

# Особенности разработки электромеханического СВЧ-переключателя

А. Корнев<sup>1</sup>, Г. Гошин, д. ф. - м. н.<sup>2</sup>

УДК 621.37 | ВАК 05.27.06

Электромеханические переключатели СВЧ, аналогичные зарубежным, выпускаются рядом предприятий, однако отечественные аналоги таких устройств, которые не уступали бы им по своим характеристикам, до недавнего времени отсутствовали. В данной статье описаны конструкция и некоторые особенности контактной системы СВЧ переключателя, разработанного и серийно выпускаемого на АО «Иркутский релейный завод».

СВЧ-переключатели представляют собой класс переключающих устройств, отличительной особенностью которых является особая конструкция контактной системы, позволяющая пропускать через нее высокочастотные сигналы [1]. Контактная система, в большинстве случаев, выполняется в виде прямоугольного волновода или коаксиальной линии. В данной статье рассматривается конструкция контактной системы коаксиального СВЧ-переключателя (рис. 1).

Данный переключатель по конструкции контактной системы относится к трансферному типу (2П2Н или DPDT). Электромеханический привод поляризованный, бистабильный с управлением импульсами амплитудой 28 В длительностью от 30 до 50 мс. В составе переключателя присутствуют низкочастотные индикаторные контакты, положение которых соответствует положению СВЧ-контактов. Основные технические характеристики переключателя приведены в табл. 1, а электрическая схема – на рис. 2.

## КОНСТРУКЦИЯ КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ СВЧ

Контактная система СВЧ выполнена на основе прямоугольной коаксиальной линии передач (рис. 3). Такая конструкция позволяет пропускать электрический сигнал в широком диапазоне частот, включая постоянный ток. Величина вносимых потерь замкнутых контактов сравнима с таковой у круглой коаксиальной линии соответствующих размеров.

Промежуток между коаксиальными линиями с разомкнутыми контактами близок по конфигурации к прямоугольному волноводу, который в рабочем диапазоне частот переключателя работает в закритическом режиме,

что обуславливает высокие значения изоляции при отсутствии резонансных явлений.

Выбор сечения прямоугольной линии представляет собой компромисс, главным образом, между необходимой величиной коэффициента передачи при разомкнутых контактах (изоляция) и максимальной пропускаемой мощностью.

Критическая частота волны  $TE_{10}$  для выбранной конфигурации волновода, образованного стенками

Таблица 1. Основные характеристики переключателя

Параметр	Значение
Номинальное рабочее напряжение управления, В	28
Схема соединения контактов	2П2Н
Рабочий частотный диапазон, ГГц	0–12,4
КСВН	Не более 1,35
Вносимые потери, дБ	Не более 0,5
Изоляция, дБ	Не менее 75
Максимальная пропускаемая мощность в непрерывном режиме	120 Вт на частоте 2 775 МГц 70 Вт на частоте 9 600 МГц
Время переключения, мс	Не более 20
Рабочий температурный диапазон, °С	–50...55
Механическая износостойкость, циклов	1 000
Вибропрочность	5g (1–500 Гц)
Ударопрочность	15g
Масса, г	Не более 350

<sup>1</sup> АО «Иркутский релейный завод», инженер электроник, korenev\_av@irzirk.ru.

<sup>2</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, профессор кафедры СВЧ и КР, goshingg@svch.tusur.ru.



Рис. 1. Внешний вид переключателя

прямоугольной полости, составляет около 28 ГГц. Присутствие подвижного контакта, прижатого к верхней стенке, снижает эту частоту примерно до 25,5 ГГц. Коэффициент передачи такого волновода длиной 22,35 мм на максимальной рабочей частоте переключателя составляет около –90 дБ.

Расчет волнового сопротивления прямоугольной коаксиальной линии (рис. 3) проводился по формуле (1). Помимо геометрических размеров проводников прямоугольной коаксиальной линии, в формулу входит угловая емкость. В работе [2] были построены диаграммы для нахождения угловой емкости для разного соотношения  $w/h$ , а также проведена оценка точности определения

волнового сопротивления при помощи полученных диаграмм и формулы (1):

$$z_0 = \frac{376,62}{4 \frac{C}{\epsilon} + 2 \frac{w}{h} + 2 \frac{b}{g}}, \quad (1)$$

где  $w=2,35$  мм – ширина центрального проводника;  $h=0,975$  мм – расстояние между центральным проводником и широкой стороной наружного проводника;  $g=1,5$  мм – расстояние между центральным проводником и узкой стороной наружного проводника;  $b=0,45$  мм – толщина центрального проводника;  $C/\epsilon=0,55$  – величина, характеризующая угловую емкость. Определялась по диаграмме 6 из [1].

Величины  $w$  и  $w+2g$  выбраны примерно равными, соответственно, диаметру центрального и наружного проводника коаксиальной линии соединителя. Это позволило упростить согласование перехода с одной линии на другую, сведя его к выбору зазора между подвижными контактами (рис. 4), равного 0,2 мм. Влияние толкателя и направляющих стержней подвижных контактов в диапазоне рабочих частот переключателя пренебрежимо мало.

Каждое направление распространения сигнала в переключателе включает в себя два соединителя типа N и отрезок прямоугольной коаксиальной линии передач (рис. 5). Опорные шайбы соединителей выполнены из материала Арфлон AR200 [3].

Согласование опорной шайбы с воздушными коаксиальными линиями выполнено с помощью проточек

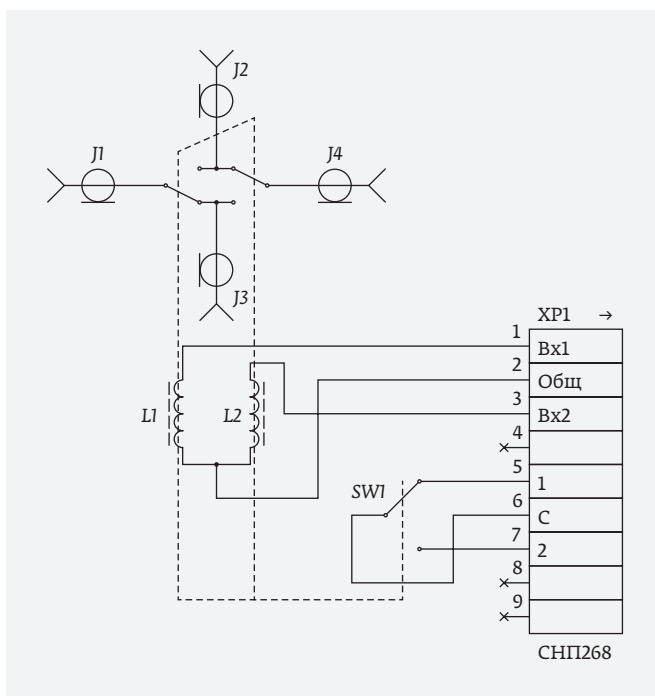


Рис. 2. Электрическая схема контактной системы

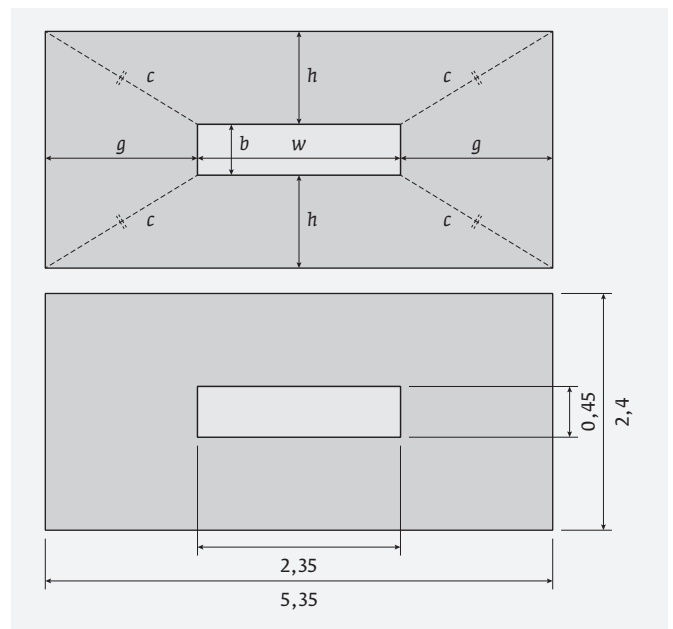
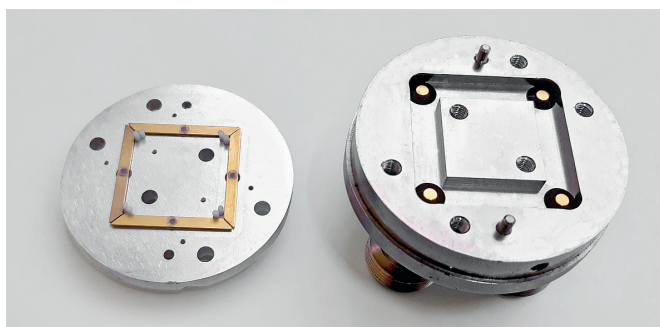


Рис. 3. Сечение прямоугольной коаксиальной линии. Сверху показаны обозначения геометрических размеров, снизу – их рассчитанные значения



**Рис. 4.** Внешний вид высокочастотной контактной системы. Слева – крышка с установленными подвижными контактами, справа – корпус с соединителями

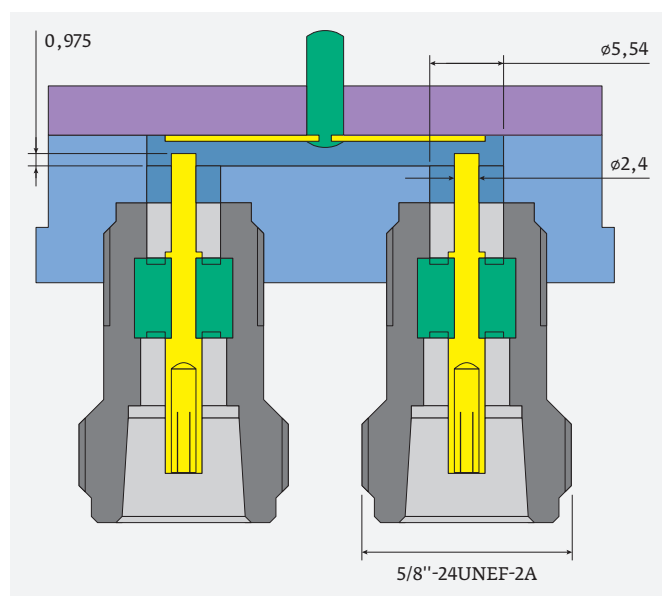
на боковых поверхностях, которые создают индуктивные неоднородности, компенсирующие емкостные неоднородности на границе линий передачи, заполненных разными диэлектриками.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ

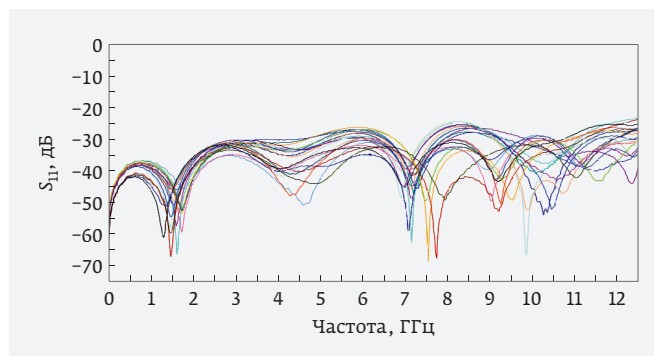
Измерения  $S$ -параметров образцов переключателей были выполнены с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) Keysight E5071С, калиброванного с помощью калибровочного набора Микран НКММ-11Р.

$S_{11}$  представляет собой коэффициент отражения от переключателя, а  $S_{21}$  – коэффициент передачи через переключатель. Оба параметра измерены для всех направлений распространения сигнала через переключатель.

Результаты измерений  $S_{11}$  всех направлений нескольких образцов переключателей представлены на рис. 6. Максимальные значения коэффициентов отражения всех



**Рис. 5.** Конструкция контактной системы СВЧ



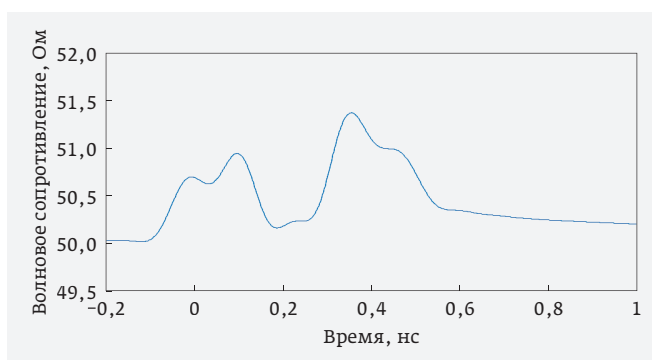
**Рис. 6.** Зависимость  $S_{11}$  образцов переключателей от частоты

образцов составляют не хуже  $-23$  дБ, что соответствует КСВН не более 1,15.

Временная диаграмма волнового сопротивления представлена на рис. 7. На диаграмме видны две области с повышенным волновым сопротивлением. Их наличие объясняется рецессией цанги соединителя и повышенным волновым сопротивлением опорной шайбы. При разработке соединителя была использована относительная диэлектрическая проницаемость AR200, равная 2,15, которая приведена в ТУ на материал. В дальнейшем будет проведена коррекция размеров опорной шайбы и согласующих проточек, которая позволит уменьшить КСВН переключателей.

Зависимость коэффициентов передачи замкнутых контактов переключателя от частоты представлена на рис. 8, а разомкнутых – на рис. 9.

Полученные значения  $S$ -параметров переключателей соответствуют лучшим мировым образцам и позволяют их использовать в составе измерительной аппаратуры. Однако для таких применений важно знать также стабильность этих параметров. Для этого был разработан автоматизированный стенд, состоящий из векторного анализатора цепей (ВАЦ), устройства управления переключателем (для подачи напряжения управления



**Рис. 7.** Временная диаграмма волнового сопротивления замкнутого контакта переключателя

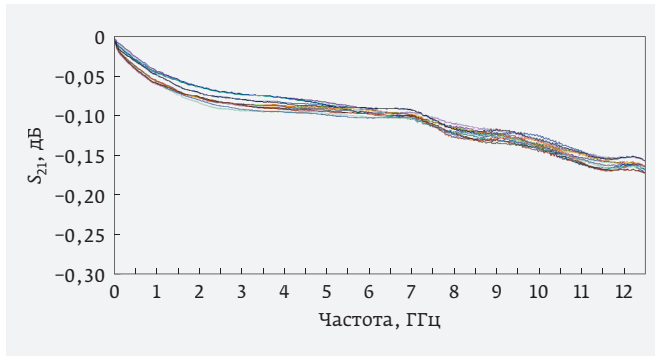


Рис. 8. Зависимость  $S_{21}$  замкнутых контактов образцов переключателей от частоты

на соответствующие контакты переключателя) и персонального компьютера с управляющей программой.

С помощью стенда было проведено измерение S-параметров замкнутого контакта на каждом из 500 проведенных циклов коммутации с накоплением максимального и минимального значения  $S_{11}$  и  $S_{21}$  в каждой частотной точке, а затем расчет стабильности  $S_{11}$  и  $S_{21}$  [4].

Стабильность  $S_{21}$  за 500 циклов коммутации ( $dS_{21}$ ) определялась по формуле (2) и представлена на рис. 10.

$$dS_{21} [\text{дБ}] = S_{21 \max} [\text{дБ}] - S_{21 \min} [\text{дБ}], \quad (2)$$

где  $S_{21 \max}$  – максимальное значение коэффициента передачи,  $S_{21 \min}$  – минимальное значение коэффициента передачи.

Стабильность  $S_{11}$  ( $dS_{11}$ ) определялась по формуле (3) и представлена на рис. 11.

$$dS_{11} [\text{дБ}] = 20 \cdot \lg(S_{11 \max} - S_{11 \min}), \quad (3)$$

где  $S_{11 \max}$  и  $S_{11 \min}$  соответственно максимальное и минимальное значение коэффициента отражения, выраженное в разгах.

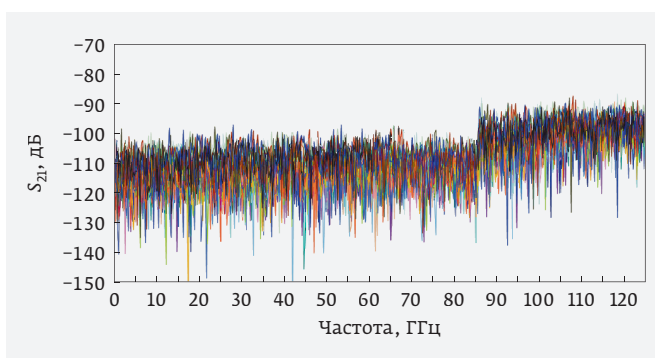


Рис. 9. Зависимость  $S_{21}$  разомкнутых контактов образцов переключателей от частоты

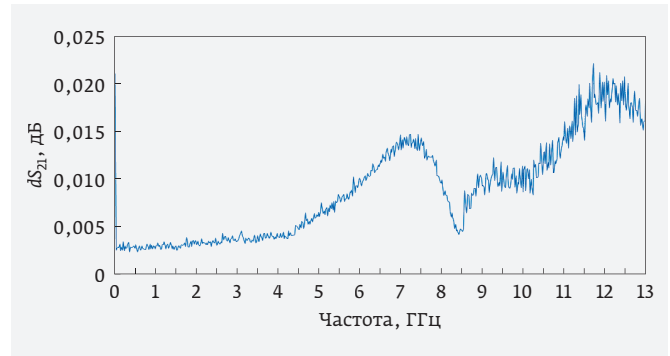


Рис. 10. Стабильность  $S_{21}$  за 500 циклов коммутации

Анализ полученных характеристик показывает, что если включить СВЧ-переключатель в измерительный тракт ВАЦ, провести калибровку и измерить характеристики калибровочной переключки (или соединить порты анализатора между собой, если есть такая возможность), то при коммутации переключателя измеренные значения  $S_{21}$  будут по модулю не более представленных на рис. 10, а  $S_{11}$  – не более значений, представленных на рис. 11.

## ИСПЫТАНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ СВЧ

Одной из главных характеристик переключателя является его ресурс, или количество коммутационных циклов, которые он может выдержать с сохранением всех заявленных характеристик. В данном переключателе заявленный ресурс составляет 1000 переключений – такая величина была обозначена в техническом задании на разработку, так как изделия планировалось использовать в аппаратуре резервирования.

В настоящее время были проведены испытания, в ходе которых образцы выдержали более 500 тыс. циклов коммутации при одновременном воздействии СВЧ-сигнала мощностью 4 Вт в непрерывном режиме. После отработки указанного количества циклов была обнаружена неисправность электромеханического привода, конструкция

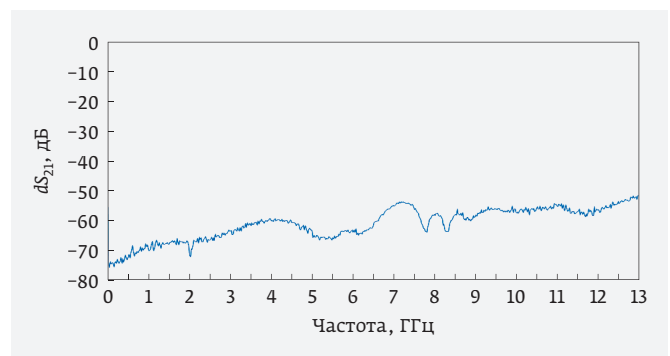


Рис. 11. Стабильность  $S_{11}$  за 500 циклов коммутации

которого была доработана с целью увеличения износостойкости.

В дальнейшем запланированы испытания для последующего обоснования увеличения ресурса.

## ИСПЫТАНИЯ НА МАКСИМАЛЬНУЮ ПРОПУСКАЕМУЮ МОЩНОСТЬ

Для электромеханического переключателя очень важной является способность пропускать сигналы большой мощности. Для ее определения

была проведена серия испытаний, при которых через переключатель пропускался СВЧ-сигнал, контролировалась температура его нагрева в разных точках, величина прошедшей через него мощности, а также проводился контроль S-параметров контактов до и после воздействия. Параметры сигналов, которые были использованы во время испытаний, и температура нагрева переключателя в самой горячей точке (между СВЧ-соединителями в центре корпуса) приведены в табл. 2. Измерения температуры проводились при помощи тепловизора Fluke Ti400.

В режимах под номерами 1 и 2 через переключатель пропускались импульсные сигналы большой амплитуды, но с небольшим средним уровнем мощности. Эти испытания необходимы для определения напряжения пробоя на этих частотах. Перегрев корпуса переключателя в данных режимах относительно температуры окружающей среды в самой горячей точке составил всего несколько градусов и в таблице не указан.

Наиболее сложным с точки зрения теплового воздействия стал режим 4, при этом низкий  $S_{21}$  на этой частоте привел к более высокому тепловыделению по сравнению с режимом 3.

Испытания на максимальную пропускаемую мощность достаточно сложны, так как для их проведения необходимы источники мощного СВЧ-сигнала; при этом желательно иметь набор таких источников, так как необходим разный уровень мощности в различных диапазонах частот. Более того, испытания могут проводиться в течение длительного времени и на нескольких переключателях одновременно, что приводит к невозможности проведения всеобъемлющих испытаний такого рода на практике [5].

Одним из вариантов, который применяется на АО «Иркутский релейный завод», является проведение разовых испытаний на воздействие СВЧ-сигнала с высокой средней мощностью на максимальной частоте или близкой к ней. Максимальный уровень мощности на других частотах определяется исходя из эквивалентности по тепловому воздействию, основываясь на измеренной величине  $S_{21}$  переключателей.

**Таблица 2.** Режимы испытаний на максимальную пропускаемую мощность

Номер режима	Частота, МГц	Пиковая мощность, Вт	Сквозность	Максимальная температура перегрева корпуса относительно окружающей среды, °С
1	1 030	12 300	625	–
2	1 500	10 300	625	–
3	2 775	870	10	46,9
4	9 600	600	10	57,7

Длительные испытания проводятся на постоянном токе, величина которого также рассчитывается исходя из эквивалентности по тепловому воздействию. Величина постоянного тока выбирается исходя из сопротивления контактов на постоянном токе и равенства мощности, выделяемой на переключателе на постоянном токе и на необходимой частоте.

\* \* \*

В данной статье описаны ключевые моменты проектирования контактной системы СВЧ-переключателя, приведены результаты измерения ее S-параметров. Описаны режимы проведенных испытаний на максимальную пропускаемую мощность. Результаты проведенных измерений и испытаний свидетельствуют о высоких характеристиках разработанного переключателя.

Продолжаются работы совместно с заинтересованными потребителями по проведению испытаний разработанных СВЧ-переключателей в различных условиях и режимах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Design Guide Microwave Switches and RF Coaxial Relays. // AN2001-01 Dow-Key Microwave Corporation, 2015, 04 47P. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.dowkey.com/wp-content/uploads/2015/04/AN2001-01-DesignGuide\\_MicrowaveSwitches&RFCoaxialSwitches.pdf](https://www.dowkey.com/wp-content/uploads/2015/04/AN2001-01-DesignGuide_MicrowaveSwitches&RFCoaxialSwitches.pdf).
2. **Cruzan O. R., Garver R. V.** Characteristic Impedance of Rectangular Coaxial Transmission Lines // IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques. PP. 488–495. Sept. 1964.
3. **Прокимов А., Джуринский К., Смирнова Ю.** Перспективные изоляционные материалы для радиочастотных кабелей и соединителей // Компоненты и технологии. 2017. № 2. С. 105–113.
4. **Дансмор Джоэль П.** Измерения параметров СВЧ устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. 736 с. ISBN 978-5-94836-505-3.
5. **Faubrice Janot.** Technology guide for power calculation // Radiall. 2020. 25 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.radiall.com/products/rf-microwave-switches.html>.

