

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ ТГУ

V Международная молодежная научная конференция
«Актуальные проблемы современной механики
сплошных сред и небесной механики»
25–27 ноября 2015 г., Томск

Издательство Томского университета
2016

было обнаружено много общего. В частности, во всех трех вариантах обнаружены осколки известняка различных размеров, пыль и остатки ПД. Установлено, что после подрыва известняка были выявлены как общие закономерности, так и отличия в морфологии разрушения известняка. Под действием продуктов детонации в районе экспериментальной площадки формировалось облако осколков разного диаметра. Визуально установлено, наибольшее количество небольших фрагментов (< 15 см) обнаружено после подрыва взрывной смеси. После взрыва ВВ второго типа зафиксировано наибольшее количество больших фрагментов (≥ 50 см). После подрыва ВВ третьего типа количество больших и мелких осколков было примерно одинаковым. Выявлено, что при подрыве ВВ первого типа в сечении кратер имел «стаканообразную», а в остальных – «чашеобразную» и «V-образную» формы.

Работа выполнена при поддержке Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» (НИР № 8.2.02.2016).

Литература

1. <http://phys.org/news/2016-02-russian-scientists-ice-theories.html>
2. Orlov M.Yu., Orlova Yu.N., Tolkachev V.F. Mobile laboratory "Explosive destruction of natural materials": Investigation of the behavior of ice and limestone under explosive loading Journal of Physics: Conference Series 653 (2015) 012038.

DOI: 10.17223/9785751124199/3

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА СВЧ-ДИАПАЗОНА К ДИНАМИЧЕСКИМ И СТАТИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ МЕТОДОМ ФИЗИЧЕСКИХ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**Д.В. Родин, А.А. Трубачев, В.И. Юрченко, В.Г. Бутов,
А.Б. Бовсуновский, А.А. Яшук**

Проведено сопоставление вычислительного и физического моделирования для решения задач оптимизации перемычек в коаксиально-полосковых переходах и других элементах преобразователя частоты СВЧ-устройства в условиях воздействия климатических и механических воздействий на образцах серийно выпускаемых изделий. Выявлена основная причина разрушения перемычек и факторы, влияющие на их механическую надежность. Обоснован вариант повышения механической надежности конструкции за счет нормирования затяжки различных винтовых креплений основания микрополосковой платы в корпусе устройства.

INVESTIGATION OF THE MICROWAVE DEVICE STABILITY UNDER DYNAMIC AND STATIC LOAD CONDITIONS BY THE METHODS OF PHYSICAL AND COMPUTER EXPERIMENT

**D.V. Rodin, A.A. Trubachev, V.I. Yurchenko, V.G. Butov, A.B. Bovsunovsky,
A.A. Yaschuk**

The results of the computational and physical experiments for the coaxial-stripline transition jumpers and other elements of the commercially produced microwave device under climatic and mechanical load conditions are presented. The basic cause of the jumpers destruction and the factors influencing their mechanical reliability are discovered. The option to increase the mechanical reliability of the device by different valuation of screw tightening the microstrip board base is presented.

Одним из элементов, который использует радиоэлектронная и связанная аппаратура (РСА), являются радиочастотные коаксиально-полосковые переходы (КПП). Они занимают monopольное положение в линиях передачи энергии малой и средней

мощности в диапазоне частот до 20 ГГц, а также за последнее время ведущими иностранными фирмами разработаны конструкции КПП, работающие в диапазонах частот до 100 ГГц [1].

Для потребителя необходимо квалифицированное использование существующих КПП для выполнения предъявляемых требований. Для ускорения процесса испытаний конкретных конструкций РСА и повышения их качества, а также в связи с развитием возможностей и повышением быстродействия современной вычислительной техники на первое место выходят задачи использования систем вычислительных экспериментов. Одной из самых перспективных задач является создание точной математической модели на основе данных о геометрии и материалах испытуемого образца РСА для проведения анализа устойчивости конструкции соединителя при различных климатических и механических воздействиях.

Наиболее распространенными элементами, влияющими на электрические параметры РСА, являются ступенчатые неоднородности. Эти неоднородности представляют собой скачкообразное изменение размеров наружного и внутреннего проводников в плоскости, перпендикулярной оси симметрии КПП. Задачам анализа и оптимизации неоднородностей в КПП посвящены десятки работ отечественных и зарубежных авторов [4–5]. Анализируя указанные материалы, видно, что имеется необходимость в разработке достаточно точной инженерной методики как для радиочастотного анализа простых перемишек в КПП, так и для учета влияния конструктивных особенностей РСА на их механическое поведение под действием различных статических и динамических нагрузок.

Целью данной работы является сопоставление вычислительного и физического моделирования для решения задач оптимизации перемишек в КПП и других элементах СВЧ-устройства преобразователя частоты в условиях воздействия климатических и механических воздействий на серийно выпускаемых изделиях.

Исследования основывались на методах экспериментального и математического моделирования, аналитическом аппарате, численных методах расчета и анализа. Моделирование, расчеты и обработка результатов производились с использованием системы инженерного анализа ANSYS Mechanical (лицензии № 1-87358659, 1-87358661, 1-87358675 Tomsk State University).

В ходе проведения комплексных испытаний СВЧ-устройств выявляются дефекты, связанные с разрывом и отрывом перемишек от контактов СРГ 50-751ФВ. Наиболее характерные дефекты представлены на рис. 1.

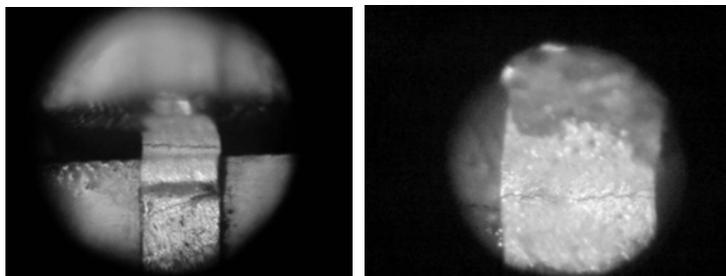


Рис. 1. Фото дефектов перемишек КПП

Для установления причины отказов было проведено физическое моделирование.

1. В соответствии с конструкторской документацией (КД) собран макет СВЧ-устройства.

2. На собранном макете были проведены комплексные испытания:

- устойчивость к воздействию циклического изменения температуры;
- устойчивость к воздействию повышенной и пониженной температуры;
- устойчивость к воздействию широкополосной случайной вибрации (ШСВ).

3. Все изделия в процессе производства и контроля, включая периодические испытания, подвергались 5–10 циклам изменения температур, от 3 до 10 раз испытаниям на устойчивость к воздействию повышенной и пониженной температур, а также воздействию ШСВ.

4. С помощью фотокамеры были зафиксированы исходные состояния перемычек до и после каждого типа испытаний (табл. 1).

Также было проведено математическое моделирование механического поведения устройства.

1. В соответствии с КД построена геометрическая и конечно-элементная модель (рис. 2).

2. На математической модели проведены численные эксперименты, соответствующие нормативам комплексных испытаний:

- статический расчет при пониженной температуре;
- статический расчет при повышенной температуре;
- расчет переходного процесса изменения температуры при термоциклировании;
- ШСВ с различными направлениями воздействия.

3. В результате численных экспериментов рассчитаны механические напряжения и относительные деформации конструктивных элементов, получены оценки запасов по прочности материалов.

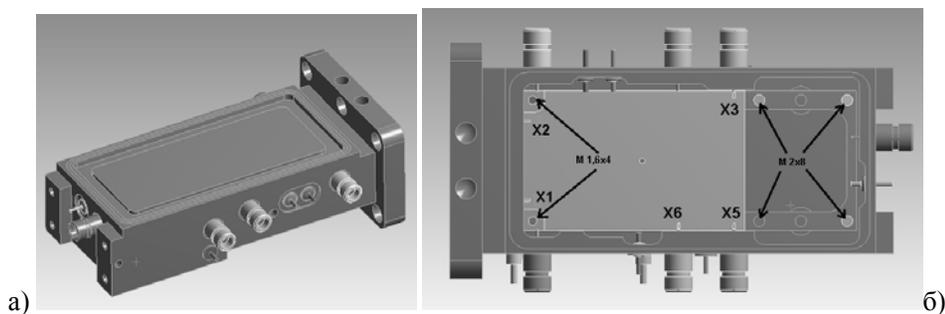


Рис. 2. Модель преобразователя СВЧ-устройства: а – общий вид с верхней крышкой; б – расположение перемычек КПП и винтов крепления основания платы в корпусе преобразователя

Наибольшее внимание в ходе как натуральных, так и численных экспериментов уделялось поведению гибких перемычек КПП (рис. 3).

В результате физических экспериментов установлено:

1. После трех циклов изменения температуры у всех рассматриваемых перемычек зафиксированы значительные деформации, усугубляющиеся при дальнейших испытаниях. После девяти циклов на одном из образцов зафиксирован разрыв перемычки контакта X3 (см. табл. 1).

2. После однократного воздействия ШСВ визуально обнаруживаемых дефектов не наблюдалось.

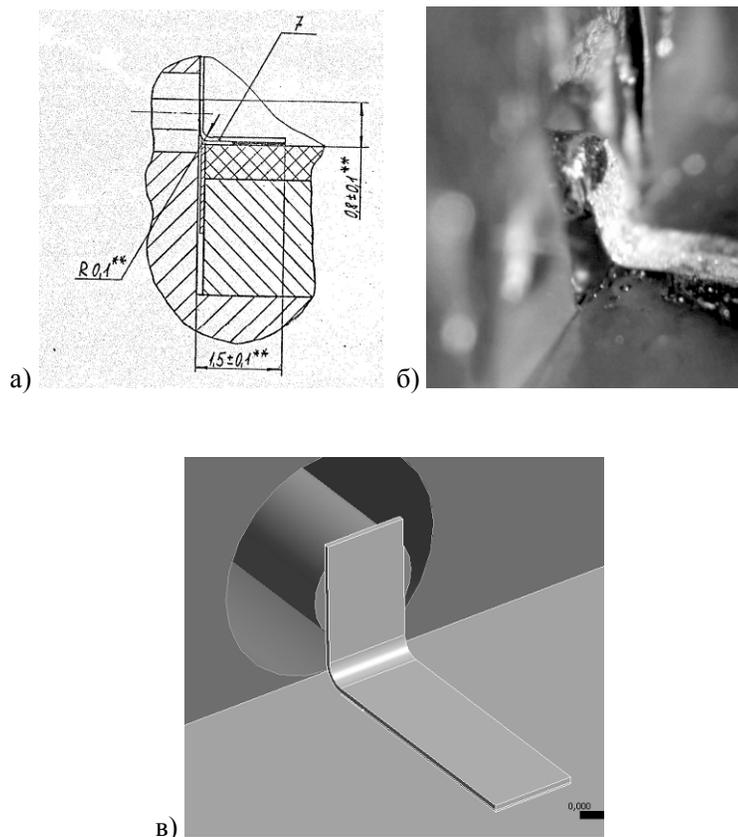


Рис. 3. Гибкая перемычка КПП: а – фрагмент чертежа; б – фото натурального образца; в – геометрия цифровой модели

Результаты вычислительных экспериментов:

1. Моделирование переходного процесса изменения температуры при термоциклировании показало, что максимальная разница температур между корпусом и другими конструктивными элементами преобразователя устройства возникает на второй минуте процесса и не превышает $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, а разница температур между корпусом и контактными перемычками не превышает $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это свидетельствует о допустимости расчета как крайних, так и промежуточных состояний температурного нагружения на основе квазистатической модели.

2. В обоих крайних состояниях режима термоциклирования (повышенная и пониженная температура окружающей среды) вследствие температурного расширения или сжатия материалов наблюдаются смещения микрополосковой платы относительно корпуса, приводящие к значительным пластическим деформациям гибких перемычек КПП (рис. 4).

3. В условиях жесткого закрепления платы в корпусе устройства, при котором обеспечивается фиксация основания без возможности его смещений в зазорах винтовых креплений, относительные деформации перемычек составляют от 1,2 до 4,3 % (табл. 2, рис. 5). В условиях, когда основание платы может смещаться на величину зазоров винтовых креплений, деформация платы уменьшается, однако деформация перемычек может как возрастать, так и убывать в зависимости от расположения ослабленных креплений.

**Фотоснимки состояния перемычек КПП в ходе термоциклирования
(обычная затяжка креплений платы)**

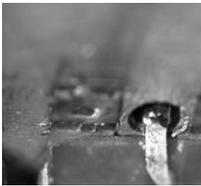
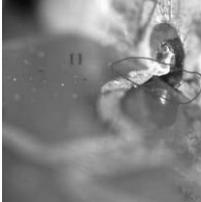
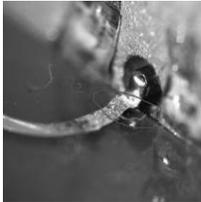
| Стадия эксперимента | Разъем | | | |
|---------------------|---|---|---|--|
| | X3 | X5 | X6 | X1 |
| После сборки |  |  |  |  |
| После 3 термоциклов |  |  |  |  |
| После 6 термоциклов |  |  |  |  |
| После 9 термоциклов |  |  |  |  |

Таблица 2

Относительные деформации перемычек КПП в ходе термоциклирования (жесткое крепление основания платы)

| Наименование разъема | Относительные деформации, % | |
|----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | Пониженная температура, °С | Повышенная температура, °С |
| X3 | 2,6 | 1,3 |
| X5 | 2,6 | 1,3 |
| X6 | 3,5 | 1,2 |
| X1 | 4,3 | 2,7 |

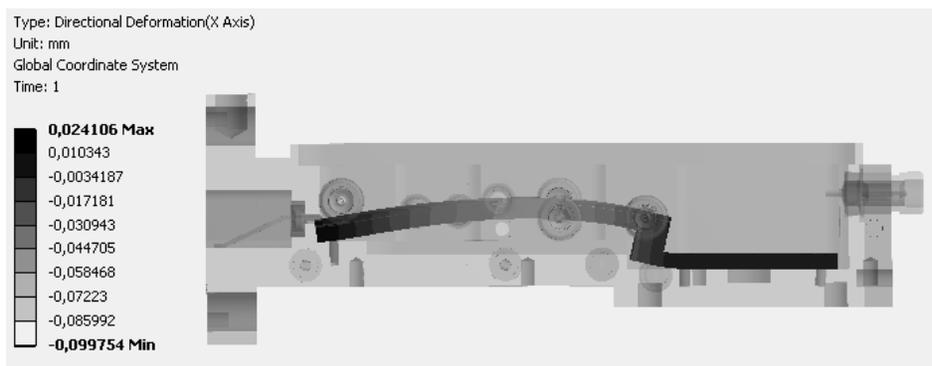


Рис. 4. Деформация основания микрополосковой платы в корпусе преобразователя СВЧ-устройства при пониженной температуре (визуальный масштаб увеличен в 29 раз)

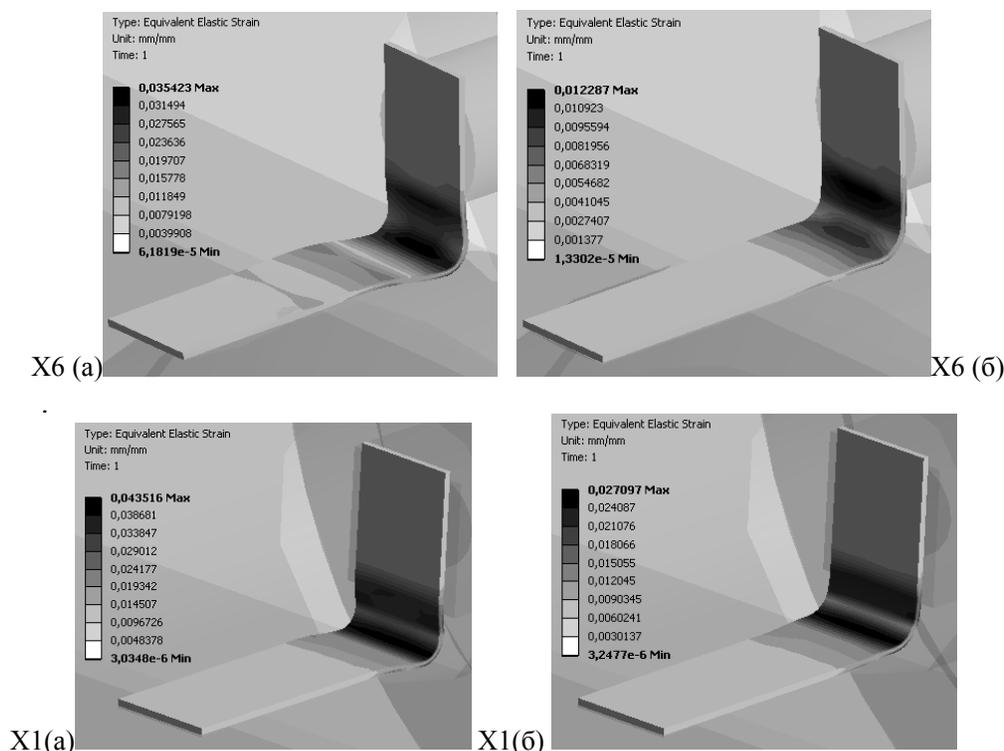


Рис. 5. Относительные деформации в перемычках разъемов X6 и X1, %:

a – пониженная температура; *б* – повышенная температура (без увеличения визуального масштаба)

В ходе физических экспериментов проведено дополнительное исследование влияния усилия затягивания крепежных винтов основания микрополосковой платы к корпусу устройства преобразователя. Для этого был проведен ряд экспериментальных исследований с различным усилием затягивания от 20 Н/м вплоть до границы прочности резьбового соединения. Положительный эффект от уменьшения степени деформации платы путем изменения усилий затяжки винтовых креплений

удалось получить при фиксации винтов М2х8 усилием 40 Н/м, и винтов М1,6х4 усилием 14 Н/м (см. рис. 2, б, табл. 3). Критических деформаций перемычек КПП не наблюдалось даже после 20 температурных циклов.

По результатам вычислительных и физических экспериментов могут быть сделаны следующие выводы:

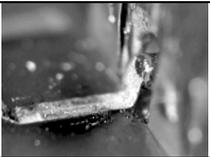
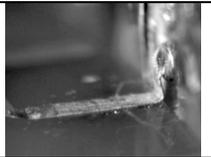
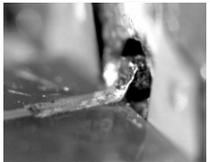
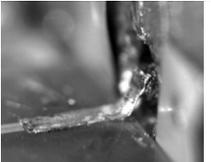
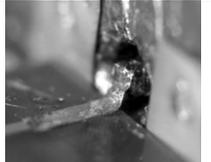
1. Незначительная разница температур между корпусом и другими конструктивными элементами преобразователя СВЧ-устройства, полученная в рамках вычислительного эксперимента на термоциклирование, позволяет считать прогрев или охлаждение устройства практически равномерным.

2. Гибкие контактные перемычки при термоциклировании испытывают значительные пластические деформации, а их разрушение происходит в режиме малоциклового накопления усталостных повреждений.

3. Фиксация определенных уровней усилия для затяжки винтов М2х8 и М1,6х4 позволяет добиться снижения степени деформирования платы преобразователя, при котором и деформация перемычек сводится к минимуму. Однако при этом возникает опасность разрушения резьбы в корпусе устройства преобразователя [6]. Для ее предотвращения могут быть использованы специальные стальные гайки-вставки.

Таблица 3

Фотоснимки состояния перемычек КПП в ходе термоциклирования (специальная затяжка креплений платы)

| Разъем | Стадия эксперимента | | |
|--------|---|---|--|
| | После сборки | После 3 термоциклов | После 20 термоциклов |
| X3 |  |  |  |
| X5 |  |  |  |
| X6 |  |  |  |
| X1 |  |  |  |

4. Учитывая характер и величину пластических деформаций контактных перемычек КПП при термоциклировании, для рассматриваемого конструктива можно ожидать частые отказы как при первичном контроле изделия, так и при проведении повторных комплексных испытаний.

5. Обрывы перемычек КПП в процессе физических испытаний ряда однотипных изделий носят случайный характер, что может свидетельствовать о влиянии на их разрушение как разброса параметров применяемых материалов, так и допусков на изготовление отдельных конструктивных элементов.

Литература

1. *Джуринский К.Б.* Радиочастотные соединители с предельной частотой 40 ГГц: перспективы применения в отечественных изделиях СВЧ // Современная электроника. 2014. № 5. С. 30–36.
2. *Джуринский К.Б.* Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. М.: Техносфера, 2006.
3. *Джуринский К.Б.* Миниатюрные коаксиальные СВЧ-вводы для микроэлектроники. Конструирование, расчет параметров, применение // Электроника: НТБ. 2000. № 6. С. 18–22.
4. *ГОСТ 20465–85.* Соединители радиочастотные коаксиальные. Общие технические условия.
5. *Алексеев В., Верецагин А., Джуринский К.* Экспериментальное исследование частотной зависимости КСВН коаксиально-микроразветвляющихся переходов // Компоненты и технология. 2008. № 4. С. 53.
6. *ГОСТ Р ИСО 898-7–2009.* Механические свойства крепежных изделий. Ч. 7: Испытание на кручение и минимальные крутящие моменты для болтов и винтов номинальных диаметров от 1 до 10 мм.