

УДК 621.37

## КОММУТАЦИЯ РЕЖИМОВ НАКОПЛЕНИЯ И ВЫВОДА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАНСНЫХ КОМПРЕССОРАХ С ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕМ

*С. Н. Артёменко, Г. М. Самойленко\**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Предложен коммутатор интерференционного переключателя сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного излучения на основе волноводного Н-тройника, выполненный в виде резонатора с перестраиваемыми параметрами, подсоединённого к одному из плеч этого тройника. Проведён анализ сверхпроводящего варианта исполнения СВЧ компрессора с таким переключателем. Определены условия эффективной работы переключателя в режиме накопления электромагнитной энергии и её быстрого вывода при управляемом воздействии на добротность или резонансную частоту коммутирующего резонатора. Приведены оценки выходных параметров сверхпроводящей системы компрессии при добротностях накопительного и коммутирующего резонаторов порядка  $5 \cdot 10^8$ . Показана возможность увеличить мощность излучения в такой системе компрессии на  $40 \div 60$  дБ для выходных СВЧ импульсов с длительностью порядка  $5 \div 10$  нс. Рассмотрены варианты практической реализации системы.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что на основе сверхпроводящих резонаторов возможно создать эффективные источники СВЧ импульсов мегаваттного и более высокого уровня мощности с коэффициентом усиления входного СВЧ импульса по мощности выше 70 дБ. К настоящему времени в основном решены технологические вопросы достижения в ниобиевых сверхпроводящих СВЧ резонаторах добротности  $Q \approx 10^9 \div 10^{10}$  и плотности запасаемой в них энергии порядка 1 Дж/л, что необходимо для обеспечения вышеуказанных параметров СВЧ компрессоров. Однако необходимо создать коммутатор, эффективно переключающий сверхпроводящий СВЧ резонатор из режима накопления энергии в режим её вывода.

В обычных «тёплых» системах активной компрессии СВЧ импульсов для целей коммутации, как правило, используются следующие схемы: модуляция добротности накопительного резонатора при интерференционном способе регулирования его связи с нагрузкой и с газоразрядным или токовым его переключением из режима накопления в режим вывода; трансформация вида колебаний в резонаторе; изменение фазы питающей резонатор волны.

Экспериментальная проверка показала, что при условии адаптации к специфике низких температур традиционные способы коммутации СВЧ излучения при некоторых ограничениях вполне могут быть применены и для целей коммутации в сверхпроводящих СВЧ резонаторах [1]. Вместе с тем для них целесообразен поиск иных способов и схем коммутации.

Известна система резонансной компрессии СВЧ импульсов с выводом энергии из накопительного резонатора через интерференционный переключатель на основе волноводного Н-тройника с короткозамкнутым плечом и расположенным в нём СВЧ коммутатором [2]. Работа «тёплого» варианта такой системы и её модификаций проанализирована в ряде публикаций, например [3,

---

\* sgm@tpu.ru

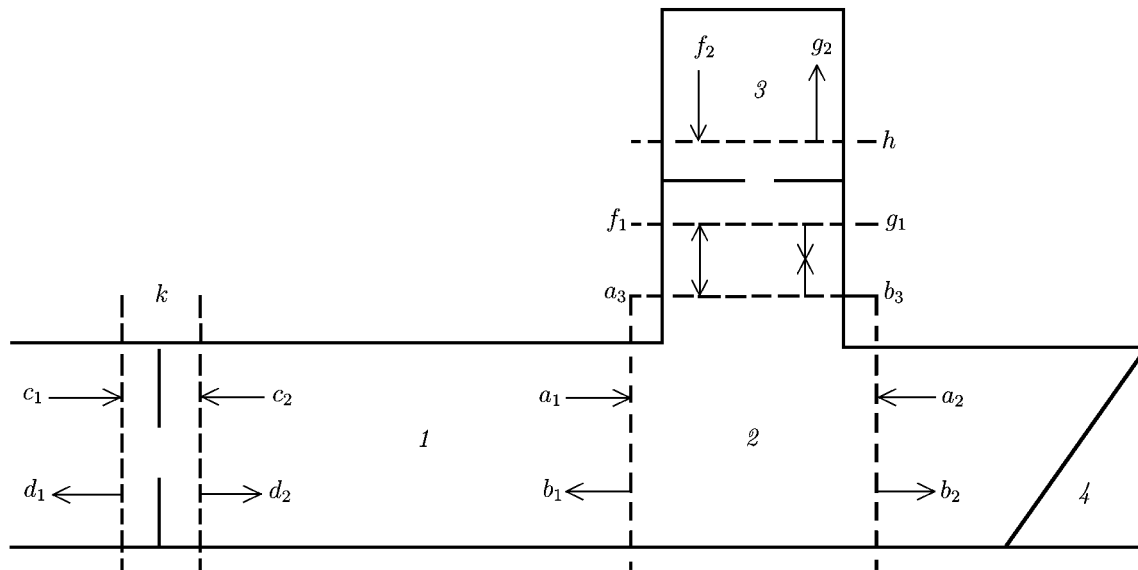


Рис. 1. Схема активного резонансного СВЧ компрессора с коммутирующим резонатором в боковом плече: 1 — накопительный резонатор, 2 — Н-тройник, 3 — коммутирующий резонатор, 4 — выходная согласованная нагрузка

4]. В данной статье проводится анализ сверхпроводящего варианта исполнения указанной системы компрессии СВЧ импульсов, в которой вместо газоразрядного коммутатора используется дополнительный коммутирующий СВЧ резонатор с перестраиваемыми параметрами (рис. 1). В частности, проведены оценки эффективности переключения, основанного на быстром изменении собственной добротности коммутирующего резонатора (что выполняется впервые) или на изменении его резонансной частоты, реализованном в [5, 6] в обычной «тёплой» накопительной системе.

### 1. АНАЛИЗ СИСТЕМЫ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Анализ работы устройства выполним методом матрицы рассеяния. Согласно этому методу для рассматриваемой системы можно записать цепочку равенств:

$$\mathbf{d} = \mathbf{S}_1 \mathbf{c}, \quad \mathbf{b} = \mathbf{S}_2 \mathbf{a}, \quad \mathbf{g} = \mathbf{S}_3 \mathbf{f}, \tag{1}$$

$$\mathbf{d} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_1 = \begin{pmatrix} -\sqrt{1-k^2} & jk \\ jk & -\sqrt{1-k^2} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_3 = \begin{pmatrix} -\sqrt{1-h^2} & jh \\ jh & -\sqrt{1-h^2} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix},$$

где  $j$  — мнимая единица,  $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{b}$  и  $\mathbf{g}$  — векторы, составленные из амплитуд падающих волн;  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{f}$  — векторы, составленные из амплитуд отражённых волн (рис. 1);  $\mathbf{S}_1$ ,  $\mathbf{S}_2$  и  $\mathbf{S}_3$  — матрицы рассеяния входного элемента связи накопительного резонатора, Н-тройника и входного элемента связи коммутирующего резонатора соответственно;  $k$  и  $h$  — коэффициенты передачи входных

элементов связи накопительного и коммутирующего резонаторов соответственно, и

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_2 = \begin{pmatrix} -1/2 & 1/2 & 1/\sqrt{2} \\ 1/2 & -1/2 & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}.$$

Кроме того, для амплитуд волн в элементах системы запишем дополнительные равенства, отражающие её особенности:

$$\begin{aligned} a_1 &= d_2 \exp(-\alpha/2), & c_2 &= b_1 \exp(-\alpha/2), & f_1 &= j b_3 \exp(-\beta/2), \\ a_3 &= j g_1 \exp(-\beta/2), & f_2 &= -g_2 \exp(-\gamma - j\varphi), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  — постоянные затухания волн в накопительном резонаторе, боковом плече тройника и коммутирующем резонаторе при двукратном пробеге соответственно,  $\varphi$  — дополнительный набег фазы волны в коммутирующем резонаторе при отличии его резонансной частоты от частоты генератора.

Определим зависимости коэффициента отражения  $\Gamma$  и передачи  $R$  переключателя при различных состояниях коммутирующего резонатора. В соответствии с определениями коэффициентов  $\Gamma$  и  $R$  имеем равенства  $\Gamma = b_1/a_1$ ,  $R = b_2/a_1$ . Используя формулы (1) и (2), находим выражения для амплитуды волны, отражённой от тройника:

$$\begin{aligned} b_1 &= -\frac{a_1}{2} + \frac{a_3}{\sqrt{2}} = -\frac{a_1}{2} + \frac{j \exp(-\beta/2)}{\sqrt{2}} (-\sqrt{1-h^2} f_1 + j h f_2) = \\ &= -\frac{a_1}{2} + \frac{\exp(-\beta) \sqrt{1-h^2} a_1}{2} + \frac{h \exp(-\beta/2 - \gamma - j\varphi) g_2}{\sqrt{2}}, \end{aligned} \quad (3)$$

и коэффициента

$$g_2 = -\frac{h \exp(-\beta/2) a_1}{\sqrt{2} [1 - \sqrt{1-h^2} \exp(-\gamma - j\varphi)]}.$$

Подставляя это соотношение в выражение (3), находим коэффициент отражения

$$\Gamma = \frac{b_1}{a_1} = -\frac{1}{2} \left[ 1 - \exp(-\beta) \sqrt{1-h^2} + \frac{h^2 \exp(-\beta - \gamma - j\varphi)}{1 - \sqrt{1-h^2} \exp(-\gamma - j\varphi)} \right].$$

Для удобства анализа представим это выражение в тригонометрической форме:

$$\begin{aligned} \Gamma &= -\frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{(2-h^2) \exp(-\beta - \gamma) \cos(\varphi) - \exp(-\beta) \sqrt{1-h^2} [1 + \exp(-2\gamma)]}{1 - 2\sqrt{1-h^2} \exp(-\gamma) \cos(\varphi) + (1-h^2) \exp(-2\gamma)} + \right. \\ &\quad \left. + j \frac{h^2 \exp(-\beta - \gamma) \sin \varphi}{1 - 2\sqrt{1-h^2} \exp(-\gamma) \cos \varphi + (1-h^2) \exp(-2\gamma)} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогично, для коэффициента передачи тройника с коммутирующим резонатором имеем

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{(2-h^2) \exp(-\beta - \gamma) \cos(\varphi) - \exp(-\beta) \sqrt{1-h^2} [1 + \exp(-2\gamma)]}{1 - 2\sqrt{1-h^2} \exp(-\gamma) \cos(\varphi) + (1-h^2) \exp(-2\gamma)} + \right. \\ &\quad \left. + j \frac{h^2 \exp(-\beta - \gamma) \sin(\varphi)}{1 - 2\sqrt{1-h^2} \exp(-\gamma) \cos(\varphi) + (1-h^2) \exp(-2\gamma)} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Используя выражения (4) и (5), можно проанализировать работу переключателя в различных режимах. Так, из формулы (5) следует, что на рабочей частоте резонатора при  $\{\alpha, \beta, \gamma, h\} \ll 1$  коэффициент передачи переключателя определяется приближённой формулой

$$R \approx \frac{1}{2} \left[ 1 + \exp(-\beta) \frac{\gamma^2 + h^4/4}{\gamma^2 - h^4/4 + \gamma h^2} \right] \approx \frac{\beta}{2} + \frac{1}{\beta_{\text{in}}}, \quad (6)$$

где  $\beta_{\text{in}} = h^2/(2\gamma)$  — коэффициент входной связи коммутирующего резонатора. Из выражения (6) следует, что при малом затухании в тройнике и высоком значении коэффициента входной связи коммутирующего резонатора  $\beta_{\text{in}}$  величина  $R \rightarrow 0$ , т. е. переключатель будет находиться в состоянии «закрыто». При этом для эффективного запирания должно выполняться условие

$$\beta_{\text{in}} > \frac{2}{2\alpha + \beta} \approx \frac{1}{\alpha} = \frac{Q_0}{\pi f T_1}, \quad (7)$$

где  $Q_0$  — собственная добротность накопительного сверхпроводящего СВЧ резонатора,  $f$  — рабочая частота,  $T_1$  — время двойного пробега рабочей волны вдоль накопительного резонатора.

Далее, для закрытого состояния переключателя определим соотношение амплитуд колебаний в накопительном и коммутирующем резонаторах. Используя формулы (1) и (2), можно показать, что амплитуды этих колебаний могут быть представлены в форме

$$d_2 = \frac{jkc_1}{1 + \Gamma(\beta, \gamma, \varphi, h) \sqrt{1 - k^2} \exp(-\alpha)}, \quad (8)$$

$$g_2 = - \frac{jkh \exp(-\alpha/2 - \beta/2)c_1}{\sqrt{2} [1 - \sqrt{1 - h^2} \exp(-\gamma)] [1 + \Gamma(\beta, \gamma, \varphi, h) \sqrt{1 - k^2} \exp(-\alpha)]}. \quad (9)$$

Из выражений (8) и (9) при учёте взаимного влияния связанных резонаторов [7] следует, что при их сильной связи (когда  $h^2 \gg 4\alpha\gamma$ ) амплитуды колебаний в обоих резонаторах будут практически равными.

## 2. ПРОЦЕССЫ НАКОПЛЕНИЯ И ВЫВОДА ЭНЕРГИИ

Рассмотрим переходные процессы при накоплении и выводе энергии, определяющие основные энергетические характеристики системы.

Приближённые дифференциальные уравнения, решения которых описывают процессы накопления и вывода энергии, можно получить, используя рекуррентные соотношения между амплитудами волн в системе с учётом их взаимного запаздывания. Для волн в накопительном и коммутирующем резонаторе в общем случае имеем равенства

$$d_2 \left( t + \frac{T_1}{2} \right) = jkc_1 + \frac{\sqrt{1 - k^2} \exp(-\alpha/2)}{2} \left\{ [1 - \sqrt{1 - h^2} \exp(-\beta)] \exp(-\alpha/2) d_2 \left( t - \frac{T_1}{2} \right) - \sqrt{2} h \exp(-\gamma - \beta/2 - j\varphi) g_2(t - T_2) \right\}, \quad (10)$$

$$g_2 \left( t + \frac{T_1}{2} \right) = - \frac{h \exp[-(\alpha + \beta)/2] d_2(t - T_1/2)}{\sqrt{2}} + \sqrt{1 - h^2} \exp(-\gamma - j\varphi) g_2 \left( t + \frac{T_1}{2} - T_2 \right), \quad (11)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — времена двойного пробега волны вдоль накопительного и коммутирующего резонаторов соответственно. Разлагая в выражениях (10) и (11) функции  $d_2(t)$  и  $g_2(t)$  в ряд по малым параметрам  $T_1/2$  и  $T_2/2$ , находим, что

$$\begin{aligned}
d_2(t) + \frac{T}{2} \frac{dd_2}{dt} + \Gamma \sqrt{1-k^2} \exp(-\alpha) \left( d_2(t) - \frac{T_1}{2} \frac{dd_2}{dt} \right) = \\
= jkc_1 - \frac{h^2 \sqrt{1-k^2} \exp(-\alpha - \beta - \gamma - j\varphi) T_2}{2 [1 - \sqrt{1-h^2} \exp(-\gamma - j\varphi)]} \frac{dd_2(t - T_1/2)}{dt} + \\
+ \frac{h \sqrt{1-k^2} \sqrt{1-h^2} \exp(-(\alpha + \beta)/2 - 2\gamma - 2j\varphi) T_2}{\sqrt{2} [1 - \sqrt{1-h^2} \exp(-\gamma - j\varphi)]} \frac{dg_2(t - T_2)}{dt}, \\
\frac{dg_2(t)}{dt} \approx - \frac{h \exp[-(\alpha + \beta)/2]}{\sqrt{2} [1 - \sqrt{1-h^2} \exp(-\gamma)]^2} \frac{dd_2(t)}{dt}.
\end{aligned}$$

Группируя слагаемые и вводя новые обозначения множителей, полученную систему приближённых дифференциальных уравнений сводим к линейному дифференциальному уравнению вида

$$\begin{aligned}
\frac{dd_2}{dt} + \frac{d_2}{\tau_s} &\approx \kappa c_1, \tag{12} \\
\tau_s &= \frac{T_1 \left\{ 1 - \sqrt{1-k^2} \exp(-\alpha) \left[ \Gamma(h, \beta, \gamma, \varphi) - \frac{h^2 \exp(-\beta - \gamma - j\varphi) T_2}{T_1 [1 - \sqrt{1-h^2} \exp(-\gamma - j\varphi)]^2} \right] \right\}}{2 [1 + \Gamma(h, \beta, \gamma, \varphi) \sqrt{1-k^2} \exp(-\alpha)]}, \\
\kappa &= \frac{2jk}{T_1 \left\{ 1 - \sqrt{1-k^2} \exp(-\alpha) \left[ \Gamma(h, \beta, \gamma, \varphi) - \frac{h^2 \exp(-\beta - \gamma - j\varphi) T_2}{T_1 [1 - \sqrt{1-h^2} \exp(-\gamma - j\varphi)]^2} \right] \right\}}.
\end{aligned}$$

При накоплении энергии решение уравнения (12) даётся выражением

$$d_2(t) = \kappa \tau_s [1 - \exp(t/\tau_s)], \tag{13}$$

а при выводе энергии и начальном условии  $d_{20} = \kappa \tau_s [1 - \exp(-t_{in}/\tau_2)]$  — соотношением

$$\begin{aligned}
d_2(t) &= \frac{jkc_1}{1 + \Gamma(h, \beta, \gamma) \sqrt{1-k^2} \exp(-\alpha)} [1 - \exp(-t_{in}/\tau_s)] \exp(-t/\tau_0), \tag{14} \\
\tau_0 &= \frac{T_1 \left\{ 1 - \sqrt{1-k^2} \exp(-\alpha) \left[ \Gamma(h, \beta, \gamma_0, \varphi_0) - \frac{h^2 \exp(-\beta - \gamma - j\varphi_0) T_2}{T_1 [1 - \sqrt{1-h^2} \exp(-\gamma - j\varphi_0)]^2} \right] \right\}}{2 [1 + \Gamma(h, \beta, \gamma_0, \varphi_0) \sqrt{1-k^2} \exp(-\alpha)]}
\end{aligned}$$

— постоянная времени или длительность выходного импульса по уровню  $\exp(-1)$ ,  $t_{in}$  — длительность входного импульса,  $\gamma_0$  и  $\varphi_0$  — постоянная затухания и набег фазы волны в коммутирующем резонаторе при выводе энергии соответственно. При этом огибающая выходного импульса, эффективность накопления и коэффициент полезного действия (КПД) системы будут определяться выражениями

$$b_2(t) = \frac{jkc_1 [1 + \Gamma(h, \beta, \gamma_0, \varphi_0)]}{1 + \Gamma(h, \beta, \gamma) \sqrt{1-k^2} \exp(-\alpha)} [1 - \exp(-t_{in}/\tau_s)] \exp(-t/\tau_0), \tag{15}$$

$$\eta = \frac{|d_2(t_{in})|^2 T_1}{|c_1|^2 t_{in}}, \tag{16}$$

$$\nu = \frac{1}{|c_1|^2 t_{in}} \int_0^\infty |b_2(t)|^2 dt. \tag{17}$$

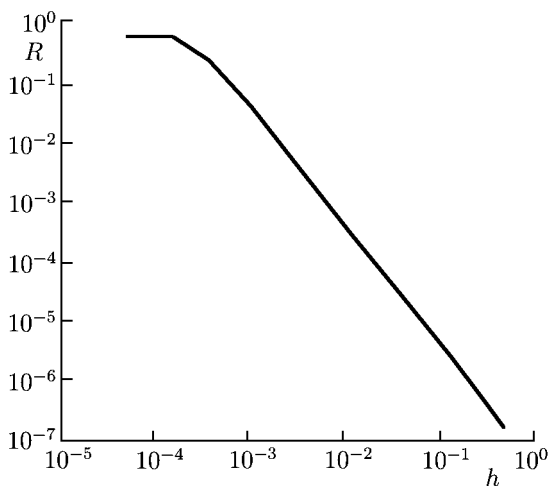


Рис. 2. Зависимости коэффициента передачи  $R$  сверхпроводящего интерференционного СВЧ переключателя с коммутирующим резонатором от коэффициента передачи  $h$  входного окна коммутирующего резонатора на рабочей частоте ( $\varphi = 0$ ;  $\gamma = 2 \cdot 10^{-8}$ )

полезного действия при малых длительностях импульсов порядка  $T_1$  уравнение (17) будет давать его заниженные значения. Это может быть учтено введением соответствующего поправочного множителя, определяемого как отношение времени двойного пробега волны вдоль накопительного резонатора к постоянной затухания импульса, полученной при решении приближённого дифференциального уравнения и примерно равного 3.

Отметим также, что характер переходных процессов в рассматриваемой системе при накоплении энергии на рабочей частоте почти идентичен таковому для одиночного резонатора. Это является следствием очень сильной связи между резонаторами, когда система представляет собой фактически единый заполненный электромагнитным полем объём. Влияние коммутирующего резонатора в этом случае проявляется только в некотором «замедлении» накопления, обусловленного инерционностью установления в нём колебаний. Биения амплитуды колебаний в системе появляются только в случае несовпадения собственных частот резонаторов.

Иная ситуация имеет место при выводе энергии. В случае переключения в режим вывода изменением рабочей частоты коммутирующего резонатора биения наблюдаются при незначительной величине этого изменения. По мере роста сдвига частоты при значительном увеличении амплитуды выходного импульса амплитуда биений резко падает, и биения быстро затухают.

### 3. ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ

Для оценки потенциальных возможностей предложенной схемы коммутации проведены расчёты сверхпроводящего варианта исполнения резонансного СВЧ компрессора, результаты которых приводятся ниже.

Расчёты выполнены для следующего варианта: компрессор изготовлен из ниобия, рабочая частота  $f_0 = 2,8$  ГГц, собственные добротности накопительного и коммутирующего резонаторов  $Q_n \approx 4 \cdot 10^8$  и  $Q_k \approx 2 \cdot 10^8$ , времена двойного пробега волны вдоль резонаторов  $T_1 \approx 5$  нс и  $T_2 \approx 0,5$  нс и постоянные затухания  $\alpha = 10^{-7}$ ,  $\gamma = 2 \cdot 10^{-8}$ . Для тройника принято значение

Заметим, что приведённые соотношения вытекают из выражений, полученных как решение приближённого дифференциального уравнения, выведенного в предположении  $\{T_1/2, T_2/2\} \ll t$ . Поэтому эти соотношения, строго говоря, применимы только для описания процессов с характерным временем, много большим времени пробега волны вдоль резонаторов. При характерном времени, сопоставимом с временем пробега, форма огибающей выходного импульса близка к прямоугольной и её следует описывать через рекуррентные соотношения между амплитудами волн в системе. Тем не менее принятое приближение вполне приемлемо для оценки энергетических характеристик системы. Это объясняется тем, что при рассмотрении процессов накопления и вывода энергии с помощью рекуррентных соотношений и путём решения приближённого уравнения амплитуда выходного импульса получается одинаковой и отличие проявляется только в его форме и длительности. При оценках коэффициента

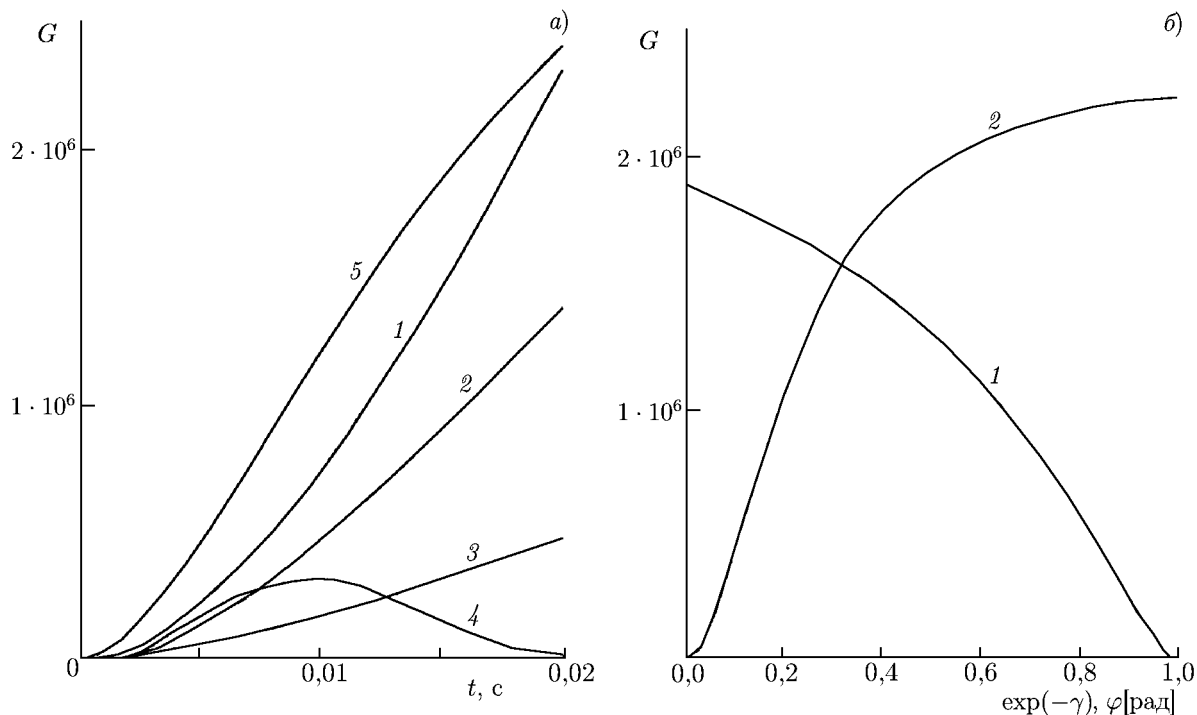


Рис. 3. Зависимости коэффициента усиления по мощности в накопительном резонаторе. Панель (а) — зависимость от времени для различных значений  $h$ ,  $\varphi$  и оптимальном  $k$  ( $\gamma = 2 \cdot 10^{-8}$ ), кривая 1 отвечает  $h = 0,6$ ,  $\varphi = 0$ ,  $k^2 = 5 \cdot 10^{-7}$ ; кривая 2 —  $h = 0,4$ ,  $\varphi = 0$ ,  $k^2 = 7 \cdot 10^{-7}$ ; кривая 3 —  $h = 0,2$ ,  $\varphi = 0$ ,  $k^2 = 5 \cdot 10^{-6}$ ; кривая 4 —  $h = 0,6$ ,  $\varphi = 5 \cdot 10^{-7}$ ,  $k^2 = 5 \cdot 10^{-7}$ ; кривая 5 —  $k^2 = 8,25 \cdot 10^{-4}$ , коммутирующий резонатор отсутствует. Панель (б) — зависимость от  $\exp(-\gamma)$  (кривая 1) и  $\varphi$  (кривая 2) при фиксированной длительности импульса возбуждения  $t_0 = 0,02$  с

$\beta = 10^{-8}$ , при этом расчётное переходное ослабление тройника с короткозамыкателем вместо коммутирующего резонатора в боковом плече составляет 160 дБ.

Из расчётной зависимости коэффициента передачи  $R$  сверхпроводящего СВЧ переключателя от коэффициента передачи входного окна  $h$  (рис. 2) следует, что для выбранных параметров системы при значениях  $h \geq 0,6$  (что обеспечивается при  $\beta_{\text{in}} \geq 10^7$ ) переходное ослабление тройника в режиме «закрыто» может превышать 140 дБ.

На рис. 3а приведены рассчитанные зависимости коэффициента усиления по мощности для волны в накопительном резонаторе в режиме накопления энергии от времени при оптимальных величинах  $k$  и различных значениях  $h$  и  $\varphi$  для системы с коммутирующим резонатором (кривые 1–4) и без него (кривая 5). Из рис. 3а следует, что усиление системы по мощности может превышать 60 дБ, при этом предельное усиление (определяемое как отношение  $Q_0/(\omega T_1)$ ) составляет величину порядка 67 дБ. Из рис. 3а также видно, что коммутирующий резонатор несколько замедляет процесс накопления.

Рисунок 3б демонстрирует зависимости коэффициента усиления системы по мощности от потерь в коммутирующем резонаторе (кривая 1) и набега фазы (кривая 2), из которых следует, что при значительных величинах  $\varphi$  и  $\gamma$  усиление практически одинаково. Однако при реальных величинах  $\gamma$  сверхпроводника в нормальном состоянии (которые не превышают 0,03) коэффициент усиления по мощности будет более чем на порядок ниже достигаемого при изменении  $\varphi$ .

Из формулы (5) следует, что коэффициент  $R$  является функцией добротности (параметр  $\gamma$ ) и резонансной частоты (параметр  $\varphi$ ) коммутирующего резонатора. При определённых величинах

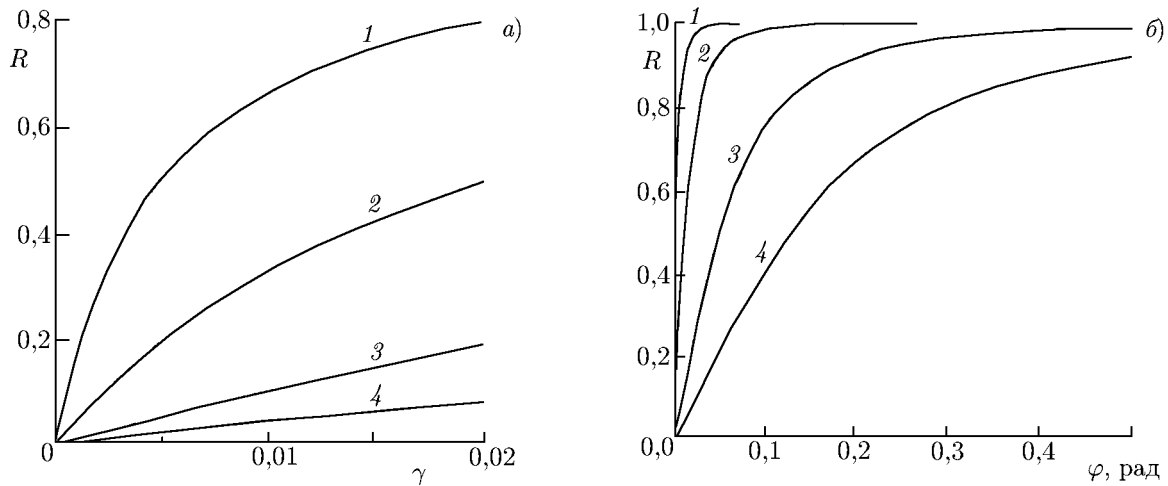


Рис. 4. Зависимости коэффициента передачи  $R$  интерференционного СВЧ переключателя. Панель (а) — зависимость от постоянной затухания рабочей волны  $\gamma$  коммутирующего резонатора: кривая 1 отвечает  $h = 0,1$ ; 2 —  $h = 0,2$ ; 3 —  $h = 0,4$ ; 4 —  $h = 0,6$ . Панель (б) — зависимость от набега фазы, обусловленного изменением рабочей частоты коммутирующего резонатора ( $\gamma = 2 \cdot 10^{-8}$ ): кривая 1 отвечает  $h = 0,1$ ; 2 —  $h = 0,2$ ; 3 —  $h = 0,4$ ; 4 —  $h = 0,6$

последних можно обеспечить достаточно большое значение  $R$ , т. е. переключить накопительный резонатор в режим вывода энергии.

Предположим, что в коммутирующем резонаторе мгновенно и существенно увеличены потери, т. е. на несколько порядков возросло затухание рабочей волны (т. е. возрос параметр  $\gamma$ ). В пределе  $\gamma \rightarrow \infty$  из формулы (5) находим, что

$$R = \frac{1}{2} \left[ 1 + \exp(-\beta) \sqrt{1 - h^2} \right]. \tag{18}$$

Из выражения (18) следует, что в этом случае переключатель будет находиться в состоянии «открыто» ( $R \rightarrow 1$ ) при малых  $h$  ( $R > 0,9$  при  $h \leq 0,6$ )

Однако для относительно больших, но конечных потерь в резонаторе ситуация несколько иная. На рис. 4а представлены рассчитанные зависимости коэффициента передачи интерференционного СВЧ переключателя от постоянной затухания рабочей волны коммутирующего резонатора для случая конечных потерь в нём. Выбранный для расчёта диапазон значений  $\gamma = 0,01 \div 0,02$  соответствует затуханию в ниобиевых резонаторах в состоянии нормальной проводимости. Из зависимостей на рис. 4а видно, что в реальных ниобиевых сверхпроводящих СВЧ резонаторах достаточно высокий коэффициент  $R$  при выводе энергии может быть получен при малых значениях  $h$ , т. е. при умеренном коэффициенте усиления системы.

Далее оценим эффективность переключения при изменении резонансной частоты коммутирующего резонатора. Из формулы (5) следует, что в этом случае коэффициент передачи даётся выражением

$$R \approx \frac{1}{2} \left[ 1 - \exp(-\beta) \frac{1 + \varphi^2 / [\gamma^2 (1 + \beta_{in}^2)]}{1 - \varphi^2 / [\gamma^2 (\beta_{in}^2 - 2\beta_{in} - 1)]} \right]. \tag{19}$$

Поэтому согласно выражению (19) для перевода переключателя в состояние «открыто» набег фазы  $\varphi$  должен удовлетворять неравенству

$$\varphi \gg \gamma \beta_{in} = h^2 / 2. \tag{20}$$



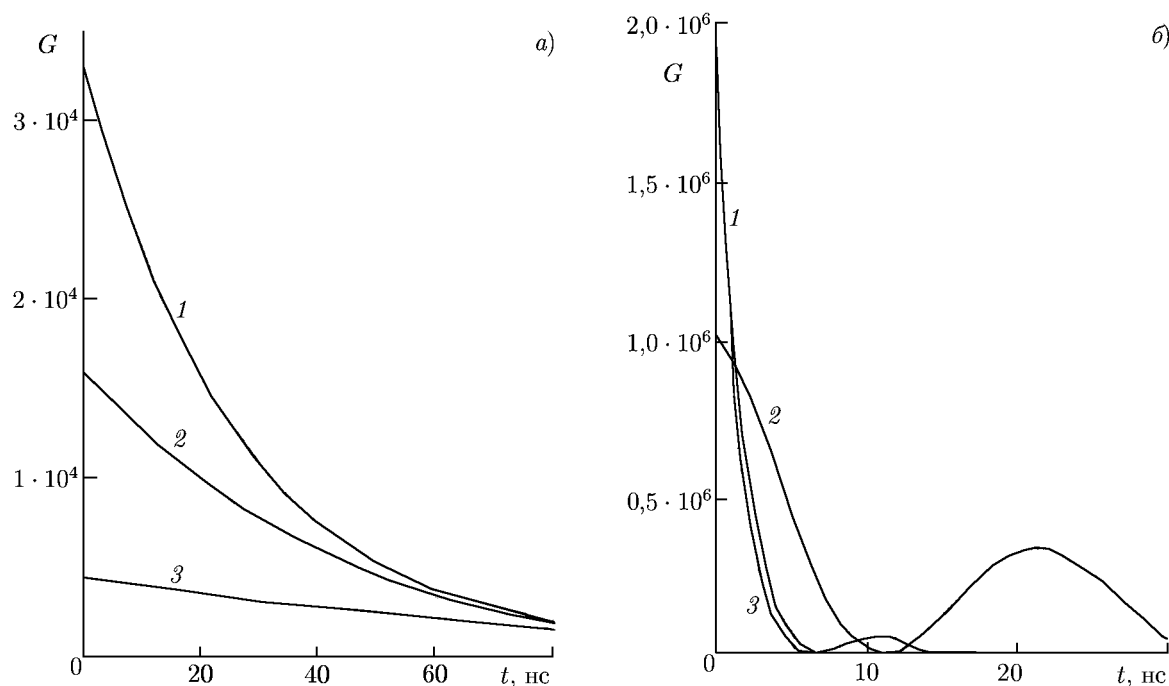


Рис. 5. Огибающие выходных импульсов компрессора при выводе энергии для двух вариантов управления параметрами коммутирующего резонатора: Панель (а) отвечает управлению посредством параметра  $\gamma$ , панель (б) — управлению с помощью набега фазы  $\varphi$ . Панель (а) соответствует случаю  $\varphi = 0$ ,  $h = 0,6$ : кривая 1 отвечает  $\gamma = 0,03$ ; 2 —  $\gamma = 0,02$ ; 3 —  $\gamma = 0,01$ ; Панель (б) соответствует случаю  $\gamma = 2 \cdot 10^{-8}$ ,  $h = 0,6$ : кривая 1 отвечает  $\varphi = 0,6$  рад; 2 —  $\varphi = 0,2$  рад; 3 —  $\varphi = 0,4$  рад

Набег фазы  $\varphi$  связан с отклонением резонансной частоты на величину  $\delta f$  равенством  $\varphi = 2\pi T \delta f$ , а добротность нагруженного резонатора даётся формулой  $Q \approx \omega T_2 / (2\gamma\beta_{in}) = f / \Delta f_L$ , поэтому соотношение (20) преобразуется в неравенство

$$\delta f \gg \Delta f_L / 2, \quad (21)$$

где  $\Delta f_L$  — полоса пропускания нагруженного резонатора. Таким образом, из соотношения (20) следует, что переключатель переходит в состояние «открыто» при изменении резонансной частоты коммутирующего резонатора на величину, превышающую полуширину его полосы пропускания.

На рис. 4б приведены рассчитанные зависимости коэффициента передачи интерференционного СВЧ переключателя  $R$  от набега фазы  $\varphi$  при различных значениях  $h$ ; из них следует возможность получить высокий коэффициент пропускания  $R$  при умеренных значениях  $\varphi$ .

На рис. 5 представлены рассчитанные по уравнению (15) временные зависимости огибающей выходного импульса системы в режиме вывода энергии для двух вариантов управления параметрами коммутирующего резонатора: управление потерями (рис. 5а) и управление частотой (рис. 5б).

На рис. 6 для сравнения представлены огибающие выходного импульса системы для варианта управления частотой ( $\varphi = 0,4$ ), полученные с помощью уравнения (15) — кривая 1 — и рекуррентных соотношений — кривая 2. Графики на рис. 5 и 6 построены для длительности входного СВЧ импульса  $t_0 = 0,02$  с в предположении мгновенного изменения параметров  $\gamma$  и  $\varphi$ . Длительность импульса выбрана произвольно, но с условием её сопоставимости по порядку величины с постоянной времени резонатора.

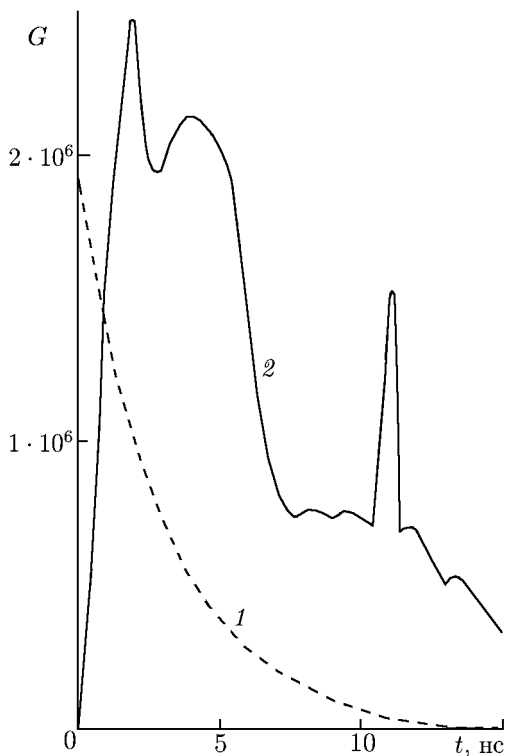


Рис. 6. Огибающие выходного импульса системы: кривая 1 отвечает расчёту по приближённому выражению (15), кривая 2 — расчёту с помощью рекуррентных соотношений

длительности выходного импульса единицы наносекунд.

#### 4. СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ КОММУТИРУЮЩЕГО РЕЗОНАТОРА

Рассмотрим способы управления параметрами  $\gamma$  и  $\varphi$ . Для целей компрессии СВЧ импульсов необходимо обеспечить высокую (в масштабе постоянной времени накопительного резонатора) скорость изменения этих параметров и, по возможности, расширить диапазоны их изменения.

Добротность сверхпроводящего СВЧ резонатора может быть значительно и с достаточно высокой скоростью изменена, например, введением в конструкцию коммутирующего резонатора искусственной внутренней неоднородности. Эта неоднородность, в зависимости от места её расположения, может провоцировать развитие в резонаторе электронной нагрузки автоэмиссионными токами, резонансным высокочастотным разрядом или термомагнитным пробоем. Однако эти процессы по своей сути являются нестабильными и практически неуправляемыми. Потерями в сверхпроводящем СВЧ резонаторе можно управлять переводом части его рабочей поверхности из сверхпроводящего в нормальное состояние внешним импульсным воздействием, например, лазерным лучом с достаточной интенсивностью. Изменение добротности изменяет коэффициент входной связи резонатора: связь трансформируется из сильной в относительно слабую. Для рассматриваемой системы это должно значительно изменить фазу или амплитуду отражённой от коммутирующего резонатора волны и перевести переключатель в режим «приоткрыто», а накопительного резонатора — в режим вывода. Потери энергии СВЧ поля в коммутирующем резона-

Оценки энергетических параметров рассматриваемой системы показывают следующее. Для принятых в расчёте параметров и частного случая  $\varphi = 0,4$  эффективность накопления (отношение накопленной в резонаторе энергии к энергии питающего резонатор импульса) составляет 0,52. При этом КПД системы, рассчитанный с использованием приближённых дифференциальных уравнений, оказывается порядка 0,16. Расчёт через рекуррентные соотношения даёт коэффициент полезного действия порядка 0,42. Таким образом, эффективность вывода (отношение энергии выходного импульса к энергии, накопленной в резонаторе) энергии составляет около 80%. Остальная энергия находится в «хвосте» импульса и теряется в стенках резонаторов. При укорочении входного импульса следует ожидать роста коэффициента полезного действия примерно до 0,8, но в ущерб коэффициенту усиления. Оптимизация параметров системы не являлась целью данной работы и будет предметом отдельного рассмотрения.

Из результатов расчёта следует, что в сверхпроводящей системе резонансной СВЧ компрессии с указанными выше параметрами возможно получить усиление по мощности 40÷60 дБ при

торе, перейдем в нормальное состояние, в процессе вывода оцениваются как незначительные в силу его слабой связи с волноводным плечом и малой продолжительности процесса.

Система может быть быстро переключена из режима накопления в режим вывода энергии изменением резонансной частоты коммутирующего резонатора, например с помощью газового разряда [5]. В случае сверхпроводящих резонаторов для этих целей более предпочтительным представляется введение в них электронного пучка с достаточно высокой силой тока, как это было осуществлено в [6]. При этом требуемый для коммутации ток пучка будет примерно тем же, что и в [6], поскольку нагруженная добротность коммутирующего резонатора в сверхпроводящей системе и добротность «тёплой» системы [6] являются величинами одного порядка.

Сдвиг под действием электронного пучка собственной частоты коммутирующего резонатора за пределы полосы пропускания накопительного резонатора переведёт коммутирующий резонатор в состояние короткого замыкания. Это обеспечит необходимую для переключения инверсию фазы отражённой от резонатора волны, а нагрузка резонатора электронным пучком дополнительно увеличит потери в коммутирующем резонаторе.

Детальная проработка технической реализации переключения накопительного сверхпроводящего СВЧ резонатора в режим вывода энергии с помощью изменения добротности и резонансной частоты коммутирующего резонатора требует отдельного рассмотрения.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена система активной резонансной компрессии СВЧ импульсов на основе модуляции добротности накопительного резонатора при интерференционном способе регулирования связи резонатора с нагрузкой, в которой коммутатор выполнен в виде волноводного H-тройника с дополнительным, сильно связанным резонатором в боковом плече. Проведённый анализ сверхпроводящего варианта исполнения рассмотренной системы показал возможность как эффективного запирания накопительного сверхпроводящего СВЧ резонатора в режиме накопления, так и эффективного вывода накопленной в нём энергии при управляемом воздействии на добротность или резонансную частоту дополнительного резонатора.

Численные оценки, проведённые с использованием уверенно достигаемых на практике добротностей сверхпроводящих резонаторов, показали возможность получить в такой системе усиление по мощности  $40 \div 60$  дБ при длительности выходных импульсов порядка единиц наносекунд и частоте их повторения от единицы до десятков герц. Рассмотрены варианты практической реализации предложенной системы.

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

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта 2.3408.2011 госзадания «Наука».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артёменко С. Н., Каминский В. Л., Самойленко Г. М. // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 11. С. 112.
2. Диденко А. Н., Юшков Ю. Г. Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.

3. Tantawi S. G., Lee T. G., Ruth R. D. Design of a multi-megawatt X-band solid state microwave switch: SLAC-PUB-95-69-27, 1995.
4. Артёменко С. Н., Августинович В. А., Каминский В. Л. и др. // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42, № 8. С. 1011.
5. Вихарев А. Л., Горбачёв А. М., Иванов О. А // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 18. С. 54.
6. Ivanov O. A., Isaev V. A., Lobaev M. A., et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. Art. no. 031501.
7. Артёменко С. Н. // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40, № 8. С. 1184.

Поступила в редакцию 9 апреля 2013 г.; принята в печать 2 декабря 2013 г.

### SWITCHING OF MICROWAVE RADIATION STORAGE AND EXTRACTING MODES IN SUPERCONDUCTING RESONANCE-CAVITY MICROWAVE COMPRESSORS WITH INTERFERENCE SWITCHES

*S. N. Artemenko and G. M. Samoylenko*

We propose a commutator for the interference switch of microwave electromagnetic radiation based on a waveguide H-junction made as a cavity with adjustable parameters, which is connected to one leg of this junction. The superconducting version of a microwave compressor with such a switch is analyzed. The conditions of effective switch operation in the mode of electromagnetic energy storage and its fast output in the case of controllable manipulation of the Q-factor and resonance frequency of the switching cavity were determined. Estimations of the output parameters of the superconducting compression system are presented for the Q-factors of the storing and switching cavity being approximately equal to  $5 \cdot 10^8$ . The possibility of increasing the radiation power in such a compression system by 40–60 dB for output microwave pulse with durations of about 5–10 ns is demonstrated. Variants of actual implementation of the system are considered.