

УДК 621.37

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО РЕЗОНАНСНОГО СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО КОМПРЕССОРА

*С. Н. Артеменко, Г. М. Самойленко**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Предложен сверхпроводящий интерференционный переключатель резонансного сверхвысоко- частотного компрессора на основе волноводного Н-тройника, в боковом плече которого размещён коммутирующий резонатор с управляемыми параметрами, выполненный на основе второго Н-тройника. Оценён коэффициент передачи переключателя при внешнем управлении добротностью и/или резонансной частотой коммутирующего резонатора. Показано, что предложенный переключатель может обеспечить достижение высокой эффективности передачи накопленной энергии в нагрузку при минимальном значении (по сравнению с известными решениями) управляющего параметра.

ВВЕДЕНИЕ

В электронике больших мощностей одним из способов генерации мощных коротких сверхвысоко- частотных (СВЧ) импульсов является резонансная компрессия, основанная на относительно медленном накоплении энергии СВЧ излучения в объёмном резонаторе и её быстром последующем выводе в нагрузку [1]. Коэффициент усиления мощности резонансных СВЧ компрессоров определяется собственной добротностью накопительного резонатора, поэтому особый интерес представляет использование в системах резонансной компрессии энергии СВЧ излучения сверхпроводящих объёмных СВЧ резонаторов, добротность которых на $4\div 5$ порядков выше, чем у обычно используемых их медных аналогов. Соответственно, ожидаемое усиление мощности выходного излучения компрессоров с такими резонаторами может достигать $50\div 70$ дБ. Известен ряд схем как обычных (медных) [1–7], так и сверхпроводящих [8–14] резонансных СВЧ компрессоров. Результаты ранних экспериментальных исследований сверхпроводящих СВЧ компрессоров показали перспективность этих устройств с точки зрения достижения высоких значений коэффициента усиления мощности и уровня накопленной в резонаторе энергии, а также широкого диапазона рабочих частот. Вместе с тем оказалось, что разработка эффективного криогенного СВЧ устройства, переключающего накопительный резонатор из режима накопления в режим вывода энергии, представляет собой сложную задачу, которая до настоящего времени не решена.

Ранее при поиске новых путей коммутации энергии СВЧ излучения в сверхпроводящих объёмных резонаторах нами был предложен и проанализирован сверхпроводящий вариант известной схемы резонансной компрессии, включающей в себя волноводный накопительный резонатор и устройство вывода энергии в виде интерференционного СВЧ переключателя на основе Т-образного волноводного Н-тройника с полуволновым короткозамкнутым боковым плечом [1]. В интерференционных переключателях такого типа управление режимами работы обычно осуществляется дискретным изменением фазы волны, излучённой из бокового плеча тройника, электронным пучком или плазмой газового разряда [15, 16]. В отличие от известного, в предложенном варианте компрессора интерференционный переключатель выполнен в виде подсоединённого к боковому плечу Н-тройника дополнительного (коммутирующего) резонатора с внешним управлением его добротностью и/или резонансной частотой. Было показано, что в такой схеме при

* sgm@tpu.ru

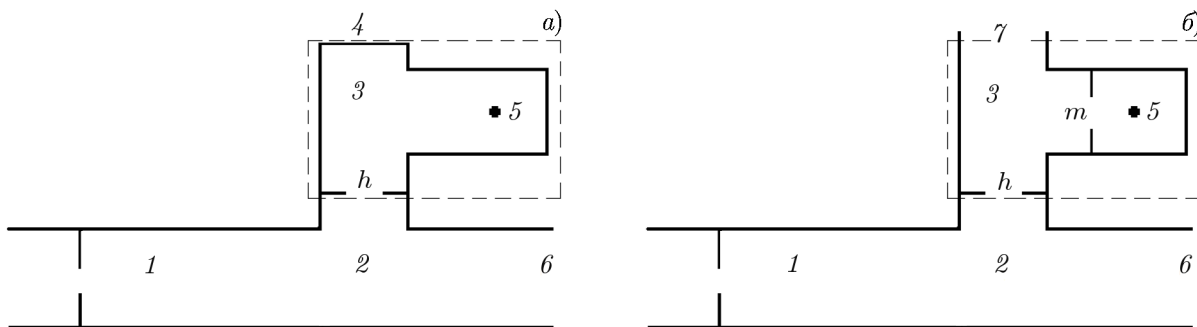


Рис. 1. Схема резонансного СВЧ компрессора с коммутирующим резонатором на основе Н-тройника: *a* — управление выводом изменением частоты, *б* — управление выводом одновременным изменением частоты и добротности; 1 — накопительный сверхпроводящий резонатор, 2 — основной Н-тройник, 3 — коммутирующий сверхпроводящий резонатор, 4 — короткозамыкатель, 5 — электронная пушка, 6 — выход 1, 7 — выход 2, *h* и *m* — коэффициенты передачи элементов связи

сильной связи коммутирующего резонатора с тройником (коэффициент передачи элемента связи $h > 0,6$) в режиме накопления энергии обеспечивается эффективное запираание накопительного резонатора, а усиление мощности выходных импульсов может превышать 60 дБ [17, 18]. Рассматриваемый в данной работе переключатель является развитием схемы [17] и отличается от неё тем, что коммутирующий резонатор с управляемыми параметрами организован на основе второго Н-тройника, идентичного первому и подключённого прямым плечом к боковому плечу первого тройника на расстоянии $\lambda_w/4$, где λ_w — длина волны в волноводе, от разветвления (см. рис. 1). Управляющий режимами работы переключателя элемент (например, электронная пушка) располагается в боковом плече второго тройника. Возможные варианты практической реализации предлагаемой схемы представлены на рис. 1*a* и *б*.

В схеме на рис. 1*a* коммутирующий резонатор организуется на основе Н-тройника с короткозамкнутым выходным плечом и СВЧ коммутатором, размещённом в боковом плече. При минимально возможных (порядка четверти длины волны) размерах входного и короткозамкнутого плеч тройника время T_2 двойного пробега волны в таком резонаторе от входного окна связи до короткозамыкателя и обратно сравнимо с временем срабатывания коммутатора (обычно 1÷2 нс). При срабатывании коммутатора изменяется резонансная частота (электрическая длина) коммутирующего резонатора, в результате чего изменяются переходное ослабление основного тройника и, следовательно, связь накопительного резонатора с нагрузкой.

Коэффициент передачи R переключателя по схеме на рис. 1*a* как функция сдвига резонансной частоты δf (изменения электрической длины $\varphi = 2\pi T_2 \delta f$) коммутирующего резонатора описывается выражением

$$R(\varphi) = 0,25 \left| 1 + \sqrt{1 - h^2} \exp(-\beta) - \frac{0,5h^2 \exp(-2\beta) [1 + \exp(-2\beta - j\varphi)]}{1 - 0,5 \sqrt{1 - h^2} \exp(-\beta) [1 + \exp(-2\beta - j\varphi)]} \right|^2, \quad (1)$$

где h — коэффициент передачи элемента связи переключателя с основным тройником, β — постоянная затухания волны в переключателе при двукратном пробеге.

В схеме на рис. 1*б* в боковом плече второго тройника размещён ещё один резонатор с параметром связи m , а короткозамыкатель 4 выходного плеча тройника заменён волноводным трактом 7, нагруженным на эквивалент антенны, т. е. переключатель выполнен по схеме проходного резонатора.

При срабатывании коммутатора изменение электрической длины коммутирующего резонатора в боковом плече второго Н-тройника приводит к появлению потерь мощности на излучение в выходное плечо этого тройника γ , что эквивалентно увеличению постоянной затухания проходного резонатора γ_{eff} , т. е. падению его собственной добротности.

Можно показать, что эквивалентная постоянная затухания волны в проходном резонаторе как функция электрической длины коммутирующего резонатора его тройника определяется выражением

$$\gamma_{\text{eff}}(\varphi) \approx -\ln[1 - R(\varphi)]. \quad (2)$$

График зависимости $\gamma_{\text{eff}}(\varphi)$ представлен на рис. 2.

Из этого рисунка следует, что даже незначительные изменения электрической длины коммутирующего резонатора приводят к быстрому росту эквивалентной постоянной затухания в проходном резонаторе до значений, при которых накопительный резонатор компрессора практически открыт.

Коэффициенты передачи R_1 и R_2 в плечах переключателя, которым соответствуют выходы 1 и 2 по схеме на рис. 1б, как функции сдвига резонансной частоты δf (изменения электрической длины $\varphi = 2\pi T_2 \delta f$) коммутирующего резонатора описываются выражениями

$$R_1(\varphi) = 0,25 \left| 1 + \sqrt{1 - h^2} \exp(-\beta) - \frac{0,5h^2 \exp(-2\beta) [1 + \exp(-\beta)A(\varphi)]}{1 - 0,5 \sqrt{1 - h^2} \exp(-\beta) [1 + \exp(-\beta)A(\varphi)]} \right|^2, \quad (3)$$

$$R_2(\varphi) = 0,5 \left| \frac{0,5h^2 \exp(-\beta) [1 - \exp(-\beta)A(\varphi)]}{1 - 0,5 \sqrt{1 - h^2} \exp(-\beta) [1 + \exp(-\beta)A(\varphi)]} \right|^2, \quad (4)$$

где

$$A(\varphi) = \frac{m^2 \exp(-\beta - j\varphi)}{1 - \sqrt{1 - m^2} \exp(-\beta - j\varphi)},$$

β — постоянная затухания волны в переключателе при двукратном пробеге.

Таким образом, в схеме на рис. 1б управление режимами переключения проводится одновременным изменением добротности и резонансной частоты коммутирующего резонатора, а вывод энергии из накопительного сверхпроводящего резонатора проводится через два выхода.

Расчётные зависимости коэффициентов передачи рассматриваемых переключателей от изменения их электрической длины φ приведены на рис. 3. Там же для сравнения показаны зависимости $R(\varphi)$ для известных вариантов интерференционного переключателя [1, 17]. Из этого рисунка следует, что наименее чувствительна к сдвигу частоты традиционная схема переключателя с полуволновым короткозамкнутым боковым коммутирующим плечом [1] (линия 1). В таком тройнике изменение электрической длины при двойном пробеге, например на $\pi/2$ рад, приводит к тому, что только половина мощности проходит в нагрузку, а половина отражается. Коэффициент передачи R , близкий к 100%, реализуется только при изменении электрической длины резонатора φ на π рад.

Заметно эффективнее коммутация в схеме с дополнительным резонатором, подключённым к четвертьволновому короткозамкнутому боковому плечу Н-тройника [17]. В этой схеме более

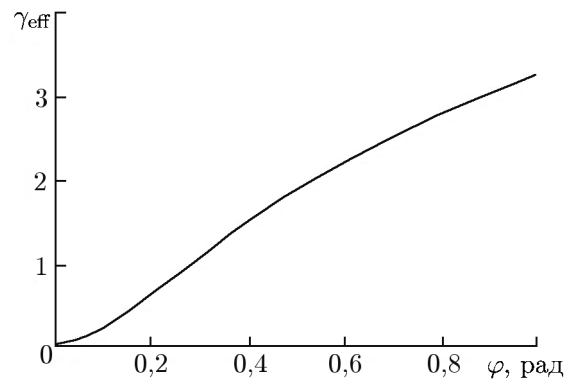


Рис. 2. Зависимость эквивалентной постоянной затухания γ_{eff} волны в проходном резонаторе от изменения электрической длины φ коммутирующего резонатора

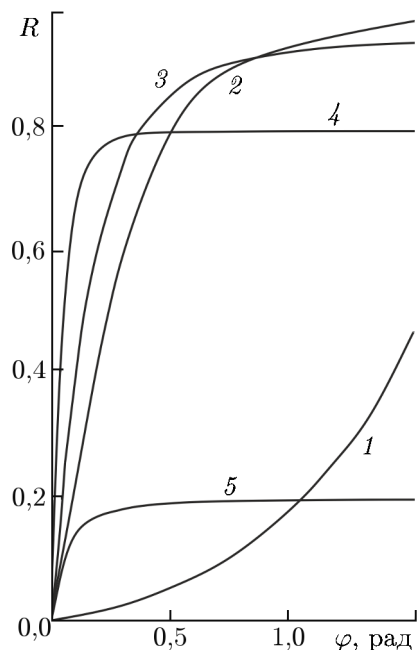


Рис. 3. Зависимости коэффициента передачи различных вариантов интерференционного СВЧ переключателя от изменения электрической длины коммутирующего объема: 1 — традиционная схема переключателя с полуволновым короткозамкнутым боковым коммутирующим плечом [1], 2 — схема с коммутирующим резонатором [17], 3 — схема на рис. 1а, 4 и 5 — схема на рис. 1б (4 — выход 1, 5 — выход 2). Зависимости 3, 4 и 5 построены для значений $m = h = 0,6$ и $\beta = 2 \cdot 10^{-8}$

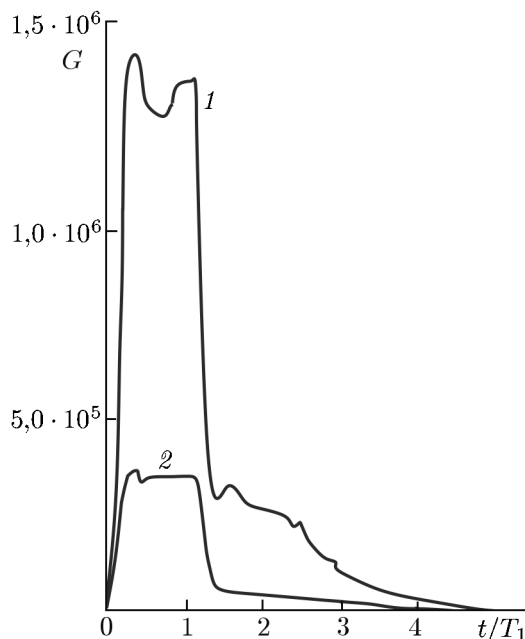


Рис. 4. Коэффициент усиления и расчётные огибающие функции выходных импульсов сверхпроводящего СВЧ компрессора, выполненного по схеме на рис. 1б. Собственная добротность Q_0 и время двойного пробега накопительного резонатора T_1 приняты равными $4 \cdot 10^8$ и 5 нс соответственно, кривые 1 и 2 отвечают выходам 1 и 2 переключателя

половины мощности проходит в нагрузку при изменении электрической длины на величину, превышающую 0,2 рад, а при $\varphi \approx 0,5$ рад в нагрузку передается более 80 % подводимой мощности (линия 2 на рис. 3).

Схема на рис. 1а ещё чувствительнее к изменению электрической длины бокового плеча проходного коммутирующего резонатора (линия 3 на рис. 3), что позволяет в ещё большей степени понизить требования к управляющему параметру.

Максимальной чувствительностью к изменению электрической длины коммутирующего резонатора обладает вариант переключателя со сверхпроводящим проходным резонатором, который реализуется на основе второго тройника с дополнительным резонатором, сильно связанным с боковым четвертьволновым плечом этого тройника (см. рис. 1б). При этом вывод энергии из компрессора осуществляется по двум каналам — выходным плечам каждого из тройников устройства. Линиями 4 и 5 на рис. 3 показаны соответственно зависимости коэффициента передачи переключателя в выходное плечо первого тройника (выход 1) и коэффициента передачи в выходное плечо второго тройника (выход 2) от φ . При $\varphi \approx 0,2$ рад обеспечивается практически 100-процентный вывод энергии из компрессора через два выхода в пропорции 4 к 1. Это означает, что на выходах компрессора формируются два синфазных импульса, отличающиеся по амплитуде на 6 дБ, которые далее могут быть просуммированы или использоваться независимо.

На рис. 4 приведены результаты расчёта коэффициента усиления и формы выходных импульсов сверхпроводящего СВЧ компрессора, выполненного по схеме на рис. 1б со следующими

параметрами: собственная добротность накопительного резонатора $Q_0 = 4 \cdot 10^8$, время двойного пробега накопительного резонатора $T_1 = 5$ нс, изменение электрической длины коммутирующего резонатора $\varphi = 0,2$ рад, постоянная затухания коммутирующего резонатора $\gamma_{\text{eff}} \approx 0,4$.

Расчёты энергетических характеристик СВЧ компрессора, построенного по схеме на рис. 1б, были выполнены на основе рекуррентных соотношений между амплитудами волн в элементах компрессора и показали, что его коэффициент полезного действия может практически совпадать с эффективностью накопления, максимальная величина которой при компрессии относительно коротких СВЧ импульсов может достигать значений, близких к 0,8.

Таким образом, предложенная схема переключателя резонансного СВЧ компрессора обеспечивает достижение высокой эффективности передачи накопленной энергии в нагрузку при меньших значениях (по сравнению с известными решениями) управляющего параметра.

Авторы выражают искреннюю признательность профессору Ю. Г. Юшкову за ценные замечания и предложения, высказанные при подготовке рукописи.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко А. Н., Юшков Ю. Г. Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
2. Alvarez R. A. // Rev. Sci. Instrum. 1986. V. 57, No. 10. P. 2481.
3. Avgustinovich V. A., Artemenko S. N., D'yachenko V. F., et al. // Instrum. Exp. Tech. 2009. V. 52, No. 4. P. 547.
4. Avgustinovich V. A., Artemenko S. N., Kaminskii V. L., et al. // Instrum. Exp. Tech. 2007. V. 50, No. 2. P. 233.
5. Artemenko S. N., Avgustinovich V. A., Kaminskii V. L., et al. // J. Commun. Technol. Electron. 1997. V. 42, No. 8. P. 941.
6. Beilin L., Shlapakovski A., Krasik Ya. E. // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. Art. no. 034503.
7. Avgustinovich V. A., Artemenko S. N., Kaminskii V. L., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2011. V. 82. Art. no. 046104.
8. Birx D., Dick G. J., Little W. A., et al. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 32, No. 1. P. 68.
9. Birx D., Dick G. J., Little W. A., et al. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33, No. 5. P. 466.
10. Alvarez R. A., Birx D., Byrne D., et al. // IEEE Trans. Magn. 1981. V. 17, No. 1. P. 935.
11. Августинович В. А., Августинович Л. Я., Юшков Ю. Г. // Журн. техн. физ. 1987. Т. 57, № 6. С. 1137.
12. Kobayashi O., Minami K., Saeki K., Awano M. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57, No. 1. P. 105.
13. Артеменко С. Н., Диденко А. Н., Каминский В. Л., Юшков Ю. Г. // Журн. техн. физ. 1983. Т. 53, № 9. С. 1885.
14. Artemenko S. N., Samoilenko G. M., Shlapakovski A. S., Yushkov Yu. G. // J. Appl. Phys. 2016. V. 119. Art. no. 014501.
15. Ivanov O. A., Isaev V. A., Lobaev M. A., et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. Art. no. 031501.
16. Вихарев А. Л., Горбачёв А. М., Иванов О. А. и др. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 18. С. 54.
17. Артеменко С. Н., Самойленко Г. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 1. С. 23.
18. Артеменко С. Н., Самойленко Г. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 6. С. 520.

Поступила в редакцию 24 мая 2016 г.; принята в печать 30 апреля 2017 г.

INTERFERENCE SWITCH OF A SUPERCONDUCTING RESONANCE MICROWAVE COMPRESSOR

S. N. Artemenko and G. M. Samoylenko

We propose a superconducting interference switch of a resonance microwave compressor on the basis of a waveguide H-plane tee, whose lateral arm contains a switching cavity having controllable parameters and based on another H-plane tee. The transmission coefficient of the switch is evaluated for the case of controlling the Q-factor and/or resonance frequency of the switching cavity externally. It is shown that the proposed switch can ensure high-efficiency transmission of the stored energy to the load at a minimal value of the controlling parameter (compared with the known decisions).