

09

©1992

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСЕКУНДНЫХ РАДИОИМПУЛЬСОВ В ЛАМПОВОМ СВЧ АВТОГЕНЕРАТОРЕ

С.Н.Артеменко, В.Л.Каминский, Ю.Г.Юшков

Показана возможность создания эффективного источника мощных наносекундных радиоимпульсов на основе лампового СВЧ автогенератора и формирователя радиоимпульсов путем объединения выходного колебательного контура автогенератора и накопительного резонатора формирователя. Получено выражение для определения коэффициента усиления ВЧ мощности источника. Выполнен анализ условий эффективной работы прибора.

1. В настоящее время достаточно интенсивно развивается способ формирования мощных СВЧ импульсов наносекундной длительности, основанный на накоплении и быстром выводе энергии электромагнитного поля из объемных резонаторов [1]. Одним из основных достоинств способа является относительная простота его реализации, обусловленная возможностью использования в качестве источников энергии промышленных СВЧ генераторов и возможностью изготовления накопительных резонаторов и других узлов конструкций формирователей, реализующих способ, из стандартных элементов волноводной техники. При этом уровень мощности СВЧ импульсов, получаемых с помощью таких формирователей, обычно на один-два порядка превышает мощность импульсов источника накачки и в диапазоне длин волн от 3 до 30 см составляет единицы — сотни мегаватт [2-4].

Вместе с тем из-за дополнительных потерь энергии при ее накоплении и выводе формирователи имеют несколько сниженный по сравнению с генераторами накачки коэффициент полезного действия. Кроме того, применение в таких устройствах внешнего накопительного резонатора и развязывающего элемента между резонатором и источником энергии приводит к увеличению массогабаритных характеристик приборов.

В то же время хорошо известно, что любой СВЧ генератор представляет собой накопительную колебательную систему, достаточно сильно связанную с нагрузкой, но в основе своей ничем не отличающуюся от накопительной системы формирователя. Поэтому представляется логичным совместить генератор накачки и формирователь в одном приборе, что может позволить создать более компактный и эффективный источник мощного СВЧ излучения, так как отпадает необходимость в развязывающем элементе и внешнем накопительном резонаторе, а КПД прибора будет определяться только электронным КПД и эффективностью вывода

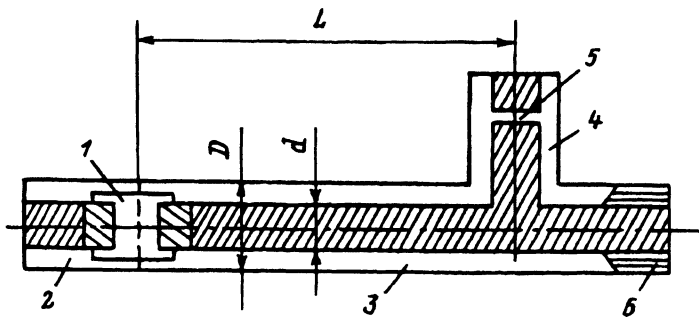


Рис. 1. Ламповый СВЧ автогенератор, совмещенный с формирователем наносекундных радиоимпульсов

энергии. Возможные отличия таких приборов от традиционных генераторов, связанные с более высокими значениями добротности их колебательных систем, будут, очевидно, касаться режимов питания приборов и некоторых конструктивных изменений, что не может служить серьезным препятствием для разработки таких источников.

В данной работе изложены результаты исследования прибора, созданного на основе наиболее просто реализуемого на практике лампового СВЧ автогенератора, совмещенного с формирователем наносекундных радиоимпульсов.

Исследования выполнены на коаксиальном СВЧ автогенераторе 30-сантиметрового диапазона длин волн, собранном с применением триода типа ГИ-6Б по схеме с общей сеткой и хорошо совмещаемом с коаксиальным формирователем, описанным в [5]. Схематично конструкция такого прибора показана на рис. 1, где 1 — СВЧ триод; 2 — катодно-сеточный резонатор; 3 — анодно-сеточный резонатор, играющий роль накопительного; 4 — элемент вывода энергии, выполненный в виде коаксиального тройника с закороченным боковым плечом и встроенным в него коммутатором 5, который осуществляет переключение прибора из режима накопления в режим вывода; 6 — выходная согласованная нагрузка.

2. В [1] показано, что максимальный коэффициент усиления M^2 формирователя по мощности определяется постоянной затухания α волны при двойном ее пробеге вдоль накопительного резонатора и дается выражением

$$M^2 = \frac{1}{2\alpha}. \quad (1)$$

Для резонансной же системы автогенератора, нагруженного на внешнюю нагрузку, выражение для коэффициента усиления M_1^2 нетрудно получить, используя известные соотношения для КПД выходного контура η_k , колебательной мощности P_k , генерируемой лампой, и мощности P_6 , бегущей волны резонатора

$$\eta_k = \frac{1}{1 + \frac{R_n}{R_{xx}}}, \quad (2)$$

$$P_k = P_p + P_n + P_{\Pi}, \quad (3)$$

$$P_6 = \frac{P_p}{2\alpha}, \quad (4)$$

где R_{xx} , R_n — соответственно эквивалентные сопротивления выходного контура на холостом ходу и при его нагружении на внешнюю нагрузку; P_p , P_n , P_n — мощности, рассеиваемые в выходном резонаторе, внешней нагрузке и катодно-сеточном резонаторе.

Учитывая, что обычно $P_n \ll P_p$, P_n , а также $\frac{R_{xx}}{R_n} = \frac{P_n}{P_p} = \beta$, где β — коэффициент связи анодно-сеточного резонатора с нагрузкой, выражения (2), (4) можно преобразовать к виду

$$\eta_k = \frac{\beta}{1 + \beta}, \quad (5)$$

$$P_6 = \frac{P_k}{2\alpha(1 + \beta)}. \quad (6)$$

Отсюда следует, что при типичных для СВЧ автогенераторов значениях $\eta_k = 0.5 - 0.8$ [6] коэффициент связи β изменяется в пределах от 1 до 4. При этом $P_6 = \frac{P_k}{2\alpha(2-\beta)}$, т.е. мощность бегущей волны в выходном резонаторе автогенератора в 2–5 раз меньше максимально возможной. Если же $\beta \rightarrow 0$, что имеет место в совмещенном приборе, то $P_6 \simeq \frac{P_k}{2\alpha}$ и коэффициент усиления такого прибора $\frac{M_1^2 = \frac{P_6 \simeq 1}{(2\alpha)}}{P_k}$, т.е. теоретически совпадает с коэффициентом усиления формирователя. Однако на практике, как известно, из-за потерь в элементах конструкции лампы и потерь в местах ее соединения с элементами выходного резонатора постоянная затухания α в колебательной системе автогенератора может существенно (в 2–3 раза) превышать постоянную затухания в резонаторе формирователя. Поэтому реальный коэффициент усиления совмещенного прибора будет ниже коэффициента усиления формирователя.

Это наглядно иллюстрирует рис. 2, где кривой 1 представлена зависимость M^2 для формирователя от приведенной длины $\frac{(2L)}{\lambda}$ (λ — длина волны) коаксиального накопительного резонатора при значениях диаметров проводников коаксиала D и d , выбранных под конкретную конструкцию автогенератора с СВЧ триодом типа ГИ=6Б ($D \simeq 4$ см, $d \simeq 2$ см). Заштрихованная часть рисунка изображает область возможных значений M_1^2 для совмещенного прибора с учетом разброса добротности его колебательной системы из-за наличия в ней отмеченных выше сосредоточенных потерь. При этом кривая 2 соответствует случаю равенства распределенных и сосредоточенных потерь при любой длине резонатора. Однако так как в действительности соотношение между этими потерями по мере увеличения длины резонатора меняется, то реальная кривая зависимости M_1^2 от $\frac{(2L)}{\lambda}$ для совмещенного прибора будет иметь левую ветвь, близкую к нижней границе полосы расчетных значений, и правую ветвь, близкую к верхней границе этих значений. Ход этой кривой, построенной в предположении, что распределенные и сосредоточенные потери при $2L \simeq \lambda$, показан кривой 3. Как видно, в этом случае при достаточно большой длине резонатора $L \geq (2 - \beta)\lambda$ коэффициент усиления совмещенного прибора может быть сравним с коэффициентом усиления формирователя и при длине резонатора порядка одного метра достигать 16–17 дБ.

3. Как известно, для обеспечения наиболее эффективной работы генератора лампу необходимо ставить в критический либо слегка перенапряженный режим. Кроме того, для получения максимального КПД

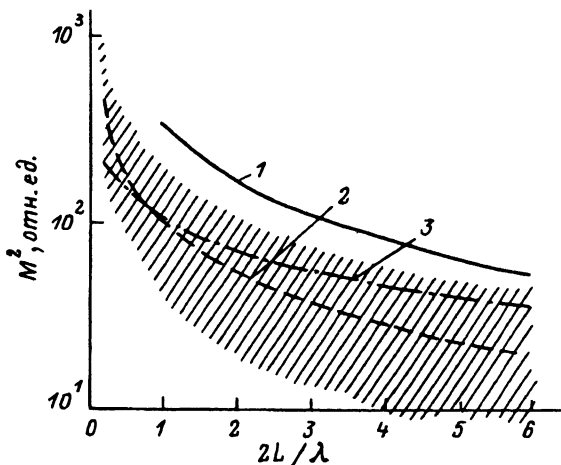


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления формирователя(1) и совмещенного прибора (2,3) от длины резонатора.

выходного контура в генераторах стремятся обеспечить режим полного использования лампы по току. При этом в традиционных схемах СВЧ генераторов выходной контур работает на основном тоне либо первом обертоном при значениях коэффициента связи с нагрузкой β , как показано выше, в пределах от 1 до 4.

В совмещенном приборе $\beta = 0$. Поэтому из-за роста при этом добротности выходного контура в 2–5 раз лампа может попасть либо в область резко перенапряженного режима, либо работать в критическом режиме, но при неполном использовании по току. Оба эти режима будут приводить к снижению рабочих характеристик прибора.

Вместе с тем и в таком приборе имеется возможность работать в критическом режиме и при полном использовании лампы по току, если применять выходной контур, возбуждаемый на более высоких обертонах. Это непосредственно следует из рис. 3, где приведены построенные в предположении равенства сосредоточенных и распределенных потерь зависимости эквивалентного сопротивления контура R_e от коэффициента связи β для генератора, работающего на основном тоне либо первом обертоном ($n = 0, 1$) (кривые 1, 2), а также зависимости R_e от номера обертона n для совмещенного прибора ($\beta = 0$) (кривая 3). Как видно из рисунка, характер этих зависимостей практически одинаков и для любого $R_e(n)$ можно найти соответствующее ему значение $R_e(\beta)$ из интервала β от 1 до 4. Другими словами, увеличив до определенного значения длину резонатора совмещенного прибора, можно добиться работы лампы в оптимальном для нее режиме.

Используя методику расчета, изложенную в [6], нетрудно, например, показать, что для обеспечения критического режима работы лампы ГИ-6Б с напряжением питания анода $E_a = 9$ кВ, колебательной мощностью $P_k = 12$ кВт, крутизной линии граничных режимов $S_{гр} = 8 \cdot 10^{-3} A/V$ и при значении угла отсечки анодного тока $\theta = 90^\circ$ необходимо, чтобы эквивалентное сопротивление R_e выходного контура прибора составляло ~ 3.25 кОм. Как видно из рис. 3, для обеспечения такого сопротивления в совмещенном приборе необходимо брать контур, возбуждаемый на

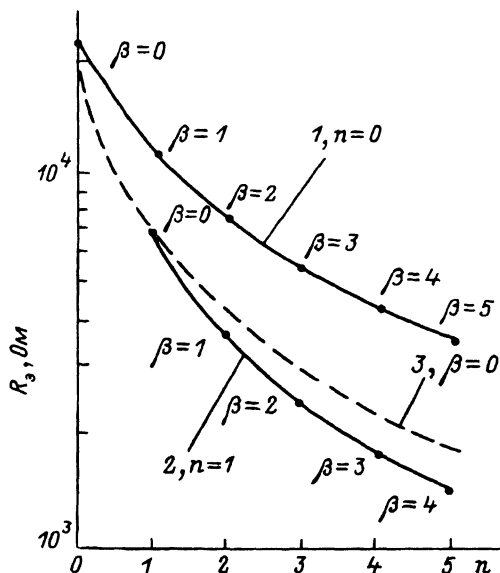


Рис. 3. Зависимость эквивалентного сопротивления колебательного контура, работающего на основном тоне или первом обертоном, от коэффициента связи β (1,2) и от номера обертона n при коэффициенте связи $\beta = 0$ (3).

третьем обертоном, а в традиционном генераторе — контур, работающий либо на первом обертоном при $\beta \approx 1.5$, либо на основном тоне при $\beta \approx 5 \div 6$.

4. Применение в совмещенном приборе многомодовой колебательной системы в принципе может вызвать одновременную генерацию колебаний на нескольких частотах. Покажем, что, однако, из-за использования в таком приборе выходного резонатора с волноводным тройником устройство будет работать только на одной рабочей частоте, соответствующей частоте, на которую настроен тройник формирователя.

Действительно, для работы автогенератора на заданной частоте необходимо выполнение неравенства [7]

$$C_{\text{ак}} > \frac{1}{\Pi f R_{\text{э}}}, \quad (7)$$

где $C_{\text{ак}}$ — анод-катодная емкость, $R_{\text{э}}$ — эквивалентное сопротивление выходного контура.

Для лампы ГИ-6Б $C_{\text{ак}} \approx 2.5 \cdot 10^{-13}$ Ф. Тогда, например, при $f = 9 \cdot 10^8$ Гц и $R_{\text{э}} \approx 2$ кОм, соответствующих, согласно рис. 3, возбуждению анодно-сеточного контура на пятом обертоном, имеем $C_{\text{ак}} > 1.5 \cdot 10^{-13}$ Ф, т.е. неравенство (7) выполняется, следовательно, на этой частоте автогенерация колебаний будет обеспечена. Для соседних же обертонов, используя метод матрицы рассеяния [8], можно показать, что соответствующие им эквивалентные сопротивления выходного контура из-за появления дополнительных потерь энергии на излучение через тройник будут уменьшаться согласно закону

$$R_{\text{э}} = \frac{R_{\text{э}0}}{1 + \varphi^2 / 4(\gamma + \delta/2)^2}, \quad (8)$$

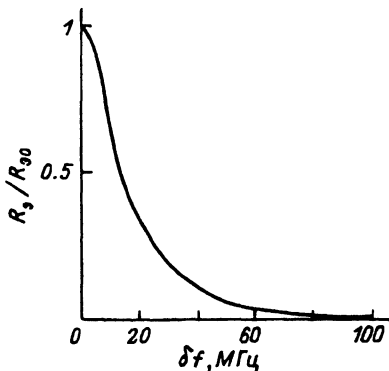


Рис. 4. Зависимость эквивалентного сопротивления колебательного контура совмещенного прибора от величины расстройки частоты контура относительно рабочей частоты тройника.

где R_{00} — эквивалентное сопротивление контура на рабочем обертоном, φ — дополнительный набег фазы волны в боковом плече тройника из-за отличия частоты соседних обертонов от рабочей частоты тройника; γ, δ — постоянные затухания волн при двойном пробеге накопительного и бокового плеч тройника соответственно.

При этом, если учесть, что в качестве коммутатора в боковом плече используется укорачивающая емкость C_0 коаксиала, то для φ нетрудно получить следующее соотношение:

$$\varphi = 4\pi \frac{\delta l}{\lambda} = 4\pi \frac{\delta f}{f} \frac{\left(l + \frac{czC_0}{1+4\pi^2 f^2 z^2 C_0^2} \right)}{\lambda}, \quad (9)$$

где λ — длина волны, δl — изменение резонансной длины l бокового плеча при изменении частоты генератора относительно рабочей частоты тройника на величину δf , z — волновое сопротивление коаксиала, c — скорость света.

На основе выражений (8), (9) на рис. 4 построена кривая зависимости эквивалентного сопротивления контура от величины расстройки частоты контура относительно рабочей частоты тройника для коаксиальной линии с $z = 35.8$ Ом, $l = 4.2 \cdot 10^{-2}$ м, $f = 9 \cdot 10^8$ Гц, $C_0 = 5 \cdot 10^{-13}$ Ф, $\delta \ll \gamma$, $\gamma \approx 1.4 \cdot 10^{-2}$. Как видно из рисунка, уже при отклонении частоты контура от частоты тройника на 40–50 МГц эквивалентное сопротивление падает на порядок и условие автогенерации (7) нарушается. В резонаторах же, работающих на 3–5 обертонах, как нетрудно показать, плотность спектра существенно (в 4–5 раз) ниже. Поэтому возбуждение в совмещенном приборе других колебаний, кроме рабочего, невозможно.

5. Экспериментальная проверка получения мощных наносекундных СВЧ импульсов была проведена на ламповом автогенераторе двусторонней конструкции, как показано на рис. 1. Такое исполнение получается наиболее простым при заземленном по постоянному току аноде и наличию увеличенной емкости анод — катод, обеспечивающей необходимую величину обратной связи без дополнительных элементов. Диаметры анодного и сеточного цилиндров соответственно равнялись 2.2 и 4 см, а длина выходного резонатора от анода лампы до оси бокового плеча тройника составляла 88.3 см, что для генерируемой частоты $9 \cdot 10^8$ Гц соответствовало работе генератора на пятом обертоном. Катодно-сеточный

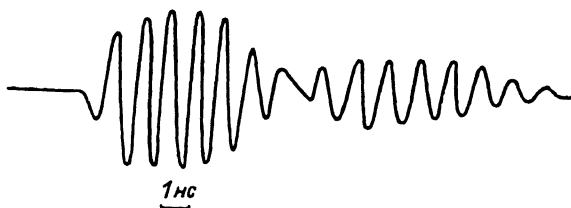


Рис. 5. Осциллограмма сформированного наносекундного импульса.

колебательный контур представлял собой укороченный четвертьволновый резонатор. Анодная модуляция автогенератора осуществлялась подачей на катод импульсов напряжения амплитудой до 5 кВ и длительностью 5 мкс.

Настройка генератора выполнялась изменением емкостного зазора коммутатора тройника. При настройке зазора на максимальную выходную мощность в режиме генерирования микросекундных импульсов выходная мощность составляла около 250 Вт при анодном напряжении и токе соответственно 5 кВ и 2 А. В случае настройки зазора на максимальное запирающее тройника при тех же параметрах анодного питания и достижении на зазоре коммутатора напряжения пробоя на выходе прибора формировались радиоимпульсы мощностью до 50 кВт с длительностью 5 нс по уровню 0.5 и длительностью переднего фронта около одного периода колебаний. Типичная форма импульса приведена на рис 5. Измерения параметров импульсов проводились с помощью осциллографа С9=4 и набора калиброванных аттенуаторов. При работе прибора генератор устойчиво возбуждался на одной рабочей частоте. Однако замена тройника короткой приводила к возбуждению автогенератора по крайней мере на двух частотах соседних обертонов, что согласуется с выводами раздела 4.

Анализ результатов экспериментов по формированию наносекундных радиоимпульсов в совмещенном приборе показывает, что при максимальной запирающей накопительного резонатора лампа работала в режиме, близком к критическому, и прибор обеспечивал усиление не менее 9–10 дБ. Если считать, что эффективность вывода энергии составляла обычное для формирователей при применении в них газоразрядных коммутаторов значение ~ 0.5 , то КПД прибора в целом оценивается как величина $\sim 0.3-0.35$. Кроме того, если учесть, что добротность накопительного резонатора при работе лампы в номинальном режиме была в 1.5 раз меньше, чем при отключенной лампе, и составляла около 1500, то можно утверждать, что для исследованного варианта прибора полученное значение коэффициента усиления достаточно близко к его теоретическому пределу. Снижение мощности излучения до 250 Вт при настройке зазора переключателя на максимум мощности объясняется падением при этом эквивалентного сопротивления контура и переходом лампы в область недонапряженного режима работы.

Отметим также, что поскольку лампа ГИ=6Б допускает работу при анодном напряжении до 9 кВ, то при пропорциональном увеличении анодного тока либо при сохранении величины тока, но одновременном переходе к более высокоомному обертону (второму или третьему) совмещенный прибор может обеспечить получение наносекундных радиоимпульсов с мощностью 100–120 кВт, если для увеличения электрической прочности

Таблица. Энергетические параметры источников

Тип источника	Импульсная мощность, кВт		Длительность импульса, нс (расчет, эксперимент)	КПД	
	расчет	эксперимент		расчет	эксперимент
Совмещенный прибор	130	50	5	0.4	0.3–0.35
Формирователь	150	75	5	0.15–0.2	0.1

переключателя использовать заполнение его разрядного промежутка газом под давлением.

Расчеты показывают, что аналогичный уровень импульсной мощности может быть достигнут и в коаксиальном формирователе при его питании от автогенератора на основе этой же лампы. Однако КПД такого источника излучения не будет превышать 0.15 и конструкция формирователя по сравнению с совмещенным прибором будет иметь худшие массогабаритные характеристики. В то же время достижение в совмещенном приборе коэффициента усиления, близкого к коэффициенту усиления формирователя, возможно только при существенном снижении потерь в лампе.

Ниже в таблице для сравнения приведены расчетные и полученные экспериментально энергетические параметры исследованного источника, а также параметры формирователя радиоимпульсов, питающегося от автогенератора на основе той же лампы, что использована и в совмещенном приборе.

Таким образом, проведенные исследования обосновали и подтвердили возможность создания эффективного источника мощного СВЧ излучения путем объединения колебательной системы СВЧ генератора с накопительным резонатором формирователя наносекундных радиоимпульсов. Как и формирователи, такие источники могут найти применение, например, в сверхширокополосной радиолокации для повышения дальности действия станций.

Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- [2] Августиневич В.А., Новиков С.А., Разин С.В., Юшков Ю.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28. № 10. С. 1347–1348.
- [3] Девятков Н.Д., Диденко А.Н., Замятина Л.Я. и др. // РиЭ. 1980. Т. 25. № 6. С. 1227–1230.
- [4] Альварес Р., Биркс Д., Берн Д. и др. // Атомная техника за рубежом. 1982. № 11. С.36–39.
- [5] Новиков С.А., Разин С.В., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. // А.С. СССР. № 1487776 А1.БИ.Н.03.КЗ/53, НО1Р1/24. 1987.

- [6] *Нейман М.С.* Курс радиопередающих устройств. М.: Сов. радио, 1965. 593 с.
[7] *Ионов Ю.А.* Ламповые генераторы сверхвысокой частоты. Л., 1973. 115 с.
[8] *Альтман Дж.* Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968. 487 с.

Научно-исследовательский
институт ядерной физики
при
Томском политехническом
институте им.С.М.Кирова

Поступило в Редакцию
6 августа 1991 г.
В окончательной редакции
20 ноября 1991 г.