

## ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ РЕЗОНАНСНОГО СВЧ КОМПРЕССОРА С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МОЩНОСТЬЮ КОММУТИРУЕМОЙ ВОЛНЫ

© 2020 г. С. Н. Артёмов<sup>а</sup>, \*, С. А. Горев<sup>а</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
пр. Ленина, 30, Томск, 634050 Российская Федерация

\*E-mail: snartemenko@mail.ru

\*\*E-mail: gsalsc@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.04.2018 г.

После доработки 13.09.2019 г.

Принята к публикации 15.09.2019 г.

Выполнен анализ характеристик интерференционного СВЧ-переключателя с распределенной мощностью коммутируемой волны как устройства вывода энергии активного резонансного СВЧ-компрессора. Предлагаемое устройство представляет собой каскад обычных СВЧ-переключателей на основе Н-тройников, последовательно соединенных прямыми плечами. Показано, что такой переключатель способен кратно понизить мощность коммутируемой волны, равномерно распределив ее по коммутаторам тройников, что обеспечивается регулировкой длины плеч тройников. Установлено также, что между длинами существует функциональная связь, при которой достигается равномерное распределение. Представлены результаты экспериментального исследования СВЧ-переключателя из двух и/или трех тройников на низком и высоком уровне мощности.

DOI: 10.31857/S003384942003002X

### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия источники мощного импульсного СВЧ-излучения пополнились усилительными приборами нового типа – резонансными компрессорами СВЧ-импульсов [1, 2]. Резонансные СВЧ-компрессоры – это пассивные усилители импульсной СВЧ-мощности, работающие на основе накопления в резонаторе энергии относительно длинного СВЧ-импульса и быстрого вывода этой энергии в нагрузку. Они достаточно просты, могут быть созданы на хорошо освоенной промышленной элементной базе и имеют относительно невысокую стоимость. В то же время компрессоры могут обеспечить весьма высокий коэффициент усиления и высокий уровень рабочей мощности. При использовании медных накопительных резонаторов их коэффициент усиления может достигать 20...25 дБ и более, а мощность быть сопоставимой с мощностью релятивистских СВЧ-генераторов и усилителей. Это делает компрессоры достаточно привлекательными для применения в различных областях науки и техники.

Сформировалось два направления развития СВЧ-усилителей такого типа – пассивные и активные резонансные СВЧ-компрессоры. Как первые, так и вторые являются усилителями пассивными, так как в них отсутствует источник энергии и усиление обеспечивается за счет укорочения импульса СВЧ. Отличие усилителей этих направле-

ний заключается в характере “взаимодействия” СВЧ-импульса с резонатором. В пассивных компрессорах параметры резонатора при накоплении и выводе СВЧ-энергии не меняются, в то время как в активных накопление и вывод осуществляется быстрой модуляцией одного из основных параметров резонатора – его добротности. Эффективная модуляция является главной проблемой активных компрессоров.

Как правило, модуляция осуществляется с помощью устройства вывода или переключателя, переводящих резонатор из режима накопления в режим вывода. В режиме накопления устройство сохраняет высокую добротность резонатора и быстро и сильно понижает ее в режиме вывода. От эффективности работы переключателя и, прежде всего, от времени переключения, потерь при переключении, переходного ослабления в режиме накопления и вывода зависит эффективность работы СВЧ-компрессора.

В большинстве активных СВЧ-компрессоров в качестве устройства вывода используется интерференционный СВЧ-переключатель на основе Н-тройника. Такой переключатель представляет собой Н-тройник, одно плечо которого, прямое, служит входом и связано с резонатором, второе плечо, прямое или боковое, имеет полуволновую длину и замкнуто. В этом плече располагается СВЧ-коммутатор. Свободное плечо служит выходом и связано с нагрузкой. В таком устройстве

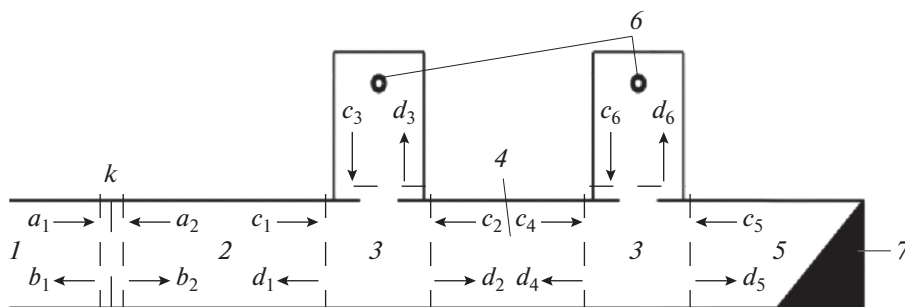


Рис. 1. Схема резонансного СВЧ-компрессора с каскадным интерференционным переключателем: 1 – вход, 2 – резонатор, 3 – Н-тройники, 4 – общее прямое плечо, 5 – выход, 6 – боковые плечи с коммутаторами, 7 – нагрузка.

волны, излучаемые в выходное плечо из резонатора и замкнутого плеча, имеют практически равные амплитуды и суммируются в противофазе, обеспечивая резонатору режим “закрыто”. После включения коммутатора фаза волны в замкнутом плече меняется на  $\pi$  и излучаемые волны суммируются в фазе, что открывает тройник.

Электрическая прочность и площадь сечения волновода, из которого изготовлен тройник, ограничивают рабочую мощность такого устройства. Более того, в большинстве таких переключателей в качестве коммутатора используется плазменный газонаполненный СВЧ-разрядник. Как правило, он включает в себя различные элементы, такие как разрядная трубка, окна для ввода трубки, подсветки или продува разрядного промежутка и т.п., которые еще сильнее понижают прочность переключателя. Этому же способствует и использование в переключателе тройника, как правило несогласованного, имеющего в коммутирующем плече повышенную амплитуду поля по сравнению с амплитудой во входном плече. Поэтому улучшение качества такого переключателя связано с повышением электрической прочности СВЧ-коммутатора. Традиционные методы повышения – оптимизация конструкции, использование более прочной среды и т.п. – практически себя исчерпали и заметного улучшения не дают, поэтому повышение характеристик интерференционного СВЧ-переключателя требует развития новых подходов к организации его устройства.

Один из таких подходов предложен и проанализирован в [3], где рассмотрен переключатель для пассивных СВЧ-компрессоров с распределенной по каскаду тройников инверсией фазы коммутируемой волны. Распределение фазы позволяет размещать коммутаторы в относительно слабом поле и увеличивать мощность передаваемой волны.

В [4] с этой же целью предложено распределять не фазу, а мощность коммутируемой волны. Фаза в каждом тройнике при этом меняется на  $\pi$ . Эксперименты показали, что при последовательном включении обычных переключателей можно управлять распределением энергии в плечах, регулируя их длину, и таким образом создавать пе-

реключатели с распределенной коммутируемой мощностью.

Цель данной статьи – исследовать СВЧ-переключатели с распределенной мощностью коммутируемой волны, выполненные из последовательно соединенных Н-тройников.

### 1. АНАЛИЗ КАСКАДНОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

Рассмотрим переключатель с коммутируемой мощностью, распределенной в каскаде из двух Н-тройников. Схема компрессора с таким переключателем приведена на рис. 1.

Анализ выполним методом матрицы рассеяния, согласно которому для амплитуд волн в рассматриваемой системе можно записать равенства

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = S_1 \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} = S_2 \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{pmatrix} = S_2 \begin{pmatrix} c_4 \\ 0 \\ c_6 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $S_1, S_2$  – матрицы рассеяния входного окна связи резонатора и Н-тройника, а векторы составлены из амплитуд падающих и отраженных волн в элементах системы и

$$S_1 = \begin{vmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\sqrt{1-k^2} & jk \\ jk & -\sqrt{1-k^2} \end{vmatrix},$$

$$S_2 = \begin{vmatrix} s_{r11} & s_{r12} & s_{r13} \\ s_{r21} & s_{r22} & s_{r23} \\ s_{r31} & s_{r32} & s_{r33} \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} \frac{-1 + \sqrt{1-h^2}}{2} & \frac{1 + \sqrt{1-h^2}}{2} & \frac{h}{\sqrt{2}} \\ \frac{1 + \sqrt{1-h^2}}{2} & \frac{-1 + \sqrt{1-h^2}}{2} & \frac{h}{\sqrt{2}} \\ \frac{h}{\sqrt{2}} & \frac{h}{\sqrt{2}} & -\sqrt{1-h^2} \end{vmatrix},$$

где  $k$  и  $h$  – коэффициент передачи входного окна связи резонатора и окна связи бокового плеча Н-тройника с симметричными плечами. Кроме

равенств (1), для волн в элементах системы с переключателем из двух тройников можно записать соотношения:

$$\begin{aligned} a_1 &= 1, \quad a_2 = d_1 \exp\left(-\frac{\alpha}{2} - j\frac{\varphi}{2}\right), \\ c_1 &= b_2 \exp\left(-\frac{\alpha}{2} - j\frac{\varphi}{2}\right), \\ c_2 &= d_4 \exp\left(-\frac{\gamma}{2} - j\frac{\xi}{2}\right), \\ c_3 &= -d_3 \exp(-\beta - j\psi), \\ c_4 &= d_2 \exp\left(-\frac{\gamma}{2} - j\frac{\xi}{2}\right), \quad c_6 = -d_6 \exp(-\delta). \end{aligned} \quad (2)$$

В соотношениях (2) принято  $\alpha = 0.0015$ ,  $\beta = \gamma = \delta = 0.0005$  – затухания волн при двойном пробеге резонатора, общего и боковых плеч тройников;  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\xi$  – набег фаз волн в резонаторе, в боковом плече первого тройника и общем боковом плече соответственно. Значения затуханий взяты для компрессора 10-сантиметрового диапазона длин волн, в котором выполнены экспериментальные исследования переключателей.

Используя (1), (2) для системы из двух тройников, можно получить для амплитуд волн в элементах каскада следующие выражения:

1) для волны в резонаторе –

$$b_2 = \frac{jk}{1 + s_{22} \exp(-\alpha - j\varphi) \left[ s_{r11} - \frac{(s_{r13}s_{r31} \exp(-\beta - j\psi)) F}{1 - s_{r33} \exp(-\beta - j\psi) G} \right]}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} F &= \left[ s_{r11} - \frac{(s_{r13}s_{r31} \exp(-\delta))}{1 - s_{r33} \exp(-\delta)} + \right. \\ &+ \left. \frac{(s_{r21} (1 + s_{r32} \exp(-\delta)) - s_{r23}s_{r31} \exp(-\delta)) \left( s_{r12} \exp(-\gamma - j\xi) - \frac{s_{r13}s_{r31} \exp(-\delta)}{(1 + s_{r33} \exp(-\delta))} \right)}{[(1 + s_{r33} \exp(-\delta))(1 - s_{r22} \exp(-\gamma - j\xi)) - s_{r23}s_{r32} \exp(-\gamma - \delta - j\xi)]} \right], \\ G &= \left[ s_{r11} - s_{r13}s_{r31} \exp(-\delta) \frac{s_{r13}s_{r31} \exp(-\delta)}{(1 + s_{r33} \exp(-\delta))} + \right. \\ &+ \left. \frac{(s_{r21} (1 + s_{r32} \exp(-\delta)) - s_{r23}s_{r31} \exp(-\delta)) \left( s_{r12} \exp(-\gamma - j\xi) - \frac{s_{r13}s_{r31} \exp(-\delta)}{(1 + s_{r33} \exp(-\delta))} \right)}{[(1 + s_{r33} \exp(-\delta))(1 - s_{r22} \exp(-\gamma - j\xi)) - s_{r23}s_{r32} \exp(-\gamma - \delta - j\xi)]} \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

2) для волны в боковом плече первого тройника –

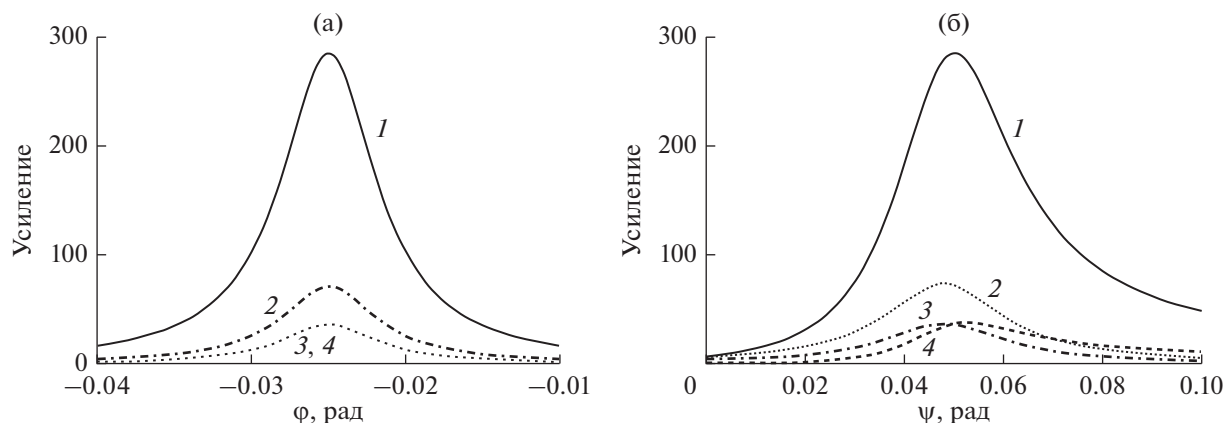
$$d_3 = \frac{b_2}{1 - s_{r33} \exp(-\beta - j\psi) \left[ s_{r11} + \frac{s_{r13}s_{r31} \exp(-\delta)}{(1 + s_{r33} \exp(-\delta))} + \frac{(s_{r21} (1 + s_{r32} \exp(-\delta)) - s_{r23}s_{r31} \exp(-\delta)) \left( s_{r12} \exp(-\gamma - j\xi) - \frac{s_{r13}s_{r31} \exp(-\delta)}{(1 + s_{r33} \exp(-\delta))} \right)}{[(1 + s_{r33} \exp(-\delta))(1 - s_{r22} \exp(-\gamma - j\xi)) - s_{r23}s_{r32} \exp(-\gamma - \delta - j\xi)]} \right]}, \quad (5)$$

3) для волны в боковом плече второго тройника –

$$d_6 = \frac{\left[ s_{r31} + \frac{(s_{r32}s_{r21} (1 + s_{r32} \exp(-\delta)) - s_{r23}s_{r31} \exp(-\delta))}{((1 + s_{r33} \exp(-\delta))(1 - s_{r22} \exp(-\gamma - j\xi)) - s_{r23}s_{r32} \exp(-\gamma - \delta - j\xi))} \right] d_3}{(1 + s_{r33} \exp(-\delta))};$$

4) для волны на выходе переключателя –

$$d_5 = \frac{s_{r21} (1 + s_{r32} \exp(-\delta)) - s_{r23}s_{r31} \exp(-\delta)}{((1 + s_{r33} \exp(-\delta))(1 - s_{r22} \exp(-\gamma - j\xi)) + s_{r23}s_{r32} \exp(-\gamma - \delta - j\xi))} d_3. \quad (6)$$



**Рис. 2.** Зависимости усиления в резонаторе (1), общем (2) и боковых плечах (3, 4) двух согласованных Н-тройников переключателя: а — от фазы  $\phi$  волн в резонаторе при фазах волн в боковом плече первого тройника и общем плече тройников соответственно,  $\psi = 0.1$  и  $\xi = 0.05$  рад; б — от фазы  $\xi$  волн в общем плече тройников при фазах волн в боковом плече первого тройника и резонаторе соответственно,  $\psi = 0.1$  и  $\phi = -0.025$  рад.

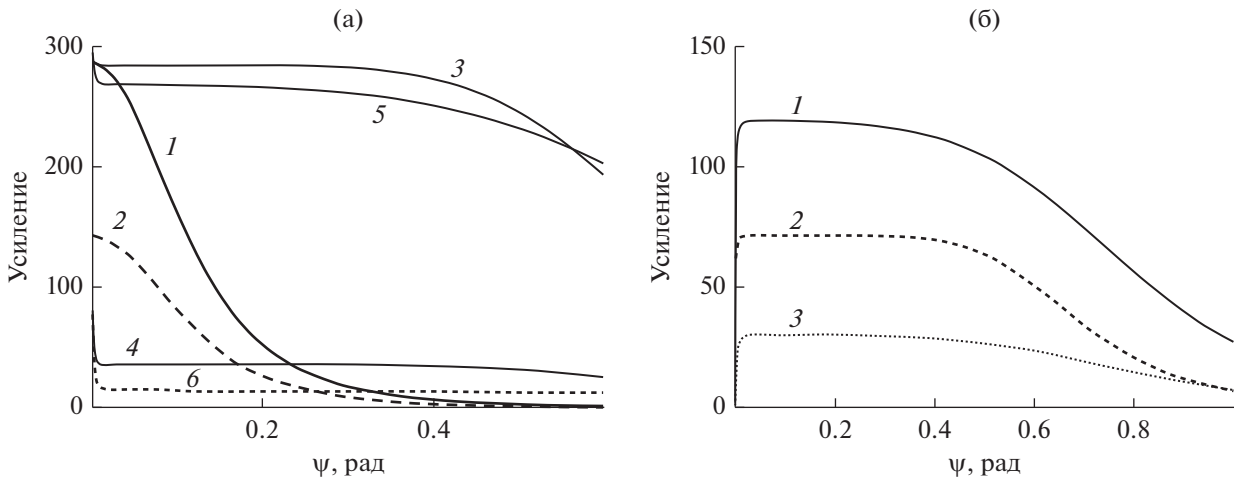
В [4] показано, что коммутируемую в обычном переключателе мощность можно понизить, равномерно распределив ее в переключателе в виде каскада согласованных Н-тройников. Там же показано, что в таком переключателе включение коммутатора одного из тройников ведет к скачкообразному увеличению коммутируемой мощности во втором. Иные особенности каскадного переключателя в [4] не рассматривались. Для создания эффективно работающего устройства этих данных недостаточно. Требуется более детальное знание особенностей. Например, о допустимом интервале и закономерности изменения длины плеч тройников или о влиянии качества согласования тройников и очередности включения коммутаторов на характеристики переключателя и других не менее важных особенностей.

Выражения (3)–(6) позволяют получить ответ на поставленные и другие вопросы, используя стандартные методы математического анализа. Однако в данном случае эти методы трудоемки, поэтому ответы получены из анализа зависимостей, построенных по (3)–(6) с помощью пакета прикладных программ (рис. 2). Так, допустимый интервал изменения длины плеч и функциональная связь этих длин получены из зависимости усиления мощности волн в резонаторе и плечах тройников от набега фазы  $\phi$  при двойном пробеге волны вдоль резонатора. Для переключателя из двух тройников, согласованных со стороны бокового плеча ( $h = 1$ ), эти зависимости подобны тем, что представлены на рис. 2а. С целью проверки общности следующих из них выводов, зависимости строили для нескольких значений набега фазы  $\psi$ . При этом для каждого  $\psi$  подбирали такую величину фазы  $\xi$ , при которой зависимости от  $\phi$  для усиления в боковых плечах совпадали (рис. 2а, кривые 3, 4). Далее, для каждой пары  $\psi$  и  $\xi$  фиксировали величину  $\phi$ , соответствующую максимуму усиления в резонаторе. Для проверки корректности выбора  $\phi$ ,  $\psi$  и  $\xi$  строились зависи-

мости от  $\psi$ , аналогичные представленным на рис. 2б. Наборы значений  $\phi$ ,  $\psi$ ,  $\xi$  позволяют установить связь электрической длины  $\psi/2$  бокового плеча входного тройника с длиной  $\phi/2$  резонатора и  $\xi/2$  общего плеча тройников. Так, выразив  $\phi$  и  $\xi$  через  $\psi$ , можно построить зависимости усиления волн в элементах компрессора только от  $\psi$  (рис. 3а, кривые 3, 4). Зависимости демонстрируют диапазон изменения длины бокового плеча входного тройника, в границах которого обеспечивается равенство коммутируемой мощности в боковых плечах тройников.

Как видно из рис. 3а, усиление в резонаторе равно  $\sim 290$ . Поэтому согласно пропорциям деления мощности в согласованном тройнике [5] в боковом плече обычного переключателя на основе такого тройника усиление составит  $\sim 145$ . Вместе с тем также по данным рис. 3 получаем, что усиление в боковых плечах каскадного переключателя равно  $\sim 38$ , а в общем плече  $\sim 73$ . Таким образом, в компрессоре с обычным переключателем отличие усиления в резонаторе и плече с коммутатором двукратное, тогда как с переключателем из двух тройников оно восьмикратное, т.е.  $\sim 2^n + 1$ , где  $n$  — число тройников в каскаде. Из рис. 3 также следует, что максимум энергии в резонаторе достигается при сдвиге резонансной частоты на величину, соответствующую  $\phi \approx -\psi/4 = -\psi/2n$ . Нетрудно также видеть, что усиление в боковых плечах совпадает при  $\xi \approx \psi/2$ .

В интервале изменения  $\psi$  от  $\sim \alpha$  до  $\sim 0.4$  рад усиление в элементах меняется слабо (рис. 3а, кривые 3, 4). В резонаторе оно практически равно усилению в компрессоре с обычным переключателем, в боковых плечах почти в четыре, а в общем плече в два раза меньше, чем в боковом плече тройника обычного переключателя. Это означает, что приоткрытое боковое плечо первого тройника ведет к распределению энергии только из этого плеча. Иными словами, в переключателе из двух



**Рис. 3.** Расчетные зависимости усиления от фазы  $\psi$  волны в боковом плече первого тройника каскада (а) для компрессора с обычным переключателем (1, 2) при  $\varphi = -\psi/2$ , с каскадным переключателем из двух тройников (3, 4) при  $\varphi = -\psi/4$ ,  $\xi = -0.5\psi$ , с каскадным переключателем из трех тройников (5, 6) при  $\varphi = -\psi/6$ ,  $\xi = 0.125\psi$ ,  $\theta = 0.25\psi$ ,  $\kappa = 0.5\psi$ : 1, 2, 3 – в резонаторе, 2, 4, 6 – боковых плечах; те же зависимости в общих плечах (б) в переключателе с двумя тройниками (1) и с тремя тройниками: между первым и вторым (2) и между вторым и третьим (3).

согласованных тройников распределяется только мощность коммутируемой волны. Мощность волны, подводимой к переключателю, остается практически неизменной.

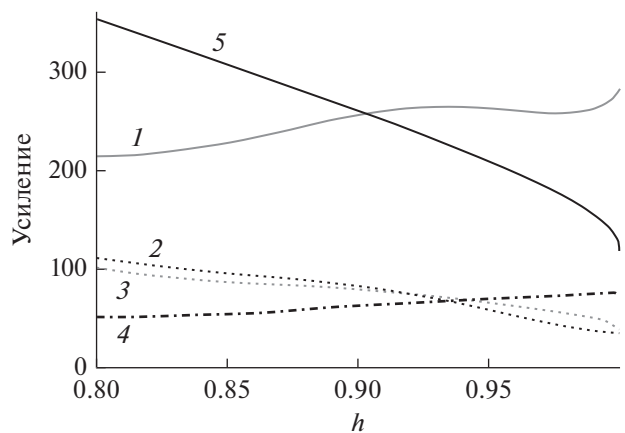
На практике обеспечить полное согласование невозможно, т.е. всегда  $h < 1$ . Поэтому естественен вопрос о зависимости распределения коммутируемой мощности от качества согласования тройников. Для того, чтобы ответить, на рис. 4 были построены зависимости усиления от  $h$  с такими  $\psi$ ,  $\varphi$  и  $\xi$ , которые обеспечивали равенство усиления в боковых плечах тройников и максимум усиления в резонаторе. Из зависимостей следует, что по мере снижения качества согласования усиление в боковых плечах растет, а в общем плече и резонаторе – падает.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

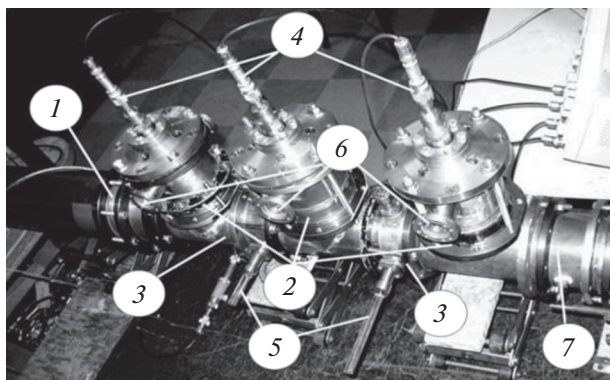
Экспериментальные исследования были выполнены на низком и высоком уровне мощности на частоте  $f_0 \approx 2.8$  ГГц.

Эксперименты, проводимые на низком уровне мощности, были начаты с проверки наиболее важных свойств исследуемого переключателя – равномерного распределения коммутируемой мощности при накоплении, а также увеличения этой мощности от коммутатора к коммутатору в режиме вывода. Исследовали переключатель из трех идентичных Н-тройников, выполненных из круглого волновода диаметром 90 мм (рис. 5). Вход переключателя через стандартные элементы тракта подключали к измерительному генератору, а выход нагружали эквивалентом антенны.

Выравнивание поля в боковых (коммутирующих) плечах, замкнутых мембранами с калиброванными детекторами, фиксированными по центру мембран, выполняли с помощью сдвига этих мембран и регулировки длины общих плеч тройников (с помощью) путем введения кварцевого стержня в максимум напряженности  $E$ -поля в этом плече. Осциллограммы, демонстрирующие равномерное распределение мощности коммутируемой волны в переключателе из трех тройников, приведены на рис. 6а. Осциллограммы рис. 6б отражают распределение амплитуды поля



**Рис. 4.** Приближенные зависимости усиления в элементах компрессора (1 – в резонаторе, 2 – в боковом плече первого тройника, 3 – в боковом плече второго тройника, 4 – в общем прямом плече) с переключателем из двух тройников от коэффициента передачи  $h$  тройника со стороны бокового плеча при  $\psi = 0.05$  и  $\xi, \varphi$ , соответствующих равенству усиления в боковых плечах и максимуму усиления в резонаторе; 5 – зависимость от  $h$  усиления в боковом плече обычного переключателя.



**Рис. 5.** Каскадный интерференционный СВЧ-переключатель 10-сантиметрового диапазона длин волн на основе трех Н-тройников из круглого волновода: 1 – вход переключателя, 2, 3 – соответственно боковые и общие плечи тройников, 4 – элементы контроля поля (петли регулируемой связи с калиброванными СВЧ-детекторами), 5 – кварцевые стержни подстройки, 6 – трубки СВЧ-коммутаторов, 7 – выход переключателя.

в боковых плечах при имитации включения коммутатора третьего тройника. В результате такого включения амплитуда поля в боковом плече второго тройника увеличилась более чем в пять раз, а в первом – уменьшилась в полтора раза. Имитация включения коммутаторов третьего и второго тройников обеспечивает более чем семикратное увеличение поля в боковом плече первого тройника (рис. 6в). Такое поведение поля в коммутирующих плечах наблюдается при любой последовательности включения коммутаторов и подтверждает справедливость выводов анализа.

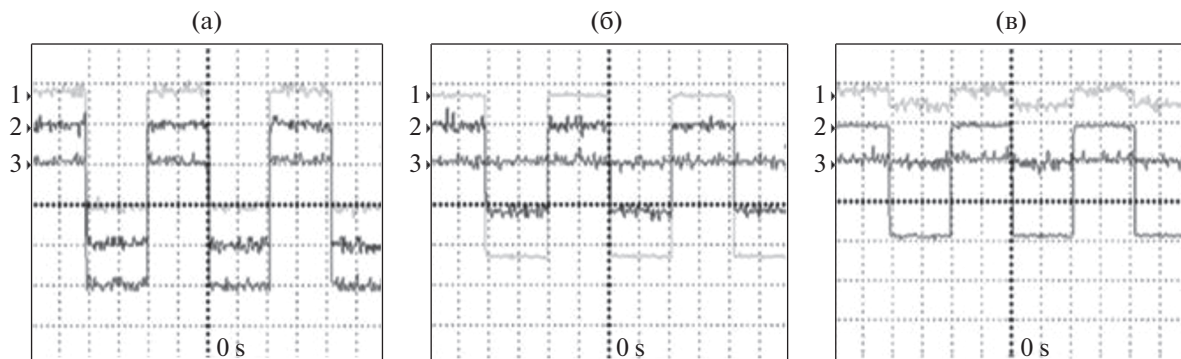
На высоком уровне мощности исследована работа каскадного переключателя как устройства вывода. Сначала был выполнен контрольный эксперимент на компрессоре с обычным переключателем на основе несогласованного тройника. Затем были выполнены эксперименты на каскадном переключателе, ориентированные на получение

данных по электрической прочности и эффективности переключателя.

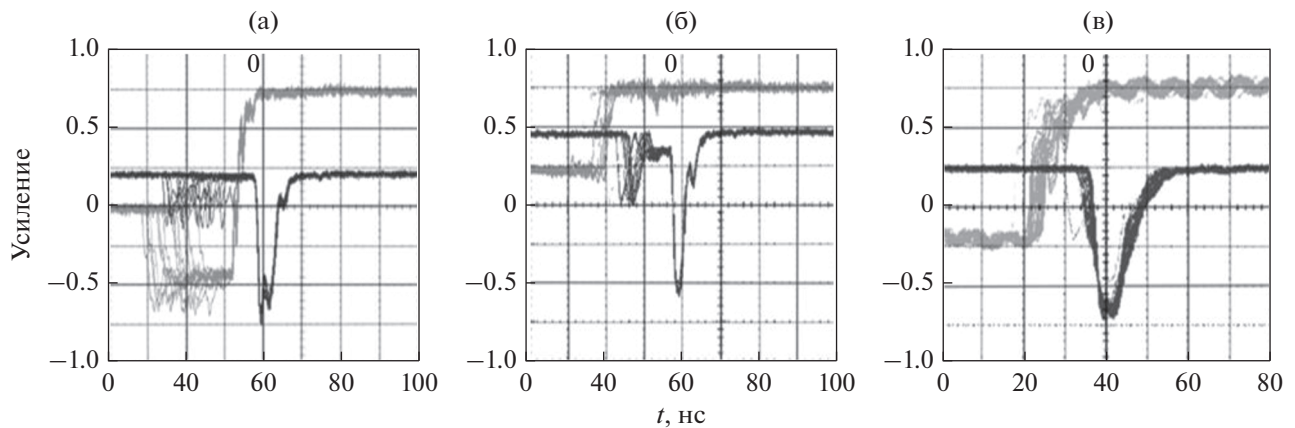
Коммутатор переключателей был идентичен его аналогу [6] и представлял собой разрядник тригatronного типа в виде продуваемой кварцевой трубки, на одном из торцов которой был размещен электрический разрядник подсветки разрядного промежутка. Трубку помещали в боковом плече в максимуме электрического поля и ориентировали по силовым линиям  $TE_{11}$  рабочей волны переключателя.

Энергия накапливалась в медном цилиндрическом резонаторе, диаметр которого 120 мм и длина ~700 мм. Рабочим видом колебаний служил вид  $TE_{11(11)}$  с измеренной собственной добротностью  $Q_0 \approx 3 \times 10^4$  и расчетным временем  $T_c$  двойного пробега рабочей волны вдоль резонатора 5.3 нс. Поэтому расчетное максимальное усиление  $G$  компрессора равнялось  $Q_0/2\pi f_0 T_c \approx 25$  дБ при длительности формируемых импульсов, равной  $T_c$ . К резонатору переключатель был подсоединен прямым плечом первого тройника. Выходное прямое плечо окончного тройника было соединено с эквивалентом антенны. В экспериментах резонатор, а также волноводные тракты оставались неизменными, менялась только конфигурация переключателя. Изменения затрагивали количество тройников и качество согласования.

Источником входных импульсов служил магнетрон с выходными импульсами длительностью 3 мкс и мощностью 0.8...2 МВт. При указанной длительности импульсов магнетрона и добротности резонатора оптимальный коэффициент входной связи резонатора составляет ~1.3, расчетная эффективность накопления ~0.51, а коэффициент усиления ~24.5 дБ. Поэтому максимальная расчетная мощность импульсов компрессора, равная мощности бегущей волны резонатора, составляла ~570 МВт. Расчетная напряженность поля в боковом плече несогласованного тройника ( $h = 0.8$ ) близка к 380 кВ/см. Ожидалось, что в



**Рис. 6.** Осциллограммы сигналов, полученные с боковых плеч трех тройников каскадного переключателя при равномерном делении коммутируемой мощности между тройниками в режиме “закрыто” (2 мВ/дел) (а), при кратном увеличении мощности в плече первого тройника при открытом третьем тройнике (10 мВ/дел) (б), при открытых третьем и втором тройниках (10 мВ/дел) (в).



**Рис. 7.** Осциллограммы выходных импульсов (темно-серый луч) и сигнала с общего плеча тройников (светло-серый луч) при поочередном срабатывании первым коммутатора первого тройника (а), первым коммутатора второго тройника (б), первым коммутатора первого тройника и затем второго через интервал времени, равный времени пробега между тройниками (синхронный режим) (в).

переключателе с согласованным тройником напряженность понизится до  $\sim 140$  кВ/см, с согласованным дополнительным — до  $\sim 70$  кВ/см, что позитивно отразится на рабочей мощности и стабильности работы компрессора.

В контрольном эксперименте в качестве рабочей среды в коммутаторе была использована смесь аргона с  $\sim 10\%$  элегаза под давлением  $\sim 4...5$  ати. Изолирующей средой резонатора и переключателя вне трубки служила смесь азота с  $30...40\%$  элегаза под давлением  $\sim 5...6$  ати. Такие среды обеспечивали максимальную мощность и стабильную работу компрессора. При мощности входных импульсов 2 МВт в режиме управляемого запуска компрессор формировал СВЧ-импульсы мощностью 220 МВт и длительностью 4.5...5 нс по уровню 3 дБ. Таким образом, усиление компрессора с обычным переключателем составляло  $\sim 20.5$  дБ. Для определения порогового уровня стабильной работы обычного переключателя на более низкой мощности трубка коммутатора заполнялась аргоном и определялась мощность входных импульсов, при которой коммутатор переходил в режим устойчивого самопробоя. Появление такого режима служило критерием достижения предельной рабочей мощности переключателя с данной средой в трубке. Установлено, что даже при предельном давлении в трубке 5 ати в такой режим переключатель переходил при стартовой мощности магнетрона. Мощность выходных импульсов при этом не превышала  $\sim 90$  МВт. Результаты контрольного эксперимента считались базовыми.

Эксперименты с каскадным переключателем выполнены на компрессоре с переключателем на основе двух тройников. При этом состав и давление газа в разрядных трубках подбирали так, что в режиме накопления практически исключалось самопроизвольное срабатывание любого из коммутаторов, и один из коммутаторов запускался в управляемом режиме. Поскольку в каскадном пе-

реключателе по сравнению с обычным коммутируемая мощность понижена, то это позволяло ему работать при меньшем давлении газа в трубках, вплоть до нулевого избыточного давления. Поэтому после запуска первого коммутатора и скачкообразного роста напряженности поля на втором, второй коммутатор срабатывал на самопробое.

Эксперименты с каскадным переключателем продемонстрировали возможность создания условий равновероятного срабатывания коммутаторов. На рис. 7 приведены осциллограммы выходных импульсов, формируемых при создании таких условий — поочередного самопробоя коммутаторов переключателя. Различная длительность и амплитуда импульсов объясняется различной длиной резонатора от входа до коммутирующего плеча. Усиление импульсов практически отличалось во столько раз, во сколько раз отличаются их длительности ( $\sim 1.5$  раза). Это означает, что в таком переключателе потери в коммутаторах при выводе фактически не зависят или слабо зависят от очередности их включения. После управляемого запуска одного из коммутаторов, второй автоматически переводился в режим самопробоя.

Усиление, достигнутое в компрессоре с каскадным переключателем, составило  $\sim 18.5$  дБ, если первым срабатывал коммутатор первого тройника. Если же первым срабатывал коммутатор второго тройника, то усиление достигало  $\sim 20$  дБ. Это на  $\sim 0.5$  и  $\sim 2$  дБ ниже усиления в контрольном эксперименте. Вероятно, снижение усиления обусловлено потерей части энергии в предимпульсах, что в известной мере противоречит результатам анализа. Однако эти потери могут быть уменьшены до более низкого уровня путем сведения к минимуму длины плеч тройников.

Потери в коммутаторах на усиление выходных импульсов значительного влияния не оказывают. Это следует из экспериментов, в которых переключатель обеспечивал вывод энергии без пре-

дымпульса. Такой вывод реализуется в случае, когда коммутатор второго тройника срабатывает синхронно с моментом прихода к этому коммутатору волны из резонатора. При синхронизации коммутаторов лазером такой процесс вывода может быть управляемым (рис. 7в). Скачок амплитуды поля на запаздывающем коммутаторе способствует синхронизации. В этом случае формируются импульсы, по форме и усилению близкие импульсам компрессора с обычным переключателем, что свидетельствует о сопоставимости потерь в каскадном и обычном переключателях. Возможно, снижению потерь в каскадном переключателе способствует работа коммутаторов при пониженном давлении газа и расположение боковых плеч тройников, в режиме вывода, в узлах стоячей волны, пока не сработает последний коммутатор.

В экспериментах с каскадным переключателем трубки коммутаторов заполнялись смесью аргона с 1...5% элгаса под давлением 0...0.5 ати. При этом мощность входных СВЧ-импульсов могла быть поднята до 2 МВт, а мощность сформированных достигала 220 МВт. Более того, эксперименты показали возможность работы коммутаторов, заполненных только аргоном, при уровне мощности входных импульсов ~1.5 МВт для каскада несогласованных тройников и до 2 МВт для каскада тройников согласованных. Это означает, что допустимо повышение мощности входных импульсов, следовательно, и выходных при соответствующем повышении давления в трубках и мощности входных импульсов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, теоретически и экспериментально исследован интерференционный СВЧ-переключатель с распределенной мощностью коммутируемой волны как устройство вывода энергии активных резонансных СВЧ-компрессоров. Устройство выполнено в виде каскада обычных интерференционных СВЧ-переключателей на основе Н-тройников, последовательно соединенных. Показано, что такие переключатели способны кратно понизить коммутируемую мощность, если ее равномерно распределить между тройниками каскада. Установлено, что равенство распределенной мощности имеет место в ограниченном диапазоне изменения длин этих плеч. Также установлено, что между длинами плеч существует функциональная связь, при которой достигается такое распределение. Закономерность обеспечивает возможность выбора длины плеч для заданного количества тройников, предельное количество которых определяется техническими возможностями поддержания длины плеч тройников с требуемой точностью.

Определено влияние качества согласования тройников на работу переключателя. Показано,

что если использовать в каскаде несогласованные тройники, то это также понижает коммутируемую мощность, но на более высоком уровне, чем использование тройников согласованных, и приводит к более существенному снижению усиления резонатора. Экспериментально подтверждена возможность повышения рабочей мощности интерференционного СВЧ-переключателя до уровня, сравнимого с рабочей мощностью регулярного волновода. Представляется возможным использование в каскадном переключателе твердотельных коммутаторов, имеющих более низкий уровень рабочей мощности, чем коммутаторы газоразрядные или электронно-лучевые. Также возможно, что переключатель исследованного типа будет работоспособным на более высоком уровне мощности при выполнении его из сверхразмерных Н-тройников [7] либо из пакетов обычных тройников с общим коммутирующим плечом [8]. Исследованный принцип организации переключателя имеет общий характер и, видимо, может быть использован и в других вариантах исполнения: например, в виде цепочки связанных резонаторов вместо одного коммутирующего резонатора [9, 10].

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Ю.Г. Юшкову за полезные дискуссии и советы.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-01853) и стипендии “ПЛИУС”, а также в рамках Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Didenko A.N., Zelentsov V.I., Shteyn Yu.G., Yushkov Yu.G.* // Radio Eng. Electron. Phys. 1972. V. 17. № 2. P. 1220.
2. *Alvarez R.A., Farkas Z.D., Hogg R.A. et al.* // Proc. of IX Int. Conf. on High Energy Accelerators, Stanford, Ca., May 2–7. 1974.
3. *Tantawi S.G.* // AIP Conf. Proc. Baltimore, Maryland (USA). 6–11 Jul. 1998.
4. *Artemenko S.N.* // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 11/2. С. 238.
5. *Альтман Дж.* Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968.
6. *Avgustinovich V.A., Artemenko S.N., D'Yachenko V.F. et al.* // Instruments and Experimental Techniques. 2009. V. 52. № 4. P. 547.
7. *Avgustinovich V.A., Artemenko S.N., Zhukov A.A.* // Technical Phys. Lett. 2013. V. 39. № 5. P. 492.
8. *Artemenko S.N., Avgustinovich V.A., Arteev M.S.* // Techn. Phys. Lett. 2013. V. 39. № 12. P. 1040.
9. *Gorbachev A.M., Ivanov O.A., Isaev V.A.* // Techn. Phys. Lett. 1998. V. 24. № 10. P. 791.
10. *Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Ivanov O.A. et al.* // Radiophys. Quant. Electron. 2008. V. 51. № 8. P. 597.