

УДК 621.372.8

Саламатин В.В., канд. техн. наук, доцент; **Лукьянчук Г.А.** аспирант

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

РЕЗОНАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НЕПРЕРЫВНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИМПУЛЬСНОЕ КОГЕРЕНТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ

Предложен метод построения резонансного преобразователя непрерывного микроволнового излучения в импульсное когерентное излучение повышенной мощности, выполненного на основе резонатора бегущей волны. Приведены результаты исследования преобразователя. Определены значения выходной импульсной мощности и длительности выходных импульсов.

Импульсный режим работы устройств находит широкое применение в радиолокации, радиосвязи и других областях радиотехники.

В резонансных СВЧ компрессорах мощность и длительность выходных импульсов определяется энергией поля в накопительном объёме в момент коммутации и временными характеристиками переходного процесса [1,2]. Для вывода энергии используют различные интерференционные переключатели с газоразрядными коммутаторами [3].

Важной проблемой, нерешённой до настоящего времени, является осуществление быстрого вывода накопленной энергии из резонатора бегущей волны (РБВ) таким образом, чтобы длительность выходных импульсов была соизмерима со временем двойного пробега волны по резонансному кольцу.

Целью данной статьи является исследование метода построения устройства быстрого вывода накопленной энергии из резонатора с последующим восстановлением механизма накопления энергии. На рисунке 1 изображен один из возможных вариантов построения функциональной схемы преобразователя.

На рисунке 1 введены следующие обозначения: 1 – генератор СВЧ, работающий в непрерывном режиме; 2 – первичный канал НО; 3 – согласованная нагрузка; 4 – кольцевой резонатор – вторичный канал НО; 5 – первичный канал волноводно-щелевого моста (ВЩМ); 6 – затвор, расположенный в щели ВЩМ; 7 – вторичный канал ВЩМ; 8 – согласованная нагрузка; I, II, III, IV – плечи направленного ответвителя; I', II', III', IV' – плечи щелевого моста; $P_1, P_2, P_3, P_{\text{вых}}$ – мощности волны в I, II, III плечах направленного ответвителя и I' плече щелевого моста соответственно.

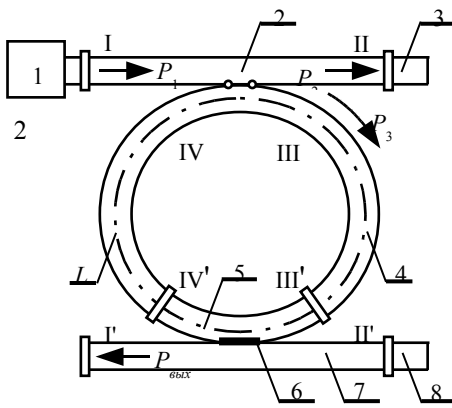


Рисунок 1 – Функциональная схема преобразователя радиоимпульсов

Считая направленность ответвителя бесконечной, все элементы РБВ и моста согласованными, смежные плечи моста идеально развязанными, учитывая, что волна генератора СВЧ постоянно поступает в плечо I, построен ориентированный граф данного устройства [4]. На рисунке 2 изображен ориентированный граф устройства.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dot{E}_3, \dot{E}_{\text{вых}}$ – комплексные нормированные амплитуды волн I, II, III плечах направленного ответвителя и в I' плече щелевого моста соответственно; $\dot{S}_{31}, \dot{S}_{21}, \dot{S}_{34}, \dot{S}_{42}$ – комплексные коэффициенты передачи между соответствующими плечами направленного ответвителя; $\tau e^{i\varphi}$ – комплексный коэффициент передачи

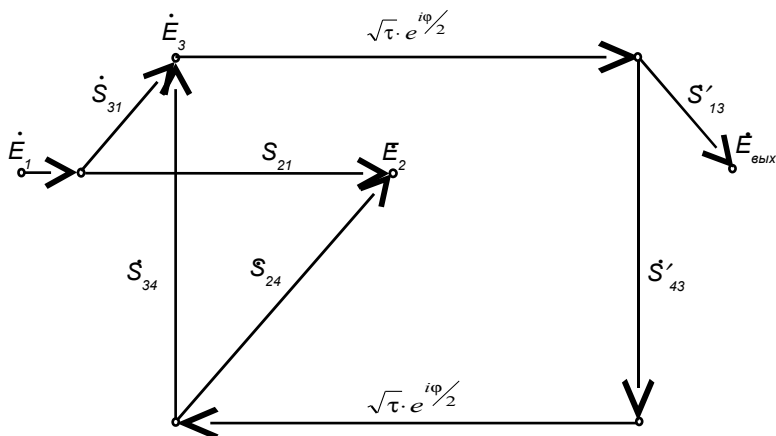


Рисунок 2 – Ориентированный граф преобразователя

кольцевого резонатора (τ – модуль, φ – фаза); $\dot{S}'_{13}, \dot{S}'_{43}$ – комплексные коэффициенты передачи между I', IV' и III' плечами щелевого моста.

Обозначим коэффициент связи первичного канала НО со вторичным через k_1 , тогда, $\dot{S}_{31} = \dot{S}_{42} = ik_1$, $\dot{S}_{21} = \dot{S}_{34} = \sqrt{1 - k_1^2}$; коэффициент связи каналов щелевого моста $\dot{S}'_{13} = k_2$, при этом $\dot{S}'_{43} = \sqrt{1 - k_2^2}$. При закрытом затворе ($k_2 = 0$, $\dot{S}'_{43} = 1$) нормированную амплитуду напряженности элек-

трического поля бегущей по кольцу волны можно определить с помощью формулы Мезона [4]:

$$\dot{E}_3 = \frac{ik_1 \dot{E}_1}{1 - \sqrt{1 - k_1^2} \tau e^{i\varphi}}. \quad (1)$$

Амплитуда волны $\dot{E}_2$ в плече II НО определяется следующим образом

$$\dot{E}_2 = \left(\sqrt{1 - k_1^2} - \frac{k_1^2 \tau e^{i\varphi}}{1 - \sqrt{1 - k_1^2} \tau e^{i\varphi}} \right) \dot{E}_1 = \frac{\sqrt{1 - k_1^2} - \tau e^{i\varphi}}{1 - \sqrt{1 - k_1^2} \cdot \tau e^{i\varphi}} \dot{E}_1, \quad (2)$$

где φ – фаза коэффициента передачи. Длина кольца L при резонансе кратна длине волны в волноводе λ_B , т.е. $L = n\lambda_B$, где n – целое число; $\varphi = 2\pi n$, поэтому $e^{i\varphi} = 1$.

Мощности волны в кольце P_3 и в плече II НО равны квадрату модулей соответствующих комплексных нормированных амплитуд (1) и (2), т.е.

$$P_3 = \frac{k_1^2 P_1}{1 - 2\tau \sqrt{1 - k_1^2} \cos \varphi + \tau^2 (1 - k_1^2)} = \frac{k_1^2 P_1}{\left(1 - \tau \sqrt{1 - k_1^2}\right)^2}, \quad (3)$$

$$P_2 = \left[\frac{(1 - k_1^2) - 2\tau \sqrt{1 - k_1^2} \cos \varphi + \tau^2}{1 - 2\tau \sqrt{1 - k_1^2} \cos \varphi + \tau^2 (1 - k_1^2)} \right] P_1 = \frac{\left(\sqrt{1 - k_1^2} - \tau\right)^2 P_1}{\left(1 - \tau \sqrt{1 - k_1^2}\right)^2}, \quad (4)$$

где P_1 – мощность генератора СВЧ, поступающая на вход I НО.

Как видно из (3) и (4), когда коэффициент связи k_1 принимает критическое значение $k_1 = k_{1kp}$, при котором $\sqrt{1 - k_{1kp}^2} = \tau$, мощность волны в плече II НО становится равной нулю, а мощность в кольце достигает своего максимального значения:

$$P_{3\max} = \frac{P_1}{k_{1kp}^2}. \quad (5)$$

Для направленного ответвителя с переходным затуханием, равным 20 дБ, коэффициент $k_{1kp}^2 = 0,01$, т.е. $P_{3\max} = 100P_1$. Таким образом, в кольце РБВ мощность бегущей волны может достигать больших значений (5) по сравнению с мощностью P_1 генератора.

Вывод накопленной энергии из РБВ осуществляется через щель моста при открытом затворе. В соответствии с ориентированным графом (рисунок 2) в течение времени пробега фронтом волны половины длины резо-

нансного кольца до щели связи моста, нормированная амплитуда волны на выходе моста Γ определяется выражением:

$$\dot{E}_{\text{блх1}} = (ik_1 \dot{E}_1 + \dot{E}_3) \sqrt{\tau} e^{i\varphi/2} \dot{k}_2.$$

После первого пробега волны по кольцу до щели моста амплитуда волны станет равной $\dot{E}_{\text{блх2}} = \dot{E}_{\text{блх1}} \tau e^{i\varphi} \sqrt{1 - k_1^2} \sqrt{1 - k_2^2}$. Обозначим $q = \tau e^{i\varphi} \sqrt{1 - k_1^2} \sqrt{1 - k_2^2}$. После последующего пробега фронта волны по кольцу амплитуда $\dot{E}_{\text{блх3}} = q \dot{E}_{\text{блх2}}$. Ряд значений $\dot{E}_{\text{блхj}}$ ($j = 1, 2, 3, \dots$) представляет собой убывающую геометрическую прогрессию со знаменателем q .

Первый член этой прогрессии с учётом (1) равен:

$$\dot{E}_{\text{блх1}} = ik_1 \dot{E}_1 \sqrt{\tau} e^{i\varphi/2} \dot{k}_2 \left(1 + \frac{1}{1 - \tau e^{i\varphi} \sqrt{1 - k_1^2}} \right).$$

Выходная мощность в этот промежуток времени определяется соотношением:

$$P_{\text{блх1}} = k_1^2 k_2^2 P_1 \tau \left(1 + \frac{1}{1 - \tau \sqrt{1 - k_1^2}} \right)^2. \quad (6)$$

Для m -го члена прогрессии величина нормированной амплитуды поля равна:

$$\dot{E}_{\text{блх } m} = \dot{E}_{\text{блх1}} q^{m-1} = ik_1 \dot{E}_1 \sqrt{\tau} e^{i\varphi/2} \dot{k}_2 \left(1 + \frac{1}{1 - \tau e^{i\varphi} \sqrt{1 - k_1^2}} \right) \left(\tau \sqrt{1 - k_1^2} \sqrt{1 - k_2^2} \right)^{m-1}.$$

Мощность (с учетом того, что $e^{i\varphi} = 1, e^{i\varphi/2} = -1$) находится как

$$P_{\text{блх } m} = P_{\text{блх1}} q^{2m-2} = k_1^2 k_2^2 \tau P_1 \left(1 + \frac{1}{1 - \tau \sqrt{1 - k_1^2}} \right)^2 \left(\tau \sqrt{1 - k_1^2} \sqrt{1 - k_2^2} \right)^{2m-2}.$$

Скорость вывода накопленной СВЧ энергии из РБВ характеризуется отношением мощностей

$$\frac{P_{\text{блх1}}}{P_{\text{блх } m}} = \frac{1}{\left(\tau \sqrt{1 - k_1^2} \sqrt{1 - k_2^2} \right)^{2m-2}} \quad (7)$$

и зависит от величины k_2^2 , значительно большей, чем k_1^2 . Длительность пробега длины кольца фронтом бегущей волны составляет

$$t_1 = \frac{L}{V_\phi} = \frac{L}{\lambda_B f} = nT,$$

где V_ϕ, f, T – фазовая скорость, частота и период колебаний.

Длительность m пробегов составляет

$$t_m = nmT. \quad (8)$$

Выражение (7) позволяет рассчитать время спада мощности до задан-

ного значения $\frac{P_{\text{вых}1}}{P_{\text{вых}}}$.

При использовании трёхдецибелного моста и критической связи ($k_2^2 = 0,5$, $k_{1kp}^2 = 0,01$) уровень огибающей радиоимпульса по мощности (6) в начальный момент равен:

$$P_{\text{вых}1} = \frac{k_2^2 \sqrt{1 - k_{1kp}^2} (1 + k_{1kp}^2)^2 P_1}{k_{1kp}^2} \approx 50P_1.$$

Длительность импульса t_m на уровне -3 дБ определяется из соотношения (7) с помощью замены согласно (8):

$$\frac{P_{\text{вых}1}}{P_{\text{вых}m}} = 2 = \frac{1}{\left(\tau \sqrt{1 - k_1^2} \sqrt{1 - k_2^2} \right)^{2 \left(\frac{t_m}{nT} - 1 \right)}} \quad (9)$$

или

$$\frac{P_{\text{вых}1}}{P_{\text{вых}m}} = 2 = \frac{1}{\left(\tau \sqrt{1 - k_{1kp}^2} \sqrt{1 - k_2^2} \right)^{2 \left(\frac{t_m}{nT} - 1 \right)}}.$$

Подставляя в (9) значения $k_1^2 = k_{1kp}^2 = 0,01$; $k_2^2 = 0,5$; $n = 6$; $T = 10^{-10}$ с получаем $t_m = 11,83 \cdot 10^{-10}$ с.

При $k_2^2 = 1$, $P_{\text{вых}1} = 100P_1$, $t_m = 0,5mT = 3 \cdot 10^{-10}$ с.

Таким образом, с помощью щелевого моста можно быстро вывести энергию, накопленную в кольце РБВ.

Наиболее простой механический затвор представляет собой подвижную проводящую пластину, установленную в щель моста и имеющую отверстие в виде окна, совпадающего по размерам со щелью. Во время накопления СВЧ энергии в резонаторе щель моста перекрыта проводящей пластиной, а в момент извлечения энергии из РБВ при быстром перемещении пластины окно пластины совмещается со щелью. Механические затво-

ры, применяемые в твердотельных лазерах, позволяют получить длительности импульсов порядка нескольких наносекунд.

Дальнейшие исследования в этом направлении будут связаны с разработкой оптимальных конструкций затворов, способных достаточно быстро открывать щель моста, а также с уменьшением потерь в резонансном кольце РБВ.

Библиографический список

1. Диденко А.Н. Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности / А.Н. Диденко, Ю.Г. Юшков. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 112 с.
2. Саламатин В.В. Анализ переходного процесса в резонаторе бегущей волны / В.В. Саламатин, Г.А. Лукьянчук // Вестн. СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2003. — Вып. 47. — С. 145–154.
3. Августинович В.А. Быстрый вывод энергии из сверхразмерного накопительного резонатора / В.А. Августинович, С.Н. Артеменко, С.А. Новиков // Приборы и техника эксперимента. — 2002. — № 5. — С. 105–107.
4. Силаев М.А. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств / М.А. Силаев, С.С. Брянцев. — М.: Сов. радио, 1971. — 248 с.

Поступила в редакцию 18.11.2003 г.