

АНТЕННЫЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ

Разработанный антенный переключатель предназначен для коммутации антенно-фидерного устройства (антенны) радиостанции к выходу усилителя мощности (режим «Передача») либо к входу радиоприемного тракта изделия (режим «Прием»), а также для подключения выхода усилителя мощности к эквиваленту нагрузки. Работа на эквивалент нагрузки может использоваться для осуществления функциональной диагностики устройства без излучения радиосигнала.

Усилитель мощности функционирует в импульсном режиме. Длительность импульса может достигать 100 мс при скважности 2, время работы на передачу не ограничено. Уровень выходной мощности радиостанции в импульсе 150 Вт.

Принципиальная схема антенного переключателя приведена на рис. 1.

Антенный переключатель выполнен с использованием двух трехдецибелных направленных ответвителей на связанных линиях (квадратурный мост) — WE1 и WE2, pin-диодов VD1–VD4, микрополосковых линий W1–W6.

Переключатель имеет следующие режимы работы.

- Режим «Передача». В данном режиме к антенне (контакт 6 «А») подключен выход усилителя мощности (контакт 1 «TX»).
- Режим «Прием». Антенна (контакт 6 «А») подключена к входу приемника (контакт 7 «RX»).
- Режим работы на эквивалент нагрузки («функциональный контроль»). Выход усилителя мощности (контакт 1 «TX») подключен к балластному резистору R1.

Рассмотрим работу антенного переключателя [1, 5, 6, 8].

В режиме «Передача» на pin-диоды VD1–VD4 подается высокое положительное напряжение +100 В через контакты 2–5, при этом pin-диоды закрыты.

С выхода усилителя сигнал мощности поступает на контакт 1 «TX». С контакта 1 радиосигнал направляется на вход делителя мощности на два. Делитель мощности выполнен на трехдецибелном направленном ответвителе WE1 (квадратурном мосте). Сдвиг фазы сигнала на первом выходе (вывод 3) относительно второго выхода (вывод 4) составляет 90°.

С вывода 3 WE1 радиосигнал поступает на вход первого коммутатора, собранного на pin-диодах VD1, VD2 и микрополосковых линиях W1, W3, W5 [2].

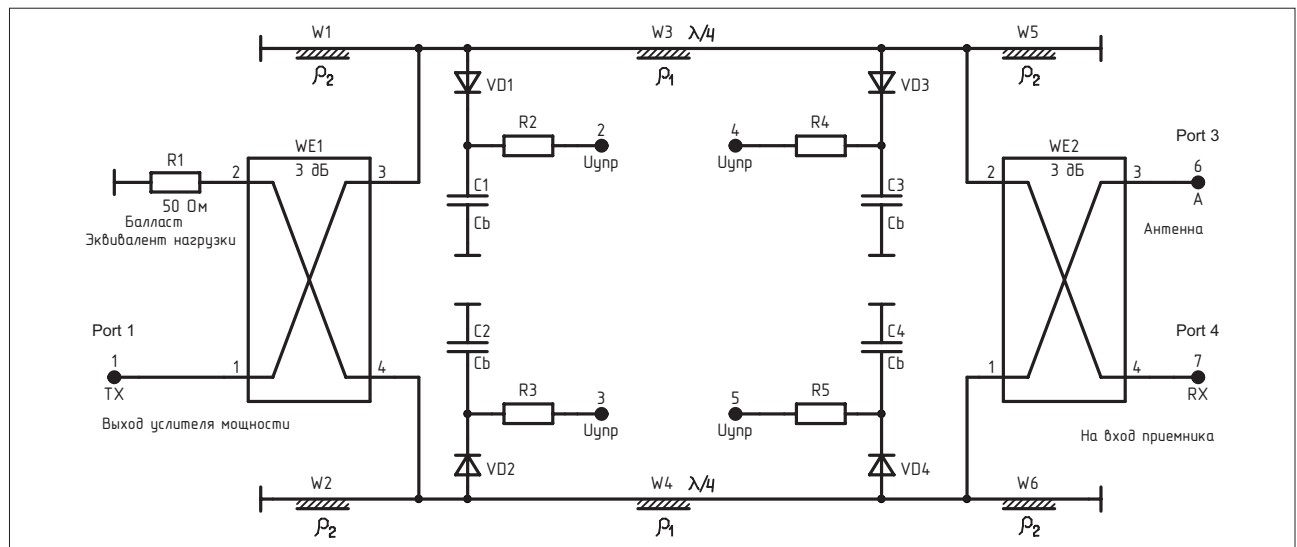
Микрополосковая линия W3 имеет длину, равную четверти длины волны середины рабочего диапазона устройства. Длина микрополосковых линий W1, W5 и волновое сопротивление W1, W3, W5 рассчитаны таким образом, чтобы совместно с емкостями закрытых диодов VD1, VD2 сформировался фильтр с чебышевской характеристикой потерь пропускания в рабочей полосе частот [2]. Полоса пропускания коммутатора не менее 30–50% от средней рабочей частоты устройства.

С вывода 4 WE1 радиосигнал поступает на вход второго коммутатора собранного на pin-диодах VD2, VD4 и микрополосковых линиях W2, W4, W6. Параметры указанных микрополосковых линий выбраны аналогично линиям W1, W3, W5.

Радиосигнал проходит через первый и второй коммутатор и поступает на первый и второй вход сумматора мощности WE2 соответственно. В сумматоре WE2 радиосигнал складывается и поступает на контакт 6 «А». С контакта 6 радиосигнал поступает в антенну.

В режиме «Прием» и в режиме работы на эквивалент нагрузки на pin-диоды VD1–VD4 подается отрицательное напряжение –4 В через контакты 2–5, при этом pin-диоды VD1–VD4 открыты. Резисторы R2–R5 задают ток через диоды и выравнивают токи между ними.

В режиме приема радиосигнал от антенны поступает на контакт 6 «А» коммутатора. С контакта 6 сигнал поступает на вывод 3 элемента WE2. В WE2 радиосигнал делится пополам и поступает на выводы 2 и 1. Подключенные к выводам 2 и 1 pin-диоды VD3, VD4 открыты, поэтому радиосигнал от-



▲ Рис. 1. Принципиальная электрическая схема антенного переключателя

ражается от них и поступает обратно в WE2, суммируется и подается на вывод 7 «RX». Таким образом, сигнал от антенны поступает на вход приемника. Конденсаторы C1–C4 блокируют цепи подачи напряжения управления по переменному току.

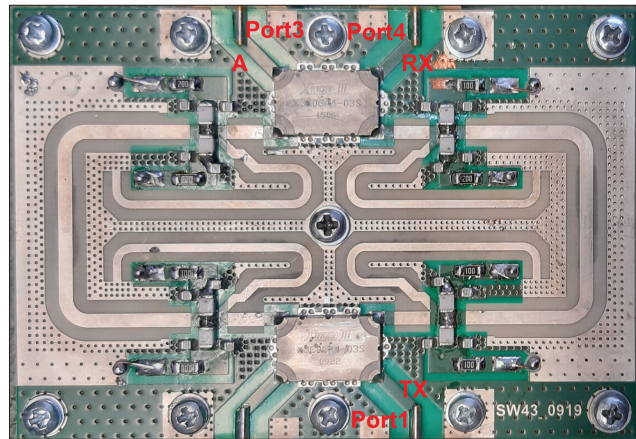
В режиме работы на эквивалент нагрузки сигнал с контакта 1 поступает на вход делителя мощности WE1, а затем на выводы 3 и 4. Подключенные к выводам 3 и 4 pin-диоды VD1, VD2 открыты (диоды представляют собой короткое замыкание для ВЧ-сигнала), поэтому радиосигнал отражается от диодов и поступает обратно в WE1, суммируется и подается на вывод 2. Таким образом сигнал от усилителя мощности поступает на балластный резистор R1.

Часть радиосигнала через открытые диоды VD1, VD2 просачивается далее в схему. Микрополосковая линия W3 и открытый диод VD3 образуют Г-образное звено, которое дополнительно подавляет паразитное прохождение радиосигнала через диод VD1. Линия W4 и диоды VD2, VD4 работают аналогично. Длина микрополосковых линий W3, W4 равна четверти длины волны середины рабочего диапазона. Использование в каждом коммутаторе двух pin-диодов и четвертьволновой микрополосковой линии связи позволяет уменьшить паразитное излучение в антенну при работе на эквивалент нагрузки.

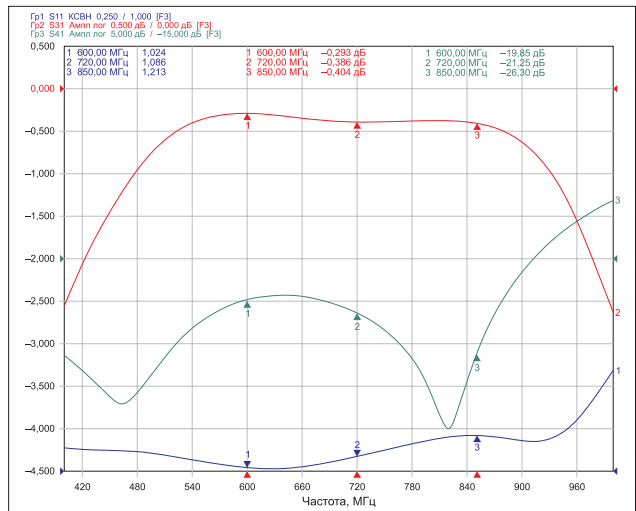
Применение антенного переключателя с такой структурой дает следующие преимущества:

- Использование двух параллельно работающих коммутаторов (коммутатора на элементах VD1, VD3, W1, W3, W5 и коммутатора VD2, VD4, W2, W4, W6), позволяет повысить максимально допустимую коммутируемую мощность в два раза.
- Максимальная допустимая мощность данного коммутатора определяется максимально допустимой мощностью используемых квадратурных мостов и микрополосковых линий, а также максимально допустимой мощностью рассеивания на закрытых pin-диодах (определяется сопротивлением закрытого pin-диоода).
- В режиме передачи pin-диоды находятся в закрытом состоянии. Во время работы при больших уровнях сигнала паразитная рассеиваемая мощность меньше на диодах в том случае, когда они закрыты, чем когда диоды открыты и работают на отражение. Поэтому температура корпуса диодов в закрытом состоянии меньше. Это положительно влияет на надежность изделия в целом.
- При работе в режиме передачи, в тракте прохождения сигнала отсутствуют разделительные емкости. Это исключает потери реактивной мощности в конденсаторах и не ставит в зависимость максимально допустимую мощность в режиме передачи от величины мощности, которую могут выдержать конденсаторы.
- Входное и выходное сопротивление антенного переключателя благодаря применению квадратурных мостов WE1, WE2 близко к 50 Ом. Это позволяет обеспечить хорошее согласование узлов, подключаемых к антенному переключателю.

Трехдецибелльные направленные ответвители WE1 и WE2 (квадратурные мосты) обеспечивают входное сопротивление антенного переключателя для выхода усилителя мощности (контакт 1 «TX») и антенны (контакт 6 «A»), равное 50 Ом, с КСВ, близким к 1 в широкой полосе частот. Объясняется это следующим образом [4]: сигнал с выхода усилителя мощности делится в WE1 пополам и поступает с вывода 3 на первый (VD1, VD3, W1, W3, W5), а с вывода 4 на второй (VD2, VD4, W2, W4, W6) коммутатор. Входное сопротивление коммутаторов в рабочей полосе частот может не соответствовать 50 Ом. Из-за этого часть мощности отражается от коммутаторов и поступает обратно в WE1. Но благодаря свойствам квадратурного моста эта мощность поступает не на вход (контакт 1), а в балластный резистор R1. Поэтому входное сопротивление коммутатора антенны для выхода усилителя мощности равно 50 Ом и КСВ близко к 1.

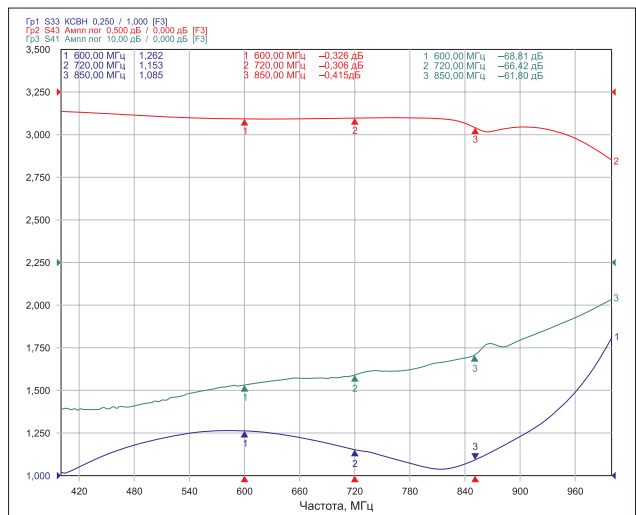


▲ Рис. 2. Антенный переключатель в сборе



▲ Рис. 3. Режим «Передача».

Красный график — коэффициент передачи S31 (контакт 1 «TX»/контакт 6 «A»); синий график — КСВ входа коммутатора контакт 1 «TX» (S11); зеленый график — коэффициент передачи S41 (контакт 1 «TX»/контакт 7 «RX»)

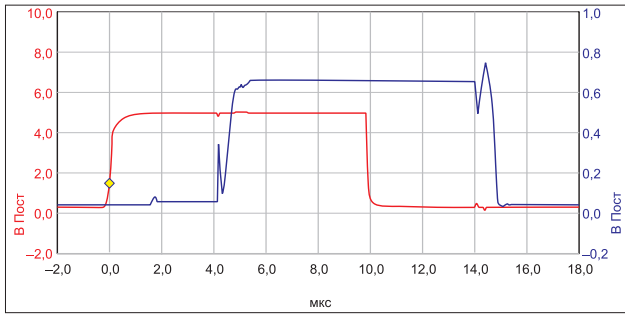


▲ Рис. 4. Режим «Прием».

Красный график — коэффициент передачи S43 (контакт 6 «A»/контакт 7 «RX»); синий график — КСВ входа антенны коммутатора (S33, контакт 6 «A»); зеленый график — коэффициент передачи S41 (контакт 1 «TX»/контакт 7 «RX»)

Аналогичным образом определяется выходное сопротивление антенного переключателя к антенне (контакт 6).

Таким образом, в режиме передачи КСВ входа (к усилителю мощности) и выхода коммутатора (к антенне) определяется разбросом параметров первого и второго коммутатора, качеством квадратурных мостов WE1 и WE2 [4].



▲ **Рис. 5.** Режим переключения «Прием»/«Передача»/«Прием». Красный график — импульс управления на входе платы управления коммутатором антенны. Синий график — импульс на выходе детектора огибающей, подключенного к выходу антенного коммутатора

Однако следует отметить, что для обеспечения низких потерь в антенном переключателе в режиме передачи КСВ первого (VD1, VD3, W1, W3, W5) и второго (VD2, VD4, W2, W4, W6) коммутатора должно быть близкими к 1 в рабочей полосе частот. В противном случае КСВ входа антенного переключателя будет близок к 1, но часть генерируемой мощности будет рассеиваться в эквиваленте нагрузки R1 и, следовательно, возрастут потери сигнала в режиме работы «Передача».

Конструктивно антенный переключатель собран на печатной плате из СВЧ-материала RO4350 толщиной 0,762 мм. Внешний вид антенного переключателя в сборе приведен на рис. 2. Каждый из pin-диодов VD1–VD4 заменен двумя параллельно включенными диодами для уменьшения сопротивления диодов в открытом состоянии и симметрии схемы.

На рис. 3–5 приведены измеренные характеристики антенного переключателя для различных режимов работы.

В режиме «Передача» потери антенного переключателя (параметр S31) не превышают 0,45 дБ в полосе рабочих частот более 150 МГц (рис. 3), КСВ входа для усилителя мощности (параметр S11) не превышает 1,3. Паразитное прохождение сигнала с выхода усилителя мощности на вход приемника в режиме передачи (параметр S41) не более –20 дБ.

Для дополнительного уменьшения сигнала на входе приемника установлен интегральный коммутатор малой мощности, который подключает в режиме передачи к контакту 7 «RX» резистор 50 Ом.

В режиме «Прием» потери сигнала антенна/приемник (параметр S43) не превышают 0,4 дБ (рис. 4), паразитное прохождение сигнала с выхода усилителя на вход приемника (параметр S41) не более –60 дБ. КСВ входа антенны (параметр S33) не превышает 1,3.

Для подачи требуемого напряжения на pin-диоды разработана плата управления антенного коммутатора (плата УАК). Плата УАК при поступлении сигнала ТТЛ-уровня подает на контакты 2–5 запирающее напряжение диоды напряжение +100 В в режиме «Передача» и открывающее диоды –4 В в режиме «Прием».

Величина запирающего напряжения 100 В определялась допустимым уровнем гармоник сигнала на выходе коммутатора. При выбранном напряжении 100 В уровень гармоник сигнала при мощности сигнала 150 Вт не превышал –60 дБ.

Для определения скорости переключения на вход «TX» подавался непрерывный сигнал от внешнего ВЧ-генератора с уровнем 10 дБм [7]. На вход управления платы УАК подавался видеосигнал длительностью 10 мкс. Результат измерения представлен на рис. 5. Красный график — импульс управления на входе платы управления антенного переключателя. Синий график — импульс на выходе детектора огибающей несущей частоты, подключенного к выходу «А» устройства. Как видно из графиков, время переключения режимов «Прием»/«Передача» и «Передача»/«Прием», не превышает 6 мкс. Причем задержка, вносимая самой платой УАК, равна 4 мкс, задержка, вносимая перезарядом pin-диодов и емкостей блокировки, составляет 2 мкс.

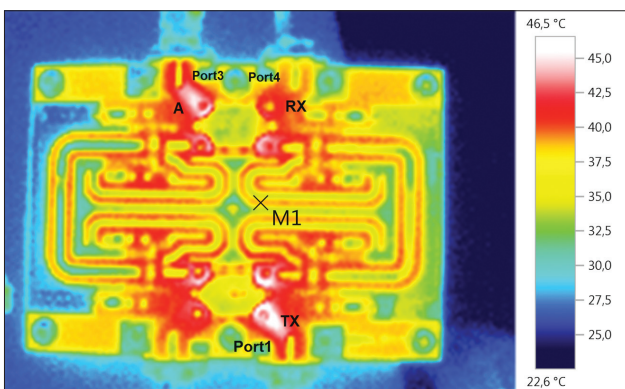
На рис. 6 приведено измеренное инфракрасное изображение распределения температуры на верхней поверхности антенного переключателя в режиме передачи, а на рис. 7 — в режиме работы на эквивалент антенны. Измерения проводились при длительности импульса передачи 50 мс, период следования 100 мс. Уровень пиковой мощности на выходе Port3 равнялся 150 Вт, средняя мощность составляла 75 Вт.

Плата коммутатора установлена на отдельном радиаторе с естественным охлаждением. Для улучшения теплоотвода корпуса квадратурных мостов WE1, WE2 припаяны к поверхности платы. Температура окружающей среды составляла +24 °С.

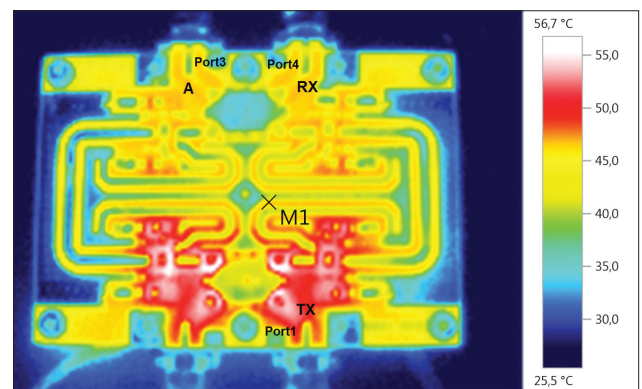
В режиме «Передача» на рис. 6 температура корпуса pin-диодов не превышала +36 °С. Самую высокую температуру (+46 °С) имеет микрополосковая линия передачи на входе Port1 и выходе Port3 антенного переключателя, а также выводы подключения квадратурных мостов. Очевидно, температуру +46 °С имели проводники квадратурных мостов внутри корпуса.

В режиме работы на эквивалент нагрузки на рис. 7 температура поверхности корпуса pin-диодов VD1, VD2 составила +53 °С. Самая высокая температура (+54 °С) была у микрополосковой линии передачи на входе Port1, подключенной к эквиваленту нагрузки. Температура выводов подключения квадратурных мостов равнялась +55 °С.

В данном режиме квадратурный мост WE1 подвергается большему нагреву, чем в режиме передачи, поскольку че-



▲ **Рис. 6.** Инфракрасное изображение распределения температуры на верхней поверхности антенного переключателя в режиме передачи



▲ **Рис. 7.** Инфракрасное изображение распределения температуры на верхней поверхности антенного переключателя в режиме работы на эквивалент нагрузки

рез него проходит падающая и отраженная от диодов мощность сигнала. Температура поверхности корпуса pin-диодов VD3, VD4 в данном режиме составила +44 °С. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Малорацкий Л. Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. М.: Советское радио, 1976.
2. Вайсблат А. В. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах. М.: Радио и связь, 1987.
3. Дзехцер Г. Б., Орлов О. С. Pin-диоды в широкополосных устройствах СВЧ. М.: Советское радио, 1970.
4. Шахгильдян В. В., Козырев В. Б., Ляховкин А. А. и др. Радиопередающие устройства. Учебник для вузов. Под ред. Шахгильдяна В. В. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Радио и связь, 2003.
5. Hewlett Packard. Applications of PIN Diodes. Application Note 922.
6. Rodriguez-Morales F., Gogineni S., Ahined F., Carabajal C., Paden F., Leuschen C., Paden J., Li J., Fields W., Vaughan J. T/R Switches and Modules for Ice Sounding/Imaging Radar. Aerospace & Defense Electronics supplement. May, 2016.
7. Кочемасов В, Сафин А., Дингес С. Твердотельные СВЧ-переключатели с высокой скоростью коммутации. Часть 1. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2020, № 10.
8. Кочемасов В., Дингес С., Шадский В. Твердотельные СВЧ-переключатели средней и большой мощности. // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2019. №№ 8–10.