СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Жерлицын А.Г. Генерация электромагнитных колебаний в системах с виртуальным катодом // В сб.: Плазменная электроника / Под ред. В.И. Курилко. – Киев: Наукова думка, 1989. – С. 112–131.
2. Григорьев В.П. Электромагнитное излучение в коаксиальном триоде с виртуальным катодом // Журнал технической физики. – 1994. – Т. 64. – № 7. – С. 122–129.
3. Антошкин М.Ю., Григорьев В.П., Коваль Т.В. Численная модель для исследования возбуждения аксиально-несимметричных волн в коаксиальных виркаторах // Радиотехника и электроника. – 1995. – № 8. – С. 1300–1305.
4. Григорьев В.П., Коваль Т.В., Курьяков А.М. Усиление электромагнитных волн в коаксиальном триоде с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. – 1995. – № 9. – С. 1422–1427.
5. Langmuir I., Blodgett K.B. Currents limited by space charge between coaxial cylinders // Phys. Rev. – 1923. – V. 22. – P. 347–356.
6. Wheeler C.B. Space charge limited current flow between coaxial cylinders at potentials up to 15 MV // J. Phys. A: Math. Gen. – 1977. – V. 10. – № 4. – P. 631–636.
7. Рухадзе А.А., Рыбак П.В., Ходотаев Я.К., Шокри В. О предельных токах электронных пучков в коаксиальных системах // Физика плазмы. – 1996. – Т. 22. – № 4. – С. 358–366.
8. Григорьев В.П., Коваль Т.В. Теория генерации электромагнитных колебаний в системах с виртуальным катодом // Известия вузов. Физика. – 1998. – № 4. – С. 169–182.

Поступила 02.04.2009 г.

УДК 621.372.81

КОАКСИАЛЬНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ В КОМПРЕССОРАХ СВЧ ИМПУЛЬСОВ

С.Н. Артеменко, С.А. Новиков, Ю.Г. Юшков

Томский политехнический университет
E-mail: novsa@elti.tpu.ru

Проведен анализ работы коаксиальных СВЧ компрессоров, принцип действия которых основан на резонансном усилении электромагнитного поля с последующим быстрым выводом энергии в виде мощных наносекундных СВЧ импульсов. Переключение компрессора из режима накопления в режим вывода энергии осуществляется с помощью СВЧ разряда, зажигаемого в емкостном зазоре в центральном проводнике коаксиального резонатора. Экспериментально показано, что в метровом и 30-см диапазонах длин волн такие компрессоры позволяют получать радиоимпульсы с длительностью до 2...3 периодов высокочастотного поля. Приведены результаты исследования работы компрессоров с максимальной частотой следования импульсов. При продуве газа в разрядном промежутке компрессор мог работать с частотой следования до 20 кГц.

Ключевые слова:
Излучение, СВЧ, коаксиальный резонатор, компрессор, импульс, усиление, мощность, энергия, разряд.

Мощность излучения СВЧ источников можно увеличить за счет уменьшения длительности выходных импульсов при временной резонансной компрессии, принцип действия которой основан на накоплении высокочастотной энергии в волноводных резонаторах с последующим быстрым выводом энергии в виде СВЧ импульсов наносекундной длительности [1]. При подключении отдельных систем компрессии, изготовленных из стандартных прямоугольных, круглых или коаксиальных волноводов, к выходу промышленных магнетронов 3-х, 10-ти и 30-см диапазонов длин волн было получено усиление мощности в 50, 100 и 150 раз соответственно. Наибольшее усиление и наиболее короткие импульсы длительностью, равной нескольким периодам высокочастотного поля, были получены при использовании коаксиальных резонансных систем. Это связано с тем, что в отличие от полых волноводов коаксиальные линии более широкополосные и позволяют пропускать СВЧ импульсы без искажения во время их формирования и вывода из компрессора. В данной статье приведены анализ работы и конструкция коаксиального СВЧ компрессора, а также результаты экспериментов, связанных с получением наиболее коротких сверхширокополосных импульсов и повышением частоты следования импульсов до 20 кГц.

Для накопления энергии в коаксиальном СВЧ компрессоре было предложено использовать резонатор, выполненный в виде Т-образного тройника с двумя закороченными плечами, рис. 1. Во время накопления энергия не излучается через боковое плечо – 3, т. к. его вход находится в минимуме стоячей волны, образующейся вдоль резонатора, включающего в себя плечи тройника – 1 и 2. Вывод энергии осуществляется за счет изменения фазы отраженной волны от одного из концов резонатора. Для этого в одно из короткозамкнутых плеч резонатора включалась емкость, выполненная в виде зазора – 4 в центральном проводнике коаксиальной линии. При расчете электрической длины плеча – 2 учитывалась инверсия фазы, создаваемая этой емкостью.

При зажигании СВЧ разряда в емкостном зазоре между торцевыми поверхностями центрального проводника происходит быстрое шунтирование емкости, и набег фазы волны в плече – 2 становится равным $2\pi l/\lambda$, где λ – длина волны. Это приводит к изменению интерференционной картины поля в резонаторе, один из максимумов стоячей волны устанавливается против плеча – 2, что создает сильную связь резонатора с выходом и обеспечивает условия, необходимые для быстрого вывода накопленной энергии.

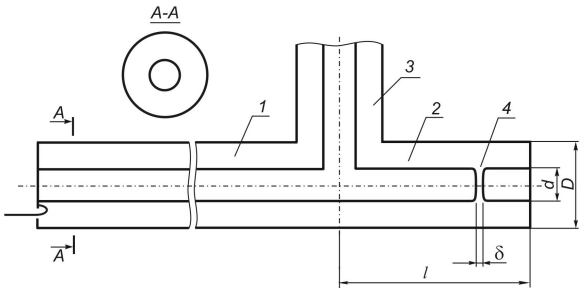

Рис. 1. *Коаксиальный резонатор СВЧ компрессора: 1, 2) накопительный объем резонатора; 3) боковое плечо тройника для вывода накопленной энергии; 4) емкостной зазор для создания переключающего СВЧ разряда. δ – длина емкостного зазора; d, D – диаметры проводников коаксиальной линии, l – длина плеча 2*

Обычно в резонансных объемах, в которых создаются большие напряженности высокочастотных полей, элементы конструкций стараются делать без острых углов, т. к. на них может возникнуть высокочастотный разряд. Поэтому кромки торцов в зазоре центрального проводника коаксиальной линии скругляют. Это приводит к более однородному распределению напряженности электрического поля по поверхности и повышению электрической прочности. Однако такое скругление приводит к изменению емкости зазора. В этом случае требующийся зазор δ определялся при численном решении уравнения Лапласа $\nabla^2\varphi=0$ в цилиндрической системе координат. В резонансных СВЧ компрессорах при больших значениях выходной мощности напряженность высокочастотного поля в емкостном зазоре может превышать предел электрической прочности (~250 кВ/см) газа, заполняющего под давлением накопительный объем резонатора. Для повышения электрической прочности можно увеличить длину зазора, но тогда необходимо расширить площадь торцевых поверхностей в зазоре для того, чтобы значение емкости осталось прежним. В 30-см диапазоне длина зазора $\delta\cong1$ см достаточна для работы с напряженностью электрического высокочастотного поля ≅150 кВ/см. При такой напряженности можно получать выходные СВЧ импульсы мощностью до нескольких десятков МВт.

Расчетные зависимости величины зазора от длины волны для $l=\lambda/4$ и $l=\lambda/8$ представлены на рис. 2. Кривые построены с учетом известного выражения для нормированного реактивного сопротивления X емкостного зазора [2]:

$$|X| = Z_0\left[\frac{2d}{\lambda}\left(\frac{\pi}{8}\frac{d}{\delta}+\ln\frac{D-d}{2\delta}\right)\ln\frac{D}{d}\right]^{-1}, \qquad (1)$$

где Z_0 – волновое сопротивление коаксиальной линии.

Графики, рис. 2, позволяют определить размеры емкостного зазора переключающего разрядника в зависимости от рабочей длины волны СВЧ компрессора. Так, в 30-см диапазоне по кривой 2 для $\lambda/8\cong4$ мм можно определить длину $\delta\cong6$ мм.

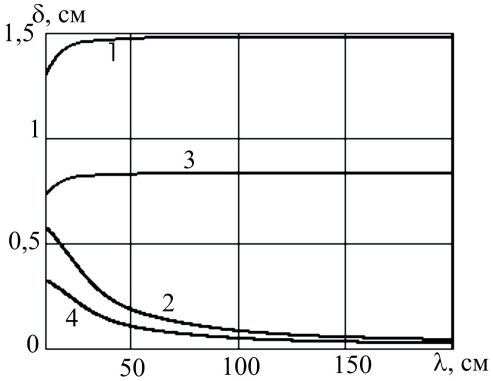

Рис. 2. *Зависимости величины зазора в центральном проводнике коаксиальной линии от длины волны для: 1, 3) $\lambda/4$; 2,4) $\lambda/8$; 1, 2) для плоских поверхностей зазора центрального проводника; 3, 4) края торцевых поверхностей зазора имеют скругление с радиусом $r_\phi=d/4$*

Для рассмотрения процессов возбуждения резонатора и вывода из него энергии используем эквивалентную схему коаксиального резонатора, рис. 3, где $a_1...a_8$ и $b_1...b_8$ – амплитуды падающих и отраженных волн; y_0 – приведенная проводимость емкостного зазора; y_1 – дополнительная проводимость, изменяющая параметры емкостного зазора при коммутации. Стрелки указывают направление распространения волн. Штриховые линии – положение минимума стоячей волны при резонансе.

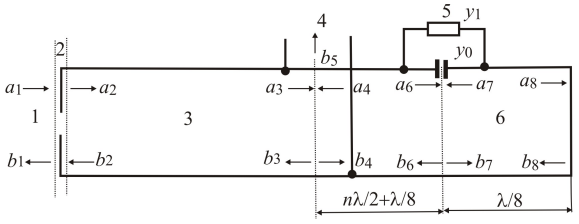

Рис. 3. *Эквивалентная схема: 1) входная линия; 2) элемент связи резонатора; 3) резонатор; 4) выход резонатора; 5) емкостной зазор*

Во время возбуждения резонатора амплитуды волн можно определить с помощью следующих матриц рассеяния:

$$\begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\Theta & jk_c \\ k_c & -\Theta \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{vmatrix} = 1/3 \begin{vmatrix} -1 & 2 & 2 \\ 2 & -1 & 2 \\ 2 & 2 & -1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{vmatrix}. \qquad (2)$$

Здесь $a_3=b_2e^{-\alpha_T}$; $a_2=b_3e^{-\alpha_T}$; $a_5=0$; $\Theta=\sqrt{1-k_c^2}$; α_T – постоянная затухания электромагнитной волны после двойного прохождения вдоль резонатора; k_c – коэф-

фициент связи, определяемый параметрами элемента возбуждения резонатора; j – мнимая единица.

Матрица рассеяния для емкостного зазора имеет следующий вид [2, 3]:

$$\begin{vmatrix} b_6 \\ b_7 \end{vmatrix} = \frac{1}{1+2y} \begin{vmatrix} 1 & 2y \\ 2y & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} a_6 \\ a_7 \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где $y=y_0+y_1$. Используя (2, 3) с учетом фазовых соотношений для соответствующих волн, получим:

$$b_5 = \frac{4y_1}{4y_1+1} a_3. \quad (4)$$

Когда коммутирующий элемент включен в линию параллельно, что характерно для компрессоров с полыми волноводными резонаторами, то выражение преобразуется к виду:

$$b_5 = \frac{y_1}{y_1+1} a_3. \quad (5)$$

Сравнение зависимостей $b_5/a_3=F(y_1)$ для выражений (4, 5) показывает, что для коаксиального и волноводного резонаторов при $y_1 \to \infty$ происходит полное переключение. При одинаковом характере изменения y_1 коммутация в коаксиальных структурах происходит быстрее. Поэтому в коаксиальных компрессорах технически проще формировать выходные СВЧ импульсы с более крутыми фронтами и меньшими длительностями.

Если длительность выходных СВЧ импульсов выражать относительно периода высокочастотных колебаний, то с уменьшением радиочастоты можно получать импульсы с меньшей относительной длительностью. Поэтому эксперименты по формированию наиболее коротких сверхширокополосных импульсов были проведены в метровом диапазоне, когда несущая частота равнялась $1{,}5 \cdot 10^8$ Гц. В этом случае осуществлялось сжатие импульсов, имеющих мощность 10 кВт и длительность 4 мкс. На выходе компрессора были получены импульсы мощностью 1,6 МВт при длительности ~13 нс, что соответствует двум периодам высокочастотных колебаний. Затем аналогичные исследования были проведены в 30-см диапазоне. Внешний вид конструкции компрессора 30-см диапазона приведен на рис. 4. Этот компрессор позволил формировать импульсы длительностью 3 нс, что соответствовало трем периодам высокочастотного поля.

Коаксиальный компрессор был использован в экспериментах, связанных с определением максимальной частоты следования импульсов, при которой он еще способен работать. Частота следования импульсов является важным параметром, определяющим энергетический потенциал излучательных установок. Основная проблема в этом случае связана со временем восстановления разрядного промежутка между импульсами. Необходимо, чтобы к моменту начала компрессии следующего импульса коммутирующая плазма в разрядном емкостном зазоре полностью распадалась. Если к моменту формирования следующего импульса в зазоре останутся заряженные частицы, то это может привести к самопроизвольному зажиганию разряда без задержки, необходимой для полного завершения процесса накопления энергии во время формирования следующего импульса.

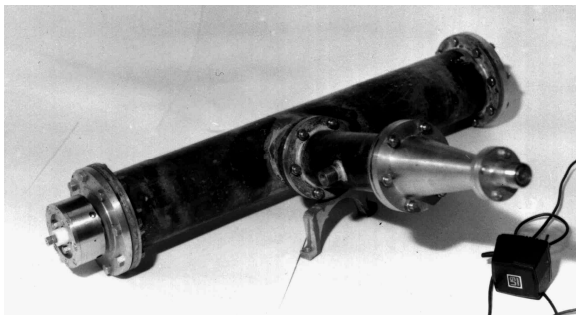

Рис. 4. *Компрессор 30-см диапазона длин волн*

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 5. В этой схеме использовался промышленный магнетрон, который в штатном режиме имеет непрерывный режим генерации с частотой 2,4 ГГц. Питание магнетрона осуществлялось от модулятора, в котором формировались высоковольтные импульсы напряжения с частотой следования больше 20 кГц. Эти импульсы подавались на магнетрон, обеспечивая импульсный режим генерации. От магнетрона по волноводному тракту на вход резонатора компрессора поступали СВЧ импульсы длительностью 2 мкс и мощностью 1 кВт. Между магнетроном и компрессором в волноводный тракт был включен ферритовый вентиль, необходимый для согласования режима генерации магнетрона с резонансной нагрузкой, которой является СВЧ компрессор.

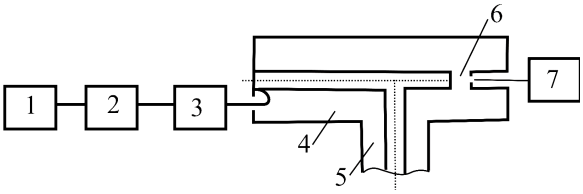

Рис. 5. *Блок-схема экспериментальной установки: 1) модулятор; 2) магнетрон; 3) ферритовый вентиль; 4) резонатор компрессора; 5) выход компрессора; 6) разрядный промежуток; 7) высоковольтный импульсный генератор*

Разрядный емкостной зазор компрессора имел длину 3 мм. В конце процесса возбуждения напряженность высокочастотного электрического поля в зазоре достигала 8 МВ/м. Для синхронизации момента зажигания коммутирующего разряда осуществлялась подсветка зазора ультрафиолетовым излучением. Для этого использовался дополнительный искровой разрядник, на который подавались импульсы напряжения, синхронизованные с модулятором.

Исследования показали, что при заполнении внутреннего объема накопительного резонатора воздухом при атмосферном давлении разрядный зазор полностью не восстанавливался при частотах

выше 3 кГц, что проявлялось в самопроизвольном зажигании разряда. Более высокие частоты следования, до 20 кГц, были получены при заполнении резонатора аргоном и продувке газа в зазоре со скоростью потока 0,15 л/с.

Коаксиальные накопительные резонаторы используются в резонансных СВЧ компрессорах, работающих в диапазоне ~0,1...2 ГГц. В низкочастотной области этого диапазона размеры таких резонаторов становятся слишком большими, а высокочастотной области – малыми, т. к. их размеры зависят от рабочей длины волны.

Для уменьшения продольных размеров компрессора, работающего на частоте 36,6 МГц, в [4] было предложено внутренний проводник коаксиала делать в виде спирали, как это делается в замедляющих волноводах. При обычном исполнении коаксиальный компрессор на этой частоте имел бы длину ~6 м, а спиральный внутренний проводник уменьшал его длину до 0,8 м.

При создании мощных коаксиальных компрессоров в высокочастотной области, приходится увеличивать поперечные размеры коаксиальной линии. Это повышает электрическую прочность системы компрессии и увеличивает накопительный объем. Однако большие поперечные размеры делают коаксиальную линию сверхразмерной, что приводит к понижению эффективности интерференционного запирания волн при накоплении энергии и создает технические проблемы при ее быстром выводе. В [5] предложен оригинальный интерференционный переключатель, выполненный на основе сверхразмерной линии, в которой внутренний проводник коаксиала имеет $d \geq \lambda$. Работа такого переключателя основана на интерференции осесимметричной волны, передаваемой по коаксиальной линии, с осесимметричной волной такого же типа, излучаемой из радиального зазора, созданного разрывом внутреннего проводника. Расчеты показывают, что применение этого переключателя для вывода накопленной энергии из сверхразмерного резонатора 10-см диапазона позволяет получать наносекундные СВЧ импульсы с гигаваттным уровнем мощности.

В настоящее время коаксиальные компрессоры нашли применение в установках, которые используются при изучении быстропротекающих процессов в различных средах, исследовании влияния мощных электромагнитных полей на биологические объекты и электронные системы. Они были использованы при определении критериальных уровней воздействия СВЧ импульсов на работу персонального компьютера [6]. Были получены зависимости пороговой плотности потока энергии излучения в различных частотных диапазонах, необходимой для сбоя программы тестирования ячеек памяти компьютера от длительности импульсов при различных частотах повторения. В этих исследованиях коаксиальные компрессоры использовались, когда облучение компьютера осуществлялось импульсами с несущей частотой ~1 ГГц.

Другое применение коаксиальные компрессоры получили при создании нелинейных радиолокаторов. В этих радиолокаторах используется эффект рассеяния нелинейными объектами электромагнитных волн с гармоническими составляющими, отсутствующими в зондирующем сигнале. В частности, при облучении объектов, содержащих полупроводниковые приборы, в отраженном сигнале будет переизлучаться вторая гармоника с большей амплитудой по сравнению с другими гармониками. Прием этой гармоники позволяет осуществлять локацию объектов с полупроводниками, даже в том случае, когда они закопаны на небольшую глубину в землю, находятся в снегу, скрыты листвой или травой. Наносекундная длительность зондирующих импульсов обеспечивает нелинейному радиолокатору высокое разрешение по дальности с точностью до размера, занимаемого СВЧ импульсом в пространстве.

На рис. 6 приведена фотография мобильного нелинейного радиолокатора, в котором используется коаксиальный компрессор с параметрами: рабочая длина волны – 37 см; мощность излучения – 20 МВт; длительность импульсов – 13 нс; частота следования – 800 Гц; коэффициент усиления по мощности – 20 дБ.

Рис. 6. *Нелинейный радиолокатор*

Радиолокатор был создан на основе штатного радиолокатора, в котором использовался магнетронный генератор, генерирующий импульсы СВЧ длительностью 3 мкс, мощностью 200 кВт и с частотой следования до 800 Гц. От этого магнетрона осуществляется возбуждение коаксиального резонатора компрессора. На фотографии видны две рупорные антенны, из которых верхняя использовалась для приема второй гармоники отраженного сигнала, а нижняя – для излучения зондирующего сигнала. Этот радиолокатор успешно использовался для обнаружения скрытых нелинейных объектов при натурных испытаниях.

Авторы выражают благодарность В.Л. Каминскому, П.Ю. Чумерину, В.А. Августиновичу и другим сотрудникам лаборатории 46 НИИ ЯФ за помощь при создании установок с компрессией импульсов и проведении на них исследований.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 08-08-00155а и грант № 09-08-99030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
2. Орлов С.И. Расчет и конструирование коаксиальных резонаторов. – М.: Советское Радио, 1970. – 253 с.
3. Альтман Дж. Устройства сверхвысоких частот. – М.: Мир, 1968. – 487 с.
4. Chumerin P.Yu., Slinko V.N., Hovaev A.Yu. Resonant Pulse Compression for Generating Ultra-Short High Power Pulses in HF Band // Известия вузов. Физика. – 2006. – № 11. Приложение. – С. 425–426.
5. Артеменко С.Н., Каминский В.Л., Юшков Ю.Г. Вывод энергии из крупногабаритных осесимметричных резонаторов через сверхразмерную коаксиальную линию // Журнал технической физики. – 1993. – Т. 63. – № 2. – С. 105–112.
6. Юшков Ю.Г., Чумерин П.Ю., Артеменко С.Н. и др. Экспериментальное исследование воздействия сверхвысокочастотных импульсов на работу персонального компьютера // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46. – № 8. – С. 1020–1024.

Поступила 13.03.2009 г.

УДК 621.375.4:621.372.01

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ СВЧ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА В РЕЖИМЕ УСИЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

В.М. Коротаев, В.И. Туев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: tvi@tv2.tomsk.ru

Предложен метод определения оптимального значения комплексной нагрузки полевого транзистора в режиме усиления мощности, в основе которого лежат экспериментально измеренные на СВЧ энергетические параметры и параметры постоянного тока. Отклонение расчетных значений нагрузки от паспортных не превышает 10 %.

Ключевые слова:
Оптимальная нагрузка, вольтамперные характеристики, СВЧ полевые транзисторы.

При проектировании усилителей мощности СВЧ на полевых транзисторах (ПТ) необходимо иметь значение нагрузки, оптимальной по критерию максимума отдаваемой мощности. Такую нагрузку необходимо обеспечить усилительному элементу, чтобы полностью использовать его энергетические ресурсы.

Набор параметров, которым сопровождают производители ПТ свои изделия, как правило, не содержат данных по нагрузке. Экспериментальное определение оптимальной по мощности нагрузки методом «*Load pull*» [1, 2] сопряжено с использованием сложных и дорогостоящих аппаратных и программных средств и может быть реализовано в специализированных лабораториях на фирмах-производителях полупроводниковых элементов. Предложенная в [3] методика опирается на нелинейные зависимости элементов эквивалентной схемы, определить которые также не менее трудоемко и сложно.

В [4] предложена методика определения оптимальной по мощности нагрузки расчетным способом, но она применима к ограниченному кругу ПТ, для которых допустимо считать активную составляющую выходного импеданса транзистора R_b бесконечно большой величиной. Широко используемые в настоящее время для усиления мощности СВЧ радиосигналов GaAs ПТ с затвором Шоттки (ПТШ) имеют конечное значение выходного сопротивления, которое зависит от мощности выходного сигнала. Расчет основан исключительно на использовании вольтамперных характеристик (ВАХ). Вследствие этого методика принципиально не позволяет учесть отклонение параметров транзисторов, полученных в результате прямых измерений на СВЧ, от прогнозируемых величин этих параметров, полученных на основе ВАХ. Расхождение расчетных и экспериментальных данных по модулю и по фазе коэффициента отражения, определяющего оптимальную нагрузку, делает методику [4] не приемлемой для расчета усилителей мощности с применением специализированных программ автоматизированного проектирования.

В статье предлагается более точный расчетно-экспериментальный метод определения оптимальной нагрузки ПТ в режиме усиления мощности. Метод основан на измерении предельных параметров ПТШ в условиях создаваемых экспериментально режимов. Значения параметров используются в предложенных расчетных соотношениях для определения оптимальной нагрузки.

Типовая схема усилительного каскада на полевом транзисторе *VT* приведена на рис. 1, *а*. Напряжение в цепь стока ПТ подается от источника постоянного напряжения E через дроссель L. Смещение затвор-исток обеспечивается через резистор R_1 от внешнего источника U_3. $Z_н$ – комплексное сопротивления нагрузки, $C_р$ – разделительные конденсаторы.