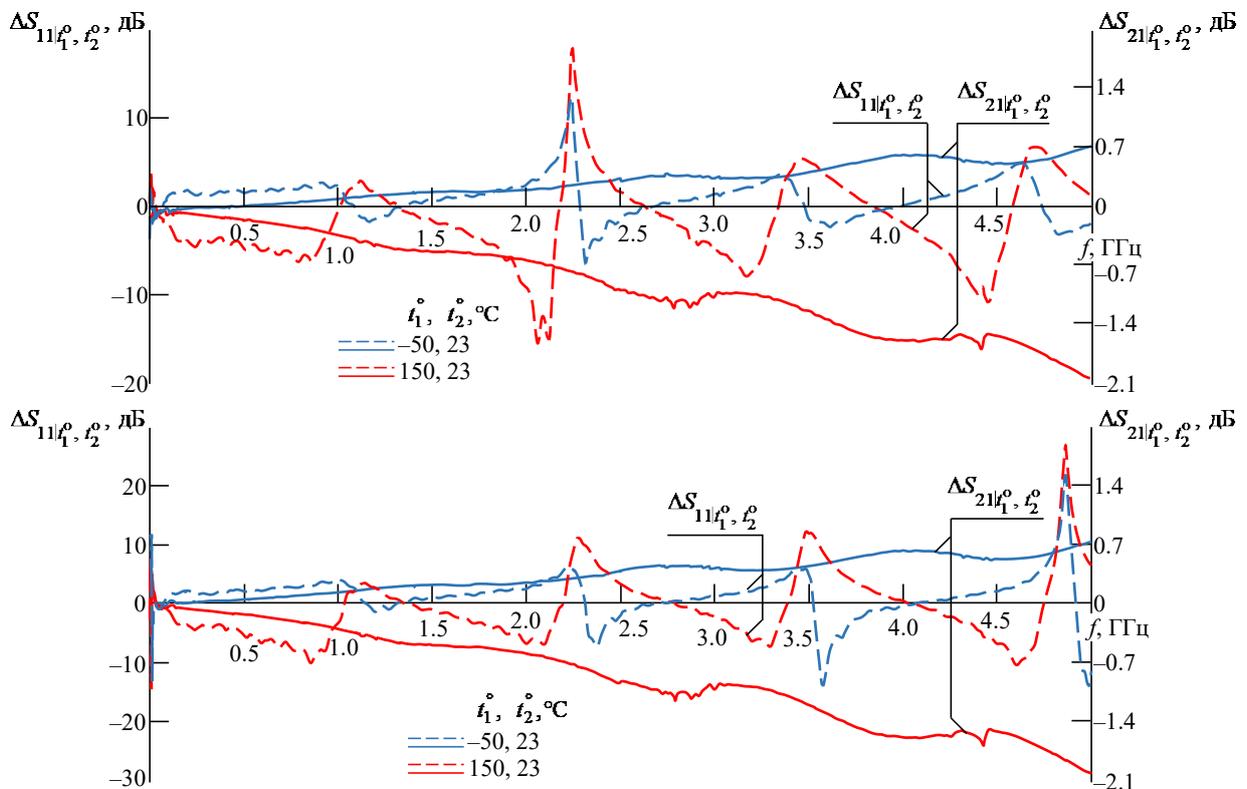


Рис. 10. Частотные зависимости разницы значений S -параметров печатных плат с МР после отказа типа КЗ при температурах -50 и 150 °C и при комнатной температуре

Fig. 10. Frequency dependences of the difference in S -parameters of printed circuit boards with MR after SC type failure at temperatures of -50 and 150 °C and at room temperature

Из сравнения рис. 7 и 9 следует, что значения S -параметров для ПП с МР при отказе типа КЗ отличаются от значений для ПП с МР без отказа максимум на 0.5 дБ. Кроме того, из-за отражения на концах линии наблюдается снижение резонансных частот до 0.4 ГГц, что увеличивает расхождение между значениями S -параметров вблизи этих частот. Из сравнения рис. 8 (нормальный режим) и рис. 10 (отказ типа КЗ) следует, что разницы $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ при низких температурах относительно комнатной температуры уменьшаются максимум на 0.2 дБ, на высоких – на 0.4 дБ. Разницы $|S_{11}|$ различаются на 12 дБ при низких температурах и на 17 дБ – при высоких, а для $|S_{22}|$ разницы выше в среднем на 5 дБ, чем для $|S_{11}|$. Диапазон рабочих частот полезного сигнала на высоких температурах уменьшается до 3.54 ГГц. Максимальное отклонение значений $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ от значений при комнатной температуре на частоте 5 ГГц составляет 2 дБ (разница увеличивается с ростом частоты), а от -50 до 150 °С – около 2.8 дБ. Максимальное расхождение для значений $|S_{12}|$ и

$|S_{21}|$ при низких температурах составляет 0.72 дБ, а при высоких – 2.05 дБ. Средняя разница составляет около 0.32 дБ при низких температурах и 0.9 дБ – при высоких. Максимальная разница для значений $|S_{22}|$ и $|S_{11}|$ при низких температурах составляет 21.5 дБ, а при высоких – 26.3 дБ, а средняя – около 2.9 и 4.5 дБ соответственно. Следует отметить, что дополнительные различия в результатах измерений $|S_{22}|$ и $|S_{11}|$ после отказа типа КЗ обусловлены влиянием изменения симметрии граничных условий на концах проводника в эксперименте (отказ происходит на одном фиксированном конце). В результате условия распространения сигналов в противоположных направлениях различны.

S -параметры ПП с МР при отказе типа ХХ. Частотные зависимости S -параметров для ПП с МР при ХХ на одном конце пассивного проводника при разных температурах представлены на рис. 11. Частотные зависимости разницы значений этих параметров при -50 и 150 °С и значений при комнатной температуре приведены на рис. 12.

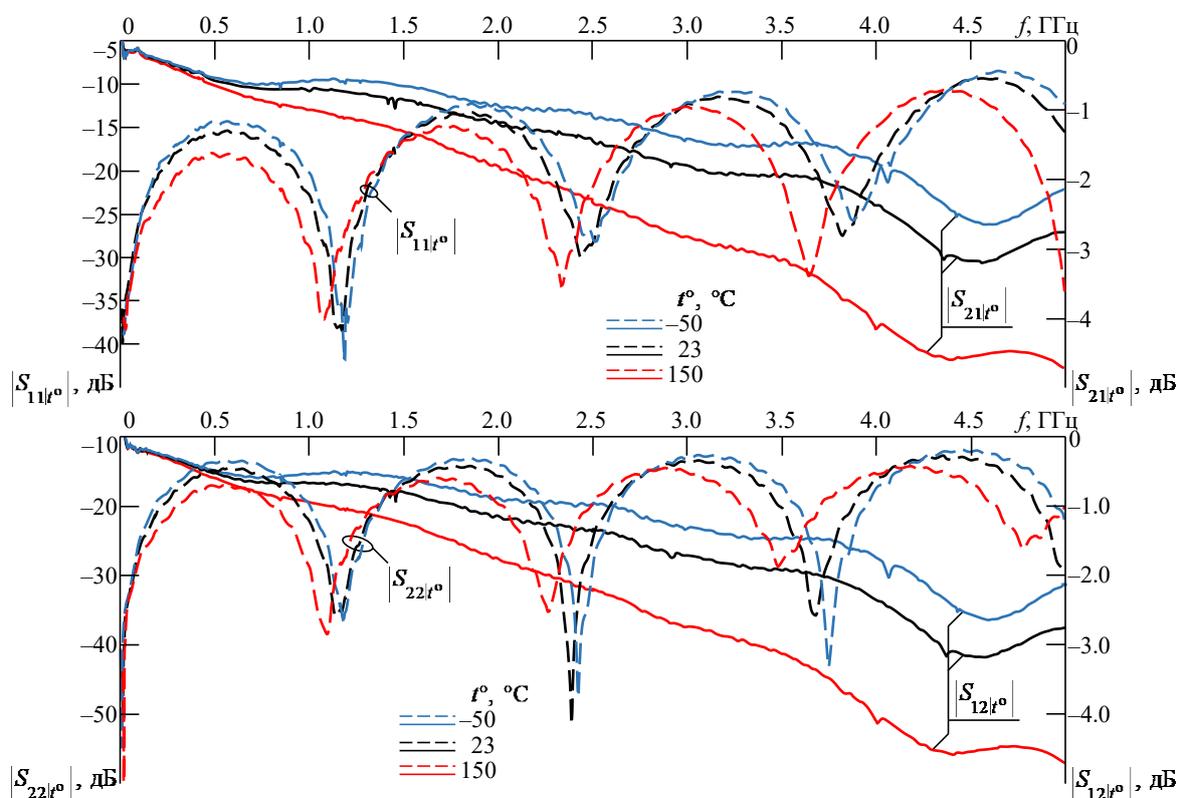


Рис. 11. Частотные зависимости S -параметров печатных плат с МР и отказом типа ХХ при разных температурах
 Fig. 11. Frequency dependences of S -parameters of printed circuit boards with MR and idle type failure at different temperatures

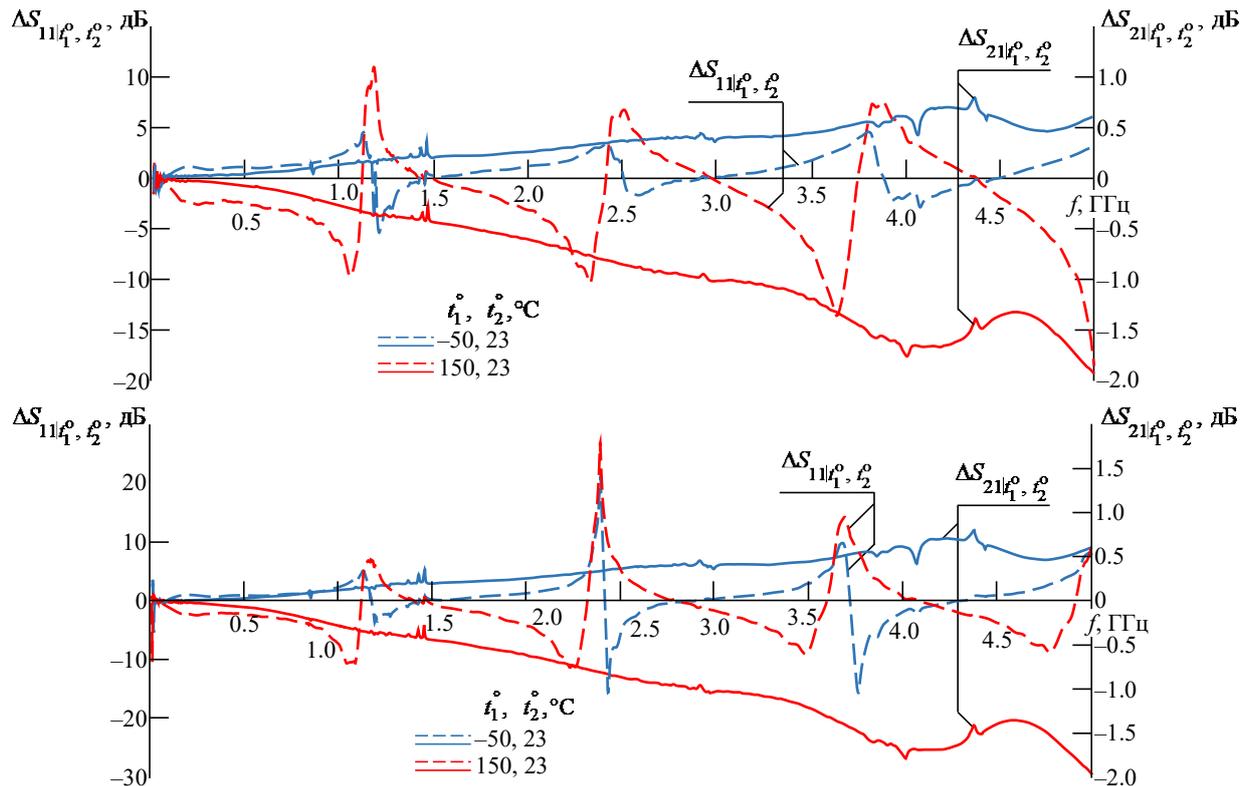


Рис. 12. Частотные зависимости разницы значений S -параметров печатных плат с МР после отказа типа XX при температурах -50 и 150 °C и при комнатной температуре

Fig. 12. Frequency dependences of the difference in S -parameters of printed circuit boards with MR after idle type failure at temperatures of -50 and 150 °C and at room temperature

Из рис. 11 следует, что полученные значения S -параметров для ПП с МР при отказе типа XX отличаются максимум на 0.5 дБ от значений для ПП с МР и также наблюдается повышение резонансных частот до 0.3 ГГц из-за отражения на концах линии, что увеличивает расхождения между значениями S -параметров до и после отказа вблизи резонансных частот. Из рис. 12 следует, что разницы значений $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ для ПП с МР и отказом типа XX и значений при комнатной температуре уменьшаются (кроме частот выше 4.5 ГГц) при низких температурах максимум на 0.2 дБ, а при высоких – на 0.4 дБ. Разницы значений $|S_{11}|$ для ПП с МР и отказом типа XX и значений при комнатной температуре различаются на 5 дБ при низких температурах и на 18 дБ – при высоких. Разница в значениях $|S_{22}|$ выше на 5 дБ, чем для $|S_{11}|$. Диапазон рабочих частот полезного сигнала уменьшается до 3.26 ГГц при высоких температурах. Максимальное отклонение значений $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ от значений при комнатной температуре на частоте

5 ГГц составляет 1.96 дБ (разница увеличивается с ростом частоты), а от -50 до 150 °C – около 2.9 дБ. Максимальное расхождение для значений $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ при низких температурах составляет 0.8 дБ, а при высоких – 2.0 дБ. Средняя разница составляет около 0.33 дБ при низких температурах и 0.9 дБ – при высоких. Максимальная разница для значений $|S_{22}|$ и $|S_{11}|$ при низких температурах составляет 21.2 дБ, а при высоких – 26.8 дБ, тогда как средняя – около 2.2 и 3.9 дБ соответственно.

Сравнительный анализ результатов измерения. Из сравнения рис. 5–8 следует, что коэффициенты передачи и отражения при применении МР уменьшаются по сравнению с результатами для ПП без МР. Уменьшение особенно заметно при сравнении коэффициентов передачи. Оно увеличивается с ростом частоты и на частоте 5 ГГц достигает 1.24 дБ при 23 °C, 1.14 дБ при -50 °C и 1.66 дБ при 150 °C. Отклонения результатов от полученных при комнатной температуре становятся больше на 0.09 дБ при низких температурах и на 0.43 дБ

при высоких (см. рис. 6, 8). Разница в результатах на частоте 5 ГГц при изменении температуры от -50 до 150 °С возросла на 0.53 дБ. Также из рис. 6, 8 видно, что поведения коэффициентов отражения при низких и высоких температурах согласуются. В областях резонансных частот появились скачки в разностях значений S -параметров для ПП с МР и без него при -50 и 150 °С и значений при комнатной температуре из-за сдвига в резонансах при разных температурах и различия макетов ПП с МР и без МР. Например, на частоте 3.68 ГГц разница результатов при -50 °С и комнатной температуре для ПП с МР весьма большая из-за сдвига на 0.08 ГГц, но для ПП без МР эта разница на той же частоте очень мала.

Из сравнения рис. 7–10 следует, что после отказа типа КЗ отражение на конце линии увеличивается приводя к изменению резонансных частот, поэтому пиковые значения смещаются, а частотные зависимости имеют флуктуации. Между тем, в основном, коэффициенты передачи и отражения после отказа типа КЗ меньше, чем до отказа, кроме значений в областях резонансных частот. Все графики после отказа типа КЗ сдвигаются в сторону низких частот по сравнению с результатами, полученными до отказа. Сдвиг с ростом частоты увеличивается до 0.4 ГГц. На частоте 5 ГГц уменьшение коэффициента передачи составляет 0.05 дБ при температуре 23 °С, 0.03 дБ при -50 °С и 0.07 дБ при 150 °С. Отклонения результатов от полученных при комнатной температуре меньше на 0.03 дБ при низких температурах и на 0.02 дБ при высо-

ких (рис. 8, 10). На частоте 5 ГГц разница в результатах для температур -50 и 150 °С меньше на 0.04 дБ. В целом, изменения характеристик после отказа типа КЗ малы, и эффект МР сохраняется после данного отказа, кроме высоких температур.

Из рис. 7, 8, 11, 12 видно, что, в основном, $|S_{22}|$ и $|S_{11}|$ после отказа типа ХХ выше, чем до отказа, а $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ – меньше. Все графики после отказа типа ХХ сдвигаются в сторону высоких частот по сравнению с результатами, полученными до отказа. Сдвиг с ростом частоты увеличивается до 0.3 ГГц. На частоте 5 ГГц уменьшение коэффициента передачи составляет 0.06 дБ при температуре 23 °С, 0.03 дБ при -50 °С, и 0.15 дБ – при 150 °С. Отклонения результатов от полученных при комнатной температуре меньше на 0.12 дБ при низких температурах и на 0.09 дБ при высоких (см. рис. 8, 12). На частоте 5 ГГц разница в результатах для -50 и 150 °С меньше на 0.2 дБ. Эффект МР сохраняется после данного отказа, кроме высоких температур.

Значения $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ при разных температурах и их разницы (на частоте 5 ГГц, где они имеют наибольшие значения) для всех макетов приведены в табл. 1. Средние и максимальные в рассмотренном диапазоне частот отклонения S -параметров при низких и высоких температурах от значений, полученных при комнатной температуре, для всех макетов приведены в табл. 2. В табл. 3 для частоты 5 ГГц представлены разности значений параметров $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ различных макетов для разных температур

Табл. 1. Значения $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ и их разницы при разных температурах на частоте 5 ГГц

Tab. 1. Values of $|S_{12}|$ and $|S_{21}|$ and their differences at different temperatures at 5 GHz

Печатная плата	Параметр	$t, \text{ }^\circ\text{C}$			$t_1, t_2, \text{ }^\circ\text{C}$		
		-50	23	150	$-50, 23$	150, 23	$-50, 150$
		$ S_{pq} _{t^\circ}, \text{ дБ}$			$\Delta S_{pq} _{t_1^\circ t_2^\circ}, \text{ дБ}$		
Без МР	$ S_{21} $	-0.934	-1.581	-3.209	0.648	-1.628	2.275
	$ S_{12} $	-0.921	-1.572	-3.193	0.651	-1.621	2.272
С МР, полное согласование	$ S_{21} $	-2.077	-2.816	-4.855	0.739	-2.038	2.777
	$ S_{12} $	-2.053	-2.797	-4.852	0.743	-2.055	2.799
С МР, КЗ на выходе пассивного проводника	$ S_{21} $	-2.053	-2.762	-4.811	0.709	-2.049	2.758
	$ S_{12} $	-2.027	-2.751	-4.783	0.724	-2.032	2.756
С МР, ХХ на выходе пассивного проводника	$ S_{21} $	-2.140	-2.760	-4.723	0.621	-1.963	2.583
	$ S_{12} $	-2.116	-2.737	-4.698	0.621	-1.961	2.582

Табл. 2. Средние и максимальные отклонения S -параметров при низкой и высокой температурах от значений при комнатной температуре

Tab. 2. Average and maximum deviations of S -parameters at low and high temperatures from the values at room temperature

Печатная плата	Отклонение	$t, ^\circ\text{C}$	$ S_{21} _t, \text{дБ}$	$ S_{12} _t, \text{дБ}$	$ S_{11} _t, \text{дБ}$	$ S_{22} _t, \text{дБ}$
Без МР	Среднее	-50	0.315	0.319	1.300	1.895
		150	0.696	0.690	2.504	3.918
	Максимальное	-50	0.649	0.651	8.442	19.820
		150	1.628	1.621	10.949	24.966
С МР, полное согласование	Среднее	-50	0.365	0.366	2.075	2.046
		150	0.826	0.841	3.896	3.915
	Максимальное	-50	0.740	0.744	22.134	22.716
		150	2.038	2.055	17.392	28.900
С МР, КЗ на выходе пассивного проводника	Среднее	-50	0.296	0.322	1.804	2.587
		150	0.928	0.897	4.004	4.533
	Максимальное	-50	0.709	0.724	12.247	21.491
		150	2.050	2.034	17.652	26.310
С МР, ХХ на выходе пассивного проводника	Среднее	-50	0.335	0.338	1.366	2.221
		150	0.851	0.845	3.734	3.863
	Максимальное	-50	0.803	0.804	5.290	21.185
		150	1.963	1.960	18.529	26.765

Табл. 3. Изменения значений параметров макетов в различных режимах при разных температурах на частоте 5 ГГц

Tab. 3. Changes in the values of the layout parameters in different modes at different temperatures at a frequency of 5 GHz

Сравниваемые печатные платы		Параметр	$t, ^\circ\text{C}$			$t_1 = -50 ^\circ\text{C}$	$t_1 = 150 ^\circ\text{C}$	$t_1 = 150 ^\circ\text{C}$
			-50	23	150	$t_2 = 23 ^\circ\text{C}$	$t_2 = 23 ^\circ\text{C}$	$t_2 = -50 ^\circ\text{C}$
i_1	i_2		$\text{div} S_{pq} _t$			$ S_{pq} _{t_1}^o$	$ S_{pq} _{t_2}^o$	
С МР, полное согласование	Без МР	$ S_{21} _t$	1.144	1.236	1.646	0.092	0.410	0.503
		$ S_{12} _t$	1.133	1.226	1.660	0.093	0.434	0.527
С МР, полное согласование	С МР, КЗ на выходе пассивного проводника	$ S_{21} _t$	0.024	0.055	0.044	0.031	-0.011	0.020
		$ S_{12} _t$	0.026	0.046	0.069	0.020	0.023	0.043
С МР, полное	С МР, ХХ на выходе	$ S_{21} _t$	-0.063	0.057	0.132	0.119	0.076	0.195

$$\text{div}|S_{pq}|_t = \left| S_{pq}^{i_1} \right| - \left| S_{pq}^{i_2} \right|,$$

где i_1, i_2 – условные номера макетов. Здесь же даны изменения этих значений при различных температурах.

Как следует из приведенных результатов, коэффициенты передачи для ПП с МР до и после отказа, как правило, меньше, чем без МР. После отказов они меньше, чем до отказов, почти во всем исследуемом диапазоне частот. Коэффициенты отражения после отказа типа КЗ, в общем, меньше, чем до отказа и без МР, а после отказа типа ХХ больше, чем до отказа и без МР. В целом, все S -параметры макетов уменьшаются при повышении температуры и увеличиваются при ее понижении по сравнению с

комнатной температурой во всем частотном диапазоне, за исключением резонансных частот.

Заключение. Для исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, были изготовлены прототипы ПП без МР и с МР до и после двух видов отказа для экспериментального исследования их характеристик в условиях климатического воздействия. Получены частотные зависимости S -параметров макетов при изменении температуры в климатической камере. Показано, что коэффициенты передачи и отражения ПП с МР до и после отказов уменьшаются при повышении температуры и увеличиваются при ее понижении относительно результатов, полученных при комнатной температуре. При низкой температуре резонансные частоты увеличиваются, $|S_{12}|$ и

$|S_{21}|$ уменьшаются, $|S_{22}|$ и $|S_{11}|$ увеличиваются, причем указанные изменения параметров увеличиваются с ростом частоты. При высокой температуре резонансные частоты снижаются, $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ уменьшаются, а $|S_{22}|$ и $|S_{11}|$ увеличиваются, причем изменения возрастают с ростом частоты.

Сдвиг резонансов получился довольно значительным и сильно влияющим на значения коэффициентов. Можно предположить, что этот сдвиг, главным образом, определяется изменением диэлектрической проницаемости материала ПП. Между тем у других материалов тепловой коэффициент диэлектрической проницаемости может быть меньше и даже другого знака. В связи с этим в перспективе целесообразно исследовать возможность уменьшения чувствительности характеристик к изменению температуры за счет выбора других материалов ПП.

Выявлено, что коэффициенты передачи и отражения при МР уменьшаются по сравнению с результатами без МР со сдвигом в сторону низких частот. Коэффициенты передачи и от-

ражения после КЗ меньше, чем до отказа, кроме областей резонансных частот. Все результаты после КЗ сдвигаются в сторону низких частот по сравнению с результатами до отказа. Сдвиг с ростом частоты увеличивается до 0.4 ГГц из-за отражения на концах линии, что увеличивает различия между ними вблизи резонансных частот; $|S_{22}|$ и $|S_{11}|$ при отказе типа ХХ больше, чем до отказа, а $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ – меньше. Все результаты после отказа типа ХХ сдвигаются в сторону высоких частот по сравнению с результатами до отказа. Сдвиг с ростом частоты увеличивается до 0.3 ГГц. Эффект МР сохраняется после отказа, не влияя существенно на полезный сигнал, за исключением высоких температур, при которых диапазон рабочих частот полезного сигнала может значительно уменьшиться. Отметим, что измерение всех S -параметров позволяет оценить распространение сигналов в обоих направлениях.

В дальнейшем целесообразно исследовать излучения ПП с МР до и после отказов под влиянием климатических условий.

Список литературы

1. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. New Approach to EMC Protection // 18th Intern. Zurich Symp. on Electromagnetic Compatibility. Munich, Germany, 24–28 Sept. 2007. P. 273–276. doi: 10.1109/EMCZUR.2007.4388248

2. Medvedev A. V. Studying the Propagation of an Ultrashort Pulses in a Cable Attached to a PCB System with Modal Reservation // IEEE Intern. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Souza, Russia, 30 June – 04 July 2021. P. 167–170. doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507706

3. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. EC-58, iss. 4. P. 1136–1142. doi: 10.1109/TEMC.2016.2548783.

4. Шарафутдинов В. Р., Газизов Т. Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 117–144. doi: 10.24411/2410-9916-2019-10307

5. Paul C. R. Introduction to Electromagnetic Compatibility. Wiley Interscience, 2006. 1013 p.

6. Денисенко В. В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. 2008. № 2. С. 90–99.

URL: <https://www.cta.ru/cms/f/369991.pdf> (дата обращения 06.01.2023)

7. Денисенко В. В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации. Ч. 2 // Современные технологии автоматизации. 2008. № 3. С. 94–98. URL: <https://www.cta.ru/cms/f/373347.pdf> (дата обращения 06.01.2023)

8. Kapur K. C., Pecht M. Reliability engineering. John Wiley & Sons, 2014. 514 p.

9. Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M. Investigation of the Immunity of Computer Equipment to the Power-Line Electromagnetic Interference // J. of Communications Technology and Electronics. 2016. Vol. 61, № 5. P. 546–550. doi: 10.1134/S1064226916050053

10. Patel M. R. Spacecraft Power Systems. CRC Press, 2005. 691 p.

11. Using N-Norms for Analyzing Symmetric Protective Electrical Circuits with Triple Modal Reservation / Y. S. Zhechev, A. V. Zhecheva, A. A. Kvasnikov, A. M. Zabolotsky // Symmetry. 2021. Vol. 13, № 12. P. 2390. doi: 10.3390/sym13122390

12. Medvedev A. V., Sharafutdinov V. R. Using modal reservation for ultrashort pulse attenuation after failure // IEEE Intern. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Novosibirsk, Russia, 21–27 Oct. 2019. P. 293–296. doi: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958018

13. Medvedev A. V., Zhechev Y. S. Analysis of Frequency Characteristics of a Structure with Single Modal Reservation Before and After Failure // IOP Conf. Ser.: Material Science and Engineering. 2020. Vol. 862, № 022037. P. 1–6. doi: 10.1088/1757-899x/862/2/022037

14. Demakov A. V., Komnatnov M. E. TEM Cell for Testing Low-Profile Integrated Circuits for EMC // Intern. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Chelal, Russia, 29 June – 03 Jul. 2020. P. 154–158. doi: 10.1109/EDM49804.2020.9153508

Информация об авторах

Газизов Тальгат Рашитович – доктор технических наук (2010), Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Автор 460 научных работ. Сфера научных интересов – компьютерное моделирование высокоскоростных межсоединений; электромагнитная совместимость и численные методы. Адрес: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия

E-mail: talgat@tu.tusur.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1192-4853>

Алхадж Хасан Аднан – магистр по направлению "Радиотехника" (2019), аспирант (2019), младший научный сотрудник (2019) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов – компьютерное моделирование высокоскоростных межсоединений; электромагнитная совместимость и численные методы.

Адрес: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия

E-mail: alhaj.hasan.adnan@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7403-7023>

References

1. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. New Approach to EMC Protection. 18th Intern. Zurich Symp. on Electromagnetic Compatibility. Munich, Germany, 24–28 Sept. 2007, pp. 273–276. doi: 10.1109/EMCZUR.2007.4388248

2. Medvedev A. V. Studying the Propagation of an Ultrashort Pulses in a Cable Attached to a PCB System with Modal Reservation. IEEE Intern. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Souza, Russia, 30 June – 04 July 2021, pp. 167–170. doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507706

3. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2016, vol. EC-58, iss. 4, pp. 1136–1142. doi: 10.1109/TEMC.2016.2548783

4. Sharafutdinov V. R., Gazizov T. R. Analysis of the Reservation Methods with Modal Filtration Base. Systems of Control, Communication and Security. 2019, no. 3, pp. 117–144. doi: 10.24411/2410-9916-2019-10307 (In Russ.)

5. Paul C. R. Introduction to Electromagnetic Compatibility. Wiley Interscience, 2006, 1013 p.

6. Denisenko V. V. Hardware Redundancy in Industrial Automation. Part 1. Modern Automation Technologies. 2008, no. 2, pp. 90–99. Available at: <https://www.cta.ru/cms/f/369991.pdf> (accessed 06.01.2023) (In Russ.)

7. Denisenko V. V. Hardware Redundancy in Industrial Automation. Part 2. Modern Automation Technologies. 2008, no. 3, pp. 94–98. Available at: <https://www.cta.ru/cms/f/373347.pdf> (accessed 06.01.2023) (In Russ.)

8. Kapur K. C., Pecht M. Reliability Engineering. John Wiley & Sons, 2014, 514 p.

9. Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M. Investigation of the Immunity of Computer Equipment to the Power-Line Electromagnetic Interference. J. of Communications Technology and Electronics. 2016, vol. 61, № 5, pp. 546–550. doi: 10.1134/S1064226916050053

10. Patel M. R. Spacecraft Power Systems. CRC Press, 2005, 691 p.

11. Zhechev Y. S., Zhecheva A. V., Kvasnikov A. A., Zabolotsky A. M. Using N-Norms for Analyzing Symmetric Protective Electrical Circuits with Triple Modal Reservation. Symmetry. 2021, vol. 13, no. 12, 2390. doi: 10.3390/sym13122390

12. Medvedev A. V., Sharafutdinov V. R. Using Modal Reservation for Ultrashort Pulse Attenuation After Failure. 2019 IEEE Intern. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). Novosibirsk, Russia, 21–27 Oct. 2019, pp. 293–296. doi: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958018

13. Medvedev A. V., Zhechev Y. S. Analysis of Frequency Characteristics of a Structure with Single Modal Reservation Before and After Failure. IOP Conf. Ser.: Material Science and Engineering. 2020, vol. 862, no. 022037, pp. 1–6. doi: 10.1088/1757-899x/862/2/022037

14. Demakov A. V., Komnatnov M. E. TEM Cell for Testing Low-Profile Integrated Circuits for EMC. 2020 Intern. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Chelal, Russia, 29 June – 03 Jul 2020, pp. 154–158. doi: 10.1109/EDM49804.2020.9153508

Information about the authors

Talgat R. Gazizov, Dr Sci. (Eng.) (2010) at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 460 scientific publications. Area of expertise: computer modeling of high-speed interconnects; electromagnetic compatibility and numerical methods.

Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia

E-mail: talgat@tu.tusur.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1192-4853>

Adnan Alhaj Hasan, Master on Radio Engineering (2019), Postgraduate student (Eng.) (2019), Junior researcher (2019) at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: computer modeling of high-speed interconnects; electromagnetic compatibility and numerical methods.

Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia

E-mail: alhaj.hasan.adnan@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7403-7023>
