

09;12

Вывод СВЧ энергии из резонатора при трансформации вида колебаний на окне связи

© С.Н. Артеменко, В.А. Августинович, Ю.Г. Юшков

Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском политехническом университете, 634050 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 8 января 1997 г.)

Исследован процесс формирования мощных наносекундных радиоимпульсов при выводе СВЧ энергии из сверхразмерного резонатора путем трансформации на окне связи высокочастотного рабочего вида колебаний во вспомогательный, сильносвязанный с внешней нагрузкой. Показано, что СВЧ компрессоры радиоимпульсов с медными накопительными резонаторами и выводом энергии трансформацией колебаний на окне связи могут обеспечить коэффициент усиления 5–13 дБ при длительности выходных сигналов 20–150 нс и пиковой мощности 5–10 МВт в 3- и 50–100 МВт в 10-сантиметровом диапазоне. Экспериментально на частоте 9.4 GHz при коэффициенте усиления 9 дБ получены радиоимпульсы длительностью 30 нс и пиковой мощностью 0.5 МВт.

Введение

В [1,2] сообщалось о выводе энергии из цилиндрического сверхразмерного резонатора при трансформации H_{01n} -вида колебаний в вид H_{11p} , сильно связанный с внешней нагрузкой. Вывод осуществлялся через выходной круглый волновод, заперделный для H_{01} -волны и доперделный для волны H_{11} , подсоединенный соосно с резонатором к одной из торцевых крышек. Трансформация обеспечивалась электрическим разрядником, расположенным в полости резонатора в максимуме φ -й электрической составляющей рабочего вида колебаний параллельно силовым линиям. Была продемонстрирована работоспособность СВЧ компрессоров радиоимпульсов с выводом энергии преобразованием колебаний и достигнут коэффициент усиления 13 дБ для медного накопительного резонатора и 30 дБ для сверхпроводящего при длительности выходных импульсов ≈ 20 –50 нс.

Вместе с тем описанные в [1,2] СВЧ компрессоры имеют два существенных недостатка, связанных с расположением разрядника непосредственно в полости резонатора. Во-первых, из-за трансформации на элементах конструкции разрядника рабочего типа волны в другие волны, излучающиеся в нагрузку через выходной волновод, снижается добротность резонатора в режиме накопления и, во-вторых, такое расположение уменьшает электрическую прочность устройства из-за присутствия указанных элементов в максимуме электрической составляющей ВЧ поля. Снижение добротности приводит к падению коэффициента усиления компрессора, а уменьшение электрической прочности затрудняет работу прибора на достаточно высоком уровне мощности.

В то же время способ вывода энергии, основанный на трансформации, является одним из немногих способов, который реализован на практике и при определенных условиях может составить конкуренцию наиболее известному и часто используемому способу, основанному

на выводе через интерференционный ключ [3,4]. По сравнению с системами с интерференционным ключом к несомненным достоинствам СВЧ компрессоров с выводом энергии трансформацией следует отнести более низкую плотность спектра собственных колебаний их накопительных объемов, а при условии отсутствия элементов конструкции разрядника в полости резонатора и возможность работы на более высоком уровне мощности. Первое обстоятельство связано с наличием в резонаторах таких компрессоров выходного волновода, за счет излучения через который происходит разрежение спектра, а второе обусловлено большей площадью поперечного сечения этого волновода по сравнению с сечением волновода интерференционного ключа.

Кроме того, компрессор с трансформацией допускает создание "гибридного" устройства, если к его выходному волноводу подсоединить интерференционный ключ. В этом случае вывод энергии можно осуществить, либо трансформируя вид колебания при закрытом ключе, открывая его только после завершения передачи энергии от рабочего вида к вспомогательному, либо используя переходный процесс в системе двух стационарно связанных колебаний, как это осуществлено в [5] в системе двух связанных резонаторов. При этом отпадает необходимость в очень сильной связи между выбранными колебаниями и, следовательно, смягчаются требования к элементу межвидового взаимодействия (разряднику, окну связи и т.п.). К тому же и в этом случае компрессор может работать при более высоком, чем обычная система с интерференционным ключом, уровне мощности, так как в рассматриваемом устройстве ключ будет находиться при высокой напряженности электрического ВЧ поля относительно короткий промежуток времени, равный времени передачи энергии от рабочего вида к вспомогательному (~ 10 –100 нс).

По этим причинам представляет несомненный интерес поиск эффективных способов и устройств быстрого

включения сильной межвидовой связи в резонаторах компрессоров с трансформацией колебаний, причем таких способов и устройств, которые сохраняли бы высокие электрофизические характеристики резонатора в режиме накопления и обеспечивали требуемую величину связи в режиме вывода.

В настоящей работе исследован способ быстрого включения сильной связи между колебаниями, основанный на изменении коэффициента межвидового взаимодействия на окне связи между резонатором и закороченным волноводным шлейфом при изменении длины шлейфа. Оценена эффективность способа. Выполнена экспериментальная его проверка на конкретном устройстве СВЧ компрессора трехсантиметрового диапазона.

Оценка коэффициента межвидовой связи на окне

Коэффициент межвидовой связи γ_{12} для колебаний с одинаковой резонансной частотой f можно оценить, используя известное соотношение [6],

$$\gamma_{12} = - \int (\mathbf{H}_1 \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2) dV / V, \quad (1)$$

где $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ — векторы магнитной и электрической компонент ВЧ поля взаимодействующих колебаний, V — объем резонатора.

Интеграл в (1) берется по объему δV "деформированной" части резонатора, на которой происходит взаимодействие.

При взаимодействии на окне связи, имеющем характерные размеры много меньше размеров резонатора и расположенном, например, в максимуме магнитных компонент ВЧ поля, выражение (1) может быть заменено приближенным равенством

$$\gamma_{12} \approx \delta V H_{10} H_{20} / V, \quad (2)$$

где H_{10}, H_{20} — напряженность магнитных составляющих поля в центре окна.

С другой стороны, "деформированная" часть резонатора, как известно [6], кроме межвидового взаимодействия вызывает и уход частоты колебаний на относительную величину $\sigma_{1,2}$, определяемую выражением

$$\sigma_{1,2} = \delta f_{1,2} / f = 2 \int (\mathbf{H}_{1,2}^2 - \mathbf{E}_{1,2}^2) dV / V, \quad (3)$$

в котором, так же как и в (1), интеграл берется по объему δV . Отсюда для рассматриваемого окна связи находим

$$\delta V \approx \delta f_{1,2} V / 2f H_{10,20}^2. \quad (4)$$

Поэтому (2) можно свести к виду

$$\gamma_{12} \approx \delta f_{1,2} H_{10} H_{20} / 2f H_{10,20}^2. \quad (5)$$

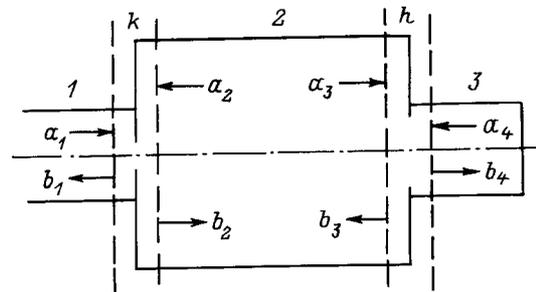


Рис. 1. Схема резонатора, связанного с закороченным шлейфом.

Далее, так как для эффективного взаимодействия колебаний окно необходимо располагать там, где H_{10} и H_{20} не только максимальны либо близки к максимальным, но и сравнимы, то окончательно (5) можно представить так:

$$\gamma_{12} \approx \delta f / 2f, \quad (6)$$

где $\delta f \approx \delta f_1 \approx \delta f_2$.

Значение δf для резонатора, связанного с закороченным волноводным шлейфом, определим, используя метод матрицы рассеяния [7]. Для этого исследуемое устройство представим в виде связанных волноводных отрезков, как показано на рис. 1, где 1 — входной волновод; 2 — резонатор; 3 — шлейф; k, h — параметры, характеризующие связь резонатора с входным волноводом и шлейфом соответственно; $a_1 \dots a_4$ — амплитуды падающих волн; $b_1 \dots b_4$ — отраженных. Тогда, согласно выбранному методу, для амплитуд волн в системе можно записать равенства

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} -\sqrt{1-k^2}jk \\ jk - \sqrt{1-k^2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix}, & \begin{vmatrix} a_3 \\ a_4 \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} -\sqrt{1-h^2}jh \\ jh - \sqrt{1-h^2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} b_3 \\ b_4 \end{vmatrix}, \\ a_2 &= b_3 \exp(-\alpha - j\varphi_c), & a_3 &= b_2 \exp(-\alpha - j\varphi_c), \\ a_4 &= -b_4 \exp(-2\beta - 2j\psi), \end{aligned} \quad (7)$$

где α, β — постоянные затухания волн в резонаторе и шлейфе при их однократном пробеге; φ_c, ψ — дополнительный набег фазы волн в резонаторе и шлейфе из-за отличия рабочей частоты системы от резонансной частоты резонатора и шлейфа.

При этом ψ задается выбором длины шлейфа, а φ_c определяется выражением

$$\varphi_c \approx \varphi_1 + \varphi_2, \quad (8)$$

где $\varphi_1 = \arctg(h/\sqrt{1-h^2})/2$ — набег фазы, обусловленный влиянием на частоту резонатора окна связи, а φ_2 , как нетрудно показать, используя (7), определяется приближенной формулой $\varphi_2 \approx \arctg[h^2 \exp(-2\beta) \sin(2\psi) / (1 - 2 \exp(-2\beta) \cos(2\psi) + \exp(-4\beta))]/2$ и есть набег фазы, связанный с влиянием закороченного шлейфа (влиянием входного окна связи пренебрежем).

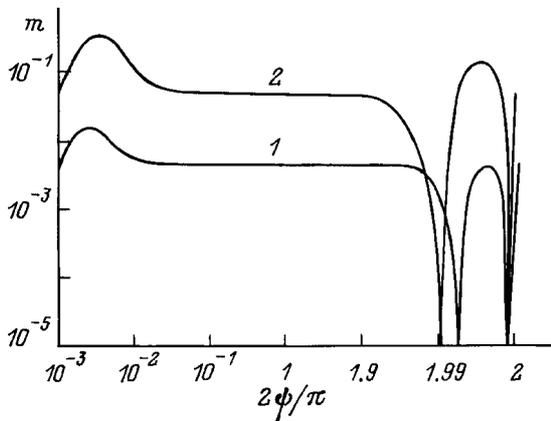


Рис. 2. Зависимость параметра связи рабочего и вспомогательного видов колебаний от электрической длины шлейфа.

Кроме того, можно показать, что справедливо равенство

$$\varphi_c = \pi \delta f T, \quad (9)$$

где T — время двойного пробега волны вдоль резонатора.

Поэтому из (6) и (9) для γ_{12} находим

$$\gamma_{12} \approx |\varphi_c|/2\pi f T = |\varphi_c|/\omega T. \quad (10)$$

Если далее в качестве модели взаимодействующих колебаний вместо системы двух связанных контуров, как это принято в [6], взять систему двух связанных резонаторов с параметром связи m , то можно получить, что m выражается через γ_{12} следующим образом:

$$m = \omega T \gamma_{12}. \quad (11)$$

Поэтому окончательно для параметра m , характеризующего величину межвидовой связи на окне, из (10) и (11) находим

$$m \approx |\varphi_c(h, \beta, \psi)|. \quad (12)$$

Последнее выражение позволяет использовать для оценки эффективности межвидового взаимодействия результаты [8], согласно которым передача энергии от рабочего вида колебаний к внешней нагрузке становится эффективной, когда межвидовая связь становится не меньше связи вспомогательного вида с нагрузкой. Это означает, что для эффективного вывода энергии трансформацией колебаний величина параметра m по крайней мере должна быть сравнима со значением параметра $q \approx 2\sqrt{\alpha\beta_{\text{вх}}}$, характеризующего потери энергии вспомогательного вида на излучение через выходной волновод, где β_{out} — коэффициент связи этого вида колебаний с нагрузкой.

На рис. 2 приведены зависимости m от ψ при $\beta = 5 \cdot 10^{-3}$ для $h = 1.0 \cdot 10^{-2}$ и $1.0 \cdot 10^{-1}$ (кривые 1, 2). Из рисунка следует, что m существенным образом зависит как от величины связи h резонатора со шлейфом, так и от величины дополнительного набега фазы ψ (от

длины шлейфа). При этом независимо от величины h всегда имеются два значения ψ , при которых параметр межвидовой связи m равен нулю. В то же время можно выбрать длину шлейфа такой, при которой m будет принимать значения ~ 0.1 и более. Поэтому очевидно, что если накопление энергии вести при длине шлейфа, соответствующей значению $m = 0$, а затем с помощью коммутатора (разрядника) быстро изменить ее, то таким образом можно осуществить быстрое включение сильной межвидовой связи (согласно [8], критерием сильной межвидовой связи является выполнение неравенства $m \gg 4\sqrt{\alpha\alpha_1}$, где α_1 — постоянная затухания вспомогательного типа волны при однократном пробеге резонатора).

Оценка характеристик СВЧ компрессоров с трансформацией колебаний на окне связи

Используя полученные выше результаты, оценим возможные рабочие характеристики СВЧ компрессоров 3- и 10-сантиметровых диапазонов с исследуемым способом вывода энергии.

Нетрудно показать, что при типичных значениях собственной добротности сверхразмерного медного цилиндрического резонатора с H_{01n} -видом колебаний $Q_{01} \approx 10^5$ и времени двойного пробега волны вдоль резонатора $T \approx 1-3$ ns постоянная затухания α для H_{01} -волны имеет величину, близкую к 10^{-4} . Поэтому для вспомогательного вида колебаний с собственной добротностью $Q_{02} \approx 5 \cdot 10^4$ и нагруженной $Q_{12} \approx 2 \cdot 10^3$ его параметр связи q с внешней нагрузкой будет иметь значение порядка 0.1–0.2.

Далее, из (9) следует, что при уходе частоты $\delta f \approx 10-20$ МГц, соответствующем реально достижимым величинам связи резонатора со шлейфом $h \approx 0.1-0.2$, и при $T \approx 1-3$ ns набег фазы φ_c , а следовательно, и параметр m могут достигать значений $\sim 0.05-0.1$, сравнимых с q . В силу этого окно связи между резонатором и шлейфом может служить эффективным элементом передачи энергии от рабочего вида колебаний к вспомогательному и от вспомогательного к нагрузке. При этом коэффициент усиления компрессора будет определяться выражением [8]

$$M^2 \approx (1 - \pi q^2/4m)M_0^2, \quad (13)$$

где $M_0^2 = q^2/4\alpha$ — коэффициент усиления компрессора с интерференционным ключом.

Как следует из (13), M^2 может достигать значений порядка 0.8–0.9 M_0^2 .

Для указанных величин параметров m , q вывод энергии при трансформации колебаний, согласно [8], должен идти с синусоидальной модуляцией огибающей выходного сигнала, обусловленной поочередной передачей энергии от рабочего вида колебаний к вспомогательному

и обратно. Однако так как период передачи при значениях m , близких к q , становится сравнимым с постоянной затухания сигнала τ ($T/m \approx T/8\alpha\beta_{out} = \tau$), то в выходном импульсе осцилляции огибающей могут отсутствовать, за исключением первого "всплеска", соответствующего переходу энергии от рабочего колебания к вспомогательному. Обратный процесс реализоваться в этом случае не успевает.

Численные значения коэффициента усиления СВЧ компрессоров с трансформацией колебаний на окне связи ($M^2 \leq q^2/4\alpha$) и длительности их выходных сигналов ($t_p \geq T/m$), согласно оценкам, в 3- и 10-сантиметровых диапазонах могут составлять $\approx 5-13$ dB и $\approx 20-150$ ns. Предельный уровень выходной мощности будет определяться электрической прочностью окна и волноводного шлейфа и при газовой изоляции под избыточным давлением (например, при изоляции элегазом) с трехкратным запасом прочности и трехсантиметровом диапазоне может достигать $\approx 5-10$ и $\approx 50-100$ MW в десятисантиметровом.

Экспериментальные результаты

Экспериментальные исследования выполнены на системе трехсантиметрового диапазона с резонатором, имеющим диаметр 90 и длину 213.5 mm и работающим на частоте 9.4 GHz на $H_{01(12)}$ -виде колебаний. Собственная добротность резонатора составляла $1.1 \cdot 10^5$. Возбуждалась система через окно связи в одной из торцевых крышек резонатора в месте максимума H_r -й компоненты ВЧ поля рабочего вида колебаний. На этой же крышке симметрично входному окну относительно центра крышки располагалось окно связи резонатора с закороченным шлейфом, изготовленным из стандартного прямоугольного волновода с поперечным сечением 28.5×12.6 mm.

В шлейф для исследования влияния его длины на величину межвидовой связи был включен H -тройник с закороченным полуволновым боковым плечом и расположенным в нем коммутатором (электрическим разрядником), как показано на рис. 3, где 1 — входной

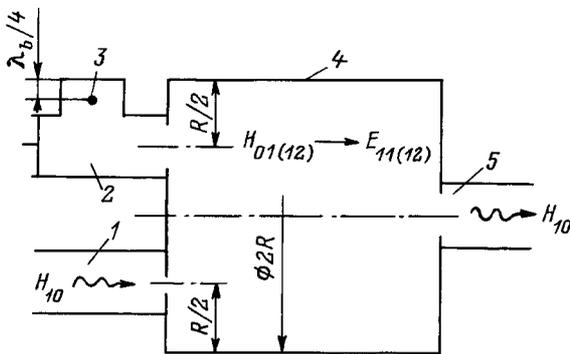


Рис. 3. Схема резонансной системы для экспериментального исследования вывода энергии при трансформации рабочего вида колебаний на окне связи.

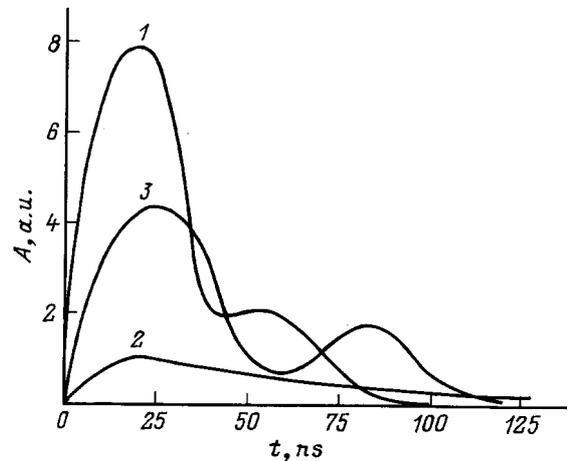


Рис. 4. Огибающие выходных радиоимпульсов при различных значениях электрической длины шлейфа.

волновод, 2 — тройник, 3 — коммутатор, 4 — резонатор, 5 — выходной волновод. Полуволновая длина бокового плеча обеспечивала в режиме накопления развязку входного и выходного плеч тройника около 45 dB. Это позволяло избежать пробоев в выходном плече тройника при накоплении энергии из-за подсветки волноводного тракта искрением на подвижном поршне, закорачивающем это плечо. Кроме того, такая конструкция позволяла отслеживать динамику межвидового взаимодействия при изменении длины шлейфа, не прибегая к его переборке. Длина входного плеча тройника выбиралась близкой к полуволновой и такой, чтобы на рабочей частоте излучение энергии в нагрузку через выходной волновод было минимальным. В использованной в экспериментах системе уровень этого излучения не превышал уровня, характерного для интерференционного ключа (~ 45 dB). В качестве выходного волновода использовался стандартный прямоугольный волновод с сечением 28.5×12.6 mm, подсоединенный соосно с резонатором ко второй его торцевой крышке, как показано на рис. 3, и с широкой стенкой, параллельной широким стенкам входного волновода и волновода шлейфа. Размеры овальных окон связи резонатора со шлейфом и выходным волноводом соответственно составляли 12.6×16 и 12.6×18 mm.

Система питалась от магнетронного генератора с выходной импульсной мощностью ≈ 60 kW при длительности импульсов ~ 1 μ s. Коммутация режимов работы осуществлялась плазмой СВЧ разряда на воздухе при атмосферном давлении, инициируемого подачей на коммутатор управляющего высоковольтного сигнала. Время срабатывания разрядника составляло около 2 ns. Относительная величина расстройки частот $\Delta f/f$ рабочего вида колебаний и вырожденного с ним $E_{11(12)}$ - (вспомогательного) вида колебаний, сильносвязанного с выходным волноводом, при коммутации не превышала $5.0 \cdot 10^{-4} - 10^{-3}$, что при величине коэффициента межвидовой связи $\gamma_{12} \approx 10^{-3}$ ($m \approx 0.1$) означает практическое совпадение частот взаимодействующих колебаний [9].

После срабатывания коммутатора на выходе системы фиксировались радиоимпульсы с огибающими, приведенными на рис. 4, где кривая 1 соответствует длине шлейфа, при которой межвидовая связь близка к максимальной ($\psi \approx \pi/2 - h$), кривая 2 — длине, при которой связь между колебаниями практически отсутствует ($\psi \approx \pi - h$), и кривая 3 — промежуточному случаю. Как видно, экспериментальные результаты качественно хорошо согласуются с результатами теоретических оценок настоящей работы и работы [8]. Максимальный измеренный коэффициент усиления исследованного компрессора составил 9 дБ при пиковой мощности выходного сигнала ≈ 0.5 MW и длительности 30 ns по уровню 0.5. Оценочное значение параметра межвидовой связи m при таких характеристиках выходного радиоимпульса составило ≥ 0.05 . Эффективность передачи энергии сжимаемого импульса в нагрузку при неоптимизированном режиме накопления равнялась $\sim 0.2-0.25$.

Заключение

Таким образом, в работе обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения мощных наносекундных радиоимпульсов при накоплении СВЧ энергии в сверхразмерном объемном резонаторе и последующем быстром ее выводе путем трансформации на окне связи высокочастотного рабочего вида колебаний во вспомогательный, сильносвязанный с внешней нагрузкой. Результаты работы позволяют надеяться, что СВЧ компрессоры радиоимпульсов с выводом энергии трансформацией колебаний могут оказаться достаточно перспективными приборами с характеристиками, близкими к характеристикам компрессоров с выводом через интерференционный ключ.

Список литературы

- [1] Артеменко С.Н., Каминский В.Л., Юшков Ю.Г. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. Вып. 24. С. 1529–1533.
- [2] Артеменко С.Н., Каминский В.Л., Юшков Ю.Г. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 9. С. 1885–1887.
- [3] Альварец Р., Биркс Д., Берн Д. и др. // Атомная техника за рубежом. 1982. Вып. 11. С. 36–39.
- [4] Августинович В.А., Августинович Л.Я., Артеменко С.Н., Юшков Ю.Г. // Радиоэлектроника. Изв. вузов. 1987. Т.30. № 2. С. 90–92.
- [5] Иванников В.И., Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 5. С. 194–197.
- [6] Штейншлейгер В.Б. Явление взаимодействия волн в электромагнитных резонаторах. М.: Оборонгиз, 1955. 112 с.
- [7] Альтман Дж. Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968. 488 с.
- [8] Артеменко С.Н. // Радиофизика. Изв. вузов. 1987. Т. 30. № 10. С. 1289–1292.
- [9] Артеменко С.Н., Каминский В.Л. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 11. С. 161–164.