

09

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ СВЧ ЭНЕРГИИ В НАГРУЗКУ ПРИ РЕЗОНАНСНОЙ КОМПРЕССИИ РАДИОИМПУЛЬСОВ

© С.Н.Артеменко

Научно-исследовательский институт ядерной физики  
при Томском политехническом университете,  
Томск, Россия  
(Поступило в Редакцию 15 июня 1995 г.)

Проанализирован процесс передачи энергии от СВЧ генератора к нагрузке при резонансной компрессии выходного сигнала генератора, осуществляемой путем накопления энергии сигнала в объемном резонаторе и последующего быстрого ее вывода в нагрузку. Получены зависимости эффективности передачи энергии и коэффициента усиления СВЧ компрессоров, выполненных по "проходной" схеме и схеме с объединенным элементом ввода-вывода энергии, от длительности сигнала с генератора для различных значений собственной добротности резонатора и длительности выходного сигнала. Проведено сравнение зависимостей эффективности передачи с соответствующими зависимостями эффективности накопления. Показано, что при "проходной" схеме СВЧ компрессора максимум эффективности передачи и максимум коэффициента усиления не совпадают с максимумом эффективности накопления.

### Введение

При формировании мощных радиоимпульсов наносекундной длительности методом резонансной компрессии СВЧ энергии [1] значительная часть энергии сжимаемого импульса, как известно, может теряться из-за отражения сигнала от входа резонатора в процессе накопления. Проблема снижения потерь на отражение исследована в [2-4], там же предложены методы повышения эффективности накопления до 90-99%, которые основаны на применении для повышения эффективности либо регулируемой входной связи резонатора [2], либо системы двух связанных резонаторов [3]. Однако на практике эти методы, как правило, не используются, что связано с определенными трудностями их реализации. Поэтому для уменьшения потерь на отражение чаще всего применяется более простой и в то же время достаточно эффективный метод, заключающийся в выборе оптимальной величины входной связи резонатора по заданным значениям его собственной добротности

и длительности входного сигнала [4]. При достаточно высокой добротности резонатора ( $Q_0 \gtrsim 10^5$ ) и относительно коротких сигналах генератора ( $t_u < Q_0/\omega$ ) метод в состоянии обеспечить эффективность накопления  $\simeq 70-80\%$ . Вместе с тем, при формировании наносекундных радиоимпульсов рассматриваемым способом более важное значение, чем проблема повышения эффективности накопления, имеет вопрос об обеспечении максимально эффективной передачи энергии сжимаемого импульса от генератора к нагрузке СВЧ компрессора. В то же время в известной литературе этот вопрос не рассматривается, тогда как представляется очевидным, что из-за возможных потерь энергии при ее выводе на излучение в сторону генератора условия эффективной передачи энергии в нагрузку не всегда могут совпадать с условиями эффективного накопления.

В настоящей работе определены оптимальные условия передачи СВЧ энергии в нагрузку при резонансном сжатии радиоимпульсов в наиболее простой схеме СВЧ компрессора, в которой элементы ввода и вывода энергии разделены и эффективное накопление обеспечивается выбором оптимальной величины входной связи (схема с "проходным" резонатором). Эти условия сравнены с аналогичными условиями для СВЧ компрессора с объединенным элементом ввода-вывода.

### СВЧ компрессор с "проходным" резонатором

Исследование передачи энергии в устройстве с "проходным" резонатором выполним, используя метод матрицы рассеяния [5]. При этом устройство представим в виде схемы (рис. 1), где 1 — СВЧ генератор; 2 — входной волноводный тракт; 3 — резонатор, 4 — выходной тракт; 5 — нагрузка;  $k, h$  — параметры, характеризующие связь резонатора с входным и выходным трактами соответственно;  $a_1 \dots a_4$  — амплитуды падающих волн,  $b_1 \dots b_4$  — отраженных.

Как известно [4], процесс накопления энергии описывается выражением

$$W_H = \frac{1}{2} |b_2(t_u)|^2 T = \frac{4\beta_1}{(1 + \beta_1)^2} (1 - e^{-\gamma})^2 P_g, \quad (1)$$

где  $t_u$  — длительность сигнала с генератора,  $T$  — время двойного пробега волны вдоль резонатора,  $\beta_1 = k^2/2\alpha$  — коэффициент связи резонатора с входным трактом,  $\alpha$  — постоянная затухания волны в резонаторе.

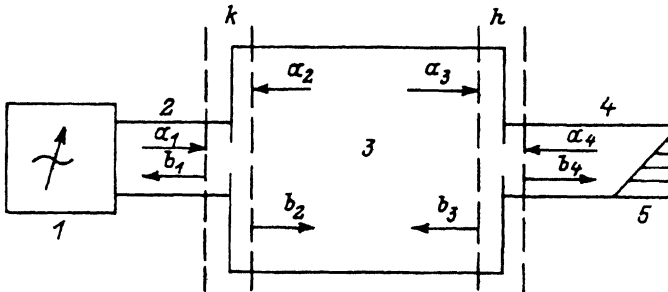


Рис. 1. Схема СВЧ компрессора с "проходным" резонатором.

наторе при двойном пробеге,  $\gamma = t_u(1 + \beta_1)/2\tau_H$ ,  $\tau_H = Q_0/\omega = T/(1 - \sqrt{1 - k^2}e^{-\alpha})$  — постоянная затухания колебаний резонатора,  $P_g$  — мощность генератора.

Из (1) следует хорошо известное соотношение для эффективности накопления

$$\eta = \frac{W_H}{P_g t_u} = \frac{4\beta_1}{(1 + \beta_1)^2} \frac{\tau_H}{t_u} (1 - e^{-\gamma})^2. \quad (2)$$

При выводе (1) и (2) считалось, что накопление энергии осуществляется в резонаторе, изолированном от нагрузки, т.е. при  $h = 0$ .

Для описания процесса вывода энергии запишем соотношения между волнами в резонансной системе с учетом их взаимного запаздывания, полагая, что в момент вывода связь  $h$  мгновенно увеличивается от нуля до некоторого значения  $h < 1$ , а генератор при этом отключается. Тогда, согласно методу матрицы рассеяния, для волн в системе имеем следующие равенства:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = S_1 \begin{pmatrix} 0 \\ a_2 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} = S_2 \begin{pmatrix} a_3 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где

$$S_1 = \begin{vmatrix} -\sqrt{1 - k^2}jk \\ jk - \sqrt{1 - k^2} \end{vmatrix}, \quad S_2 = \begin{vmatrix} -\sqrt{1 - h^2}jh \\ jh - \sqrt{1 - h^2} \end{vmatrix},$$

$$j = \sqrt{-1}, \quad a_2(t) = b_3(t - T/2)e^{-\alpha/2}, \quad a_3(t) = b_2(t - T/2)e^{-\alpha/2}.$$

Далее, используя стандартные процедуры, которые описаны, например, в [6], нетрудно получить следующее приближенное дифференцированное уравнение, характеризующее процесс затухания волны в резонаторе при выводе энергии:

$$\frac{db_2}{dt} + \frac{b_2}{2\tau_b} \simeq 0, \quad (4)$$

где

$$\tau_b = \frac{T(1 + \sqrt{1 - k^2}\sqrt{1 - h^2}e^{-\alpha})}{4(1 - \sqrt{1 - k^2}\sqrt{1 - h^2}e^{-\alpha})}.$$

При этом, согласно (3), на выходе резонатора генерируется сигнал с огибающей, описываемой выражением

$$b_4(t) = jhb_2(t), \quad (5)$$

где  $b_2(t) = b_{20}e^{-t/2\tau_b}$  — решение уравнения (4),

$$b_{20} = \frac{jka_1}{1 - \sqrt{1 - k^2}e^{-\alpha}}(1 - e^{-\gamma})$$

— амплитуда бегущей волны резонатора после завершения процесса накопления.

Поэтому энергия, передаваемая в нагрузку, будет определяться соотношением

$$W_n = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} |b_4(t)|^2 dt = \frac{k^2 h^2 P_g \tau_b}{(1 - \sqrt{1 - k^2} e^{-\alpha})^2} (1 - e^{-\gamma})^2 = P_u \tau_b, \quad (6)$$

где  $P_u$  и  $\tau_b$  — соответственно пиковая мощность и постоянная затухания сформированного импульса.

Из (6) для эффективности передачи энергии  $\kappa$  находим

$$\kappa = \frac{W_n}{P_g t_u} = \eta \frac{\tau_b}{\tau_H} \beta_2, \quad (7)$$

где  $\beta_2 = h^2/2\alpha$  — коэффициент выходной связи.

При этом, так как  $\beta_2 = (\tau_H/\tau_b) - \beta_1 - 1$ , то (7) можно преобразовать к виду

$$\kappa = \eta \left[ 1 - \frac{\tau_b}{\tau_H} (1 + \beta_1) \right] \simeq \eta \left( 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right). \quad (8)$$

В (8)  $Q_1$  и  $Q_2$  — нагруженная добротность резонатора в режиме накопления и вывода соответственно,  $Q_1 = \omega \tau_H / (1 + \beta_1) = Q_0 / (1 + \beta_1)$ ,  $Q_2 = \omega \tau_b = Q_0 / (1 + \beta_1 + \beta_2)$ ,  $\omega = 2\pi f$  — циклическая рабочая частота.

Как следует из (8), эффективность передачи энергии в СВЧ компрессоре с “проходным” резонатором определяется эффективностью накопления и отношением добротностей резонатора в режиме накопления и вывода. Так, для одномодовых накопительных резонаторов с  $\tau_b \simeq T$  и  $Q_2 \ll Q_1$  имеем  $\kappa \lesssim \eta$ . В случае же формирования относительно длинных радиоимпульсов ( $T \ll \tau_b \ll t_u$ ), когда для накопления энергии используются сверхразмерные резонаторы и  $Q_2 \sim 0.1 Q_1$ , эффективность передачи всегда строго меньше эффективности накопления. Особенно существенное отличие  $\kappa$  от  $\eta$  может наблюдаться при возбуждении резонатора относительно короткими сигналами ( $t_u < \tau_H$ ) и формировании достаточно длинных радиоимпульсов ( $\tau_b \lesssim 0.1 t_u$ ), когда для достижения высокой эффективности накопления используется сильная связь по входу резонатора, в силу чего добротность  $Q_1$  принимает достаточно низкие значения, тогда как добротность  $Q_2$  имеет значения относительно высокие.

Максимум эффективности передачи энергии в нагрузку, согласно (8), определяется из требования

$$\frac{d\kappa}{d\beta_1} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{1}{\eta} \frac{d\eta}{d\beta_1} = \frac{\tau_b}{\tau_H - \tau_b(1 + \beta_1)} = \frac{Q_1 Q_2}{Q_0(Q_1 - Q_2)}. \quad (9)$$

Из (9) видно, что в СВЧ компрессоре с “проходным” резонатором максимум эффективности передачи энергии не совпадает с максимумом эффективности накопления. При фиксированной длительности сигнала с генератора, как нетрудно установить,  $\eta$  и  $\kappa$  достигает максимума при значениях  $\beta_1$ , значительно различающихся для малых величин  $t_u$  ( $t_u < \tau_H$ ) и больших  $\tau_b$  ( $\tau_b \sim 10^2 T$ ), тогда как для больших

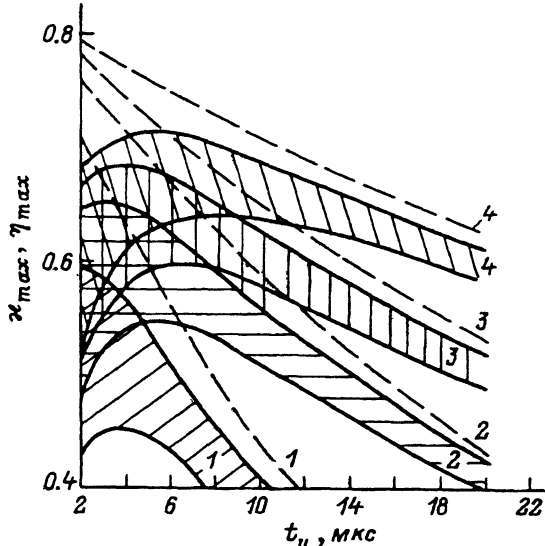


Рис. 2. Зависимости эффективности передачи ( $\kappa_{\max}$ ) и эффективности накопления ( $\eta_{\max}$ ) от длительности сжимаемого сигнала при различной добротности резонатора и длительности выходного сигнала компрессора.

$t_u$  ( $t_u > \tau_H$ ) и малых  $\tau_b$  ( $\tau_b \lesssim 10T$ ) различие между оптимальными значениями  $\beta_1$  становится несущественным. Очевидной причиной такого различия в поведении  $\eta$  и  $\kappa$  от  $\beta_1$  является переизлучение накопленной энергии в сторону генератора при выводе.

На рис. 2 сплошными линиями приведены зависимости  $\kappa_{\max}$  от длительности сжимаемого сигнала  $t_u$  при различных значениях добротности резонатора и длительности формируемых радиоимпульсов. На этом же рисунке штриховыми линиями представлены зависимости максимальной эффективности накопления  $\eta_{\max}$  от  $t_u$ . Штриховая кривая и заштрихованная область, обозначенные цифрой 1, соответствуют добротности резонатора  $Q_0 = 10^5$ , 2 — добротности  $Q_0 = 2 \cdot 10^5$ , 3 —  $3 \cdot 10^5$ , 4 —  $5 \cdot 10^5$ . Верхняя граница каждой из заштрихованных областей соответствует формированию импульсов длительностью 80 нс, нижняя — 250 нс. Зависимости построены для резонатора десятисантиметрового диапазона. Однако в силу их инвариантности относительно переменных  $\tau_b/\tau_H$  и  $t_u/\tau_H$  они могут быть легко экстраполированы и на резонаторы других диапазонов.

Как видно из рис. 2, кривые зависимостей  $\kappa_{\max}(t_u)$  в отличие от зависимостей  $\eta_{\max}(t_u)$ , имеют четко выраженный максимум. Кроме того, из рисунка видно, что по мере уменьшения длительности сжимаемого импульса и увеличения длительности импульса на выходе эффективности передачи все более существенно “отстает” от эффективности накопления. И, наоборот, по мере увеличения длительности сжимаемого сигнала и укорочения выходного сигнала эффективность передачи асимптотически снизу приближается к эффективности накопления.

Заметим также, что при фиксированной длительности выходного сигнала  $\tau_b$  максимум эффективности передачи энергии соответствует максимуму коэффициента усиления компрессора  $M_k^2$ , который, соглас-

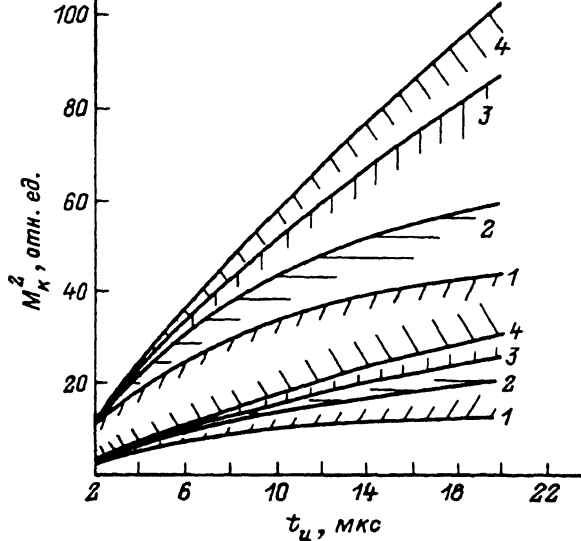


Рис. 3. Зависимости коэффициента усиления от длительности сжимаемого сигнала при различной добротности резонатора и длительности выходного сигнала.

но (5), определяется соотношением

$$M_k^2 = \frac{4\beta_1}{(1 + \beta_1)^2} (1 - e^{-\gamma})^2 \left( \frac{\tau_H}{\tau_b} - \beta_1 - 1 \right). \quad (10)$$

На рис. 3 приведены зависимости  $M_k^2$  от  $t_u$  для резонаторов с различной добротностью и при различной длительности выходных сигналов СВЧ компрессора. Заштрихованные и пронумерованные области на рисунке соответствуют тем же значениям добротности резонатора и длительности выходных сигналов, что и аналогичные области на рис. 2. Из рисунка следует, что использование для накопления энергии сверхразмерных резонаторов с высокой добротностью в дециметровом диапазоне может обеспечить коэффициент усиления  $\approx 10-20$  дБ при длительности формируемых импульсов 250–80 нс. При  $t_u \gg \tau_H$  коэффициент усиления асимптотически приближается к предельному значению

$$M_k^2 \approx \frac{\tau_H}{\tau_b} - 2 \approx \frac{Q_0}{Q_2} - 2.$$

### СВЧ компрессор с объединенным элементом ввода-вывода энергии

Типичная схема компрессора с объединенным элементом ввода-вывода приведена на рис. 4, где 1 — СВЧ генератор, 2 — фазовращатель, 3 — циркулятор (либо мост), 4 — элемент ввода-вывода энергии, 5 — резонатор, 6 — нагрузка компрессора. Конструкции подобных устройств описаны, например, в [7,8]. В [8] для повышения коэффициента усиления СВЧ компрессора одновременно с увеличением связи при выводе энергии предлагается осуществлять и инверсию фазы

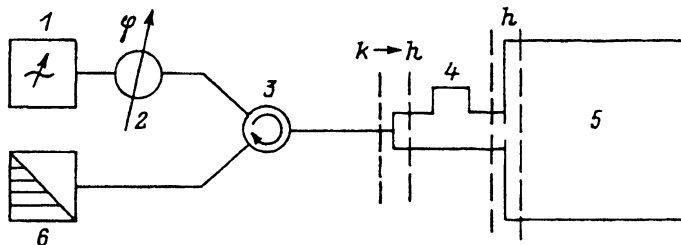


Рис. 4. Схема СВЧ компрессора с объединенным элементом ввода-вывода энергии.

питающей волны, как это реализуется в системе SLED [9]. Отличительной особенностью СВЧ компрессора с объединенным элементом ввода-вывода энергии является отсутствие потерь на излучение в сторону генератора при выводе энергии. Вместе с тем наряду с отмеченным достоинством подобные устройства имеют и существенный недостаток, который заключается в передаче в нагрузку отражаемой от резонатора СВЧ мощности в режиме накопления. Поэтому применение подобных устройств возможно только в том случае, когда наличие такой мощности до момента появления основного импульса допускается.

При анализе схемы будем считать, что накопление энергии идет до момента окончания сигнала с генератора через элемент ввода-вывода с величиной связи  $k$ , выбранной оптимальной, а затем величина связи мгновенно увеличивается до значения  $h \gg k$ . Нетрудно показать, что в этом случае эффективность передачи энергии в нагрузку и коэффициент усиления компрессора определяется выражениями

$$\kappa \simeq \eta(1 - Q_2/Q_0) \simeq \eta(1 - \tau_b/\tau_H), \quad (11)$$

$$M_k^2 = \frac{4\beta_1}{(1 + \beta_1)^2} (1 - e^{-\gamma})^2 \left( \frac{\tau_H}{\tau_b} - 1 \right). \quad (12)$$

Сравнение (8), (10) с (11), (12) показывает, что, как и следовало ожидать, эффективность передачи и коэффициент усиления в случае накопления и вывода энергии через объединенный элемент ввода-вывода выше, чем при накоплении и выводе через отдельные элементы ввода и вывода. Причем наиболее существенное превышение наблюдается при возбуждении резонатора относительно короткими импульсами ( $t_u \lesssim \tau_H$ ). По мере увеличения длительности сжимаемого импульса превышение уменьшается и при  $t_u \gtrsim 3-5\tau_H$  практически исчезает. Поэтому СВЧ компрессор с объединенным элементом ввода-вывода целесообразен при компрессии относительно коротких импульсов, когда за счет увеличения эффективности накопления и увеличения выходной связи для заданной длительности формируемого сигнала повышение эффективности передачи и коэффициента усиления может достигать 10-20%.

Учет энергии, отраженной от резонатора при накоплении, повышает эффективность передачи в СВЧ компрессоре с объединенным элементом ввода-вывода на 15-20%. Это нетрудно установить, если воспользоваться следующими формулами, вытекающими из (1)-(10),

$$\eta_0 = \frac{W_0}{P_g t_u} = \frac{(\beta_1 - 1)^2}{(\beta_1 + 1)^2} - \frac{8\beta_1(\beta_1 - 1)}{(\beta_1 + 1)^3} \frac{\tau_H}{\tau_u} (1 - e^{-\gamma}) + \frac{4\beta_1}{(1 + \beta)^3} \frac{\tau_H}{\tau_u} (1 - e^{-2\gamma}),$$

$$\eta_{p1} = \frac{W_{p1}}{P_g t_u} = \frac{4\beta_1}{(1 + \beta_1)^2} \left[ 1 - \frac{4\tau_H}{t_u(1 + \beta_1)}(1 - e^{-\gamma}) + \frac{\tau_H}{t_u(1 + \beta_1)}(1 - e^{-2\gamma}) \right],$$

$$\eta_{b1} = \frac{W_{b1}}{P_g t_u} = \frac{4\beta_1}{(1 + \beta_1)^2} \frac{\tau_b}{t_u} (1 - e^{-\gamma})^2 \beta_1,$$

$$\eta_{p2} = \frac{W_{p2}}{P_g t_u} = \frac{4\beta_1}{(1 + \beta_1)^2} \frac{\tau_b}{t_u} (1 - e^{-\gamma})^2, \quad (13)$$

где  $\eta_0$  — часть энергии, теряемая на отражение при накоплении;  $\eta_{p1}$  — на потери в стенках резонатора при накоплении;  $\eta_{b1}$  — на излучение в сторону генератора при выводе в схеме с “проходным” резонатором;  $\eta_{p2}$  — на потери в стенках резонатора при выводе.

Очевидны также следующие соотношения:

$$\eta_0 + \eta_{p1} + \eta = 1, \quad \eta = \eta_{b1} + \eta_{p2} + \kappa. \quad (14)$$

Увеличение в СВЧ компрессоре с объединенным элементом ввода-вывода связи резонатора с трактом от  $k$  до  $h$  с одновременной инверсией фазы питающей волны может существенно повысить коэффициент усиления СВЧ компрессора при незначительном по сравнению со схемой без инверсии фазы изменении эффективности передачи энергии в нагрузку. Можно показать, что максимальное значение коэффициента усиления такого СВЧ компрессора определяется выражением

$$M^2 = (M_k + 1)^2, \quad (15)$$

где  $M_k^2$  — коэффициент усиления без инверсии фазы.

Из (15) следует, что по сравнению со схемой без инверсии увеличение усиления может достигать значений, определяемых соотношением

$$N = 1 + \frac{2}{M_k} + \frac{1}{M_k^2}. \quad (16)$$

Так, при  $M_k^2 \simeq 10$  имеем  $N \simeq 1.75$ . При больших значениях увеличение будет менее существенным и, наоборот, при меньших оно может быть достаточно значительным. Это означает, что СВЧ компрессор с объединенным элементом ввода-вывода и инверсией фазы питающей волны целесообразен только при формировании относительно длинных радиоимпульсов ( $\tau_b \gtrsim 10^2 T$ ).

### Заключение

Таким образом, проведенный анализ процесса передачи СВЧ энергии в нагрузку при резонансной компрессии радиоимпульсов показал, что при компрессии относительно коротких сигналов ( $t_u \lesssim \tau_H$ ) в схеме с “проходным” резонатором необходимо выбирать оптимальные условия передачи энергии, отличающиеся от оптимальных условий ее накопления, либо, где допускается наличие мощного предимпульса, использовать схему с объединенным элементом ввода-вывода энергии. При сжатии достаточно длинных сигналов ( $t_u > \tau_H$ ) эффективность



перехода энергии в обеих исследованных схемах СВЧ компрессоров практически одинакова и совпадает с эффективностью накопления.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность Ю.Г.Юшкову за полезные замечания при обсуждении результатов работы.

Работа выполнена при поддержке Международного научного фонда (грант № RI98000).

### Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
  - [2] Минькин К.Г., Зайцев В.Е. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. 1980. № 12. С. 45-49.
  - [3] Бараев С.В., Коровин О.П., Минькин К.Г. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 2. С. 413-415.
  - [4] Бараев С.В., Коровин О.П. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 11. С. 2465-2467.
  - [5] Альтман Дж. Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968. 487 с.
  - [6] Артеменко С.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30. № 10. С. 1289-1292.
  - [7] Alvarez R.A., Birt D., Byrne D. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1981. Vol. 17. N 1. P. 935-938.
  - [8] Farkas Z.D. // IEEE Intern. Microwave Symp. Digest. 1980. Vol. MEE-S. P. 84.
  - [9] Farkas Z.D., Hogg H.A., Loew G.A., Wilson P.B. // IEEE Trans. on Nuclear Sci. 1975. Vol. NS-22. N 3. P. 1299-1301.
-