

*В.Г. КРЫЖАНОВСКИЙ, д-р техн. наук, Ю.Г. ОХРИМЕНКО,  
Д.В. ЧЕРНОВ, канд. техн. наук*

## АНАЛИЗ ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ КОЛЬЦЕВОГО АВТОГЕНЕРАТОРА КЛАССА E

### Введение

Автогенераторы класса E привлекают внимание разработчиков радиоаппаратуры как простой высокоэффективный источник СВЧ и СВЧ колебаний [1]. Использование режима класса E позволяет получить высокий КПД при сохранении достоинств транзисторных автогенераторов. Такие устройства разрабатываются на мощности от милливатт до сотен ватт, выполняются на дискретных компонентах и в виде интегральных схем и используются там, где критично требование высокого КПД, например, в мобильных или биомедицинских применениях, в промышленной электронике [2 – 5]. Наряду с использованием отдельных генераторов существует потребность в суммировании их мощности или в создании массивов генераторов с определенными фазовыми соотношениями между их выходными сигналами [6, 7].

Кольцевые автогенераторы класса E построены по схеме последовательно включенных узлов, и имеют цепь обратной связи, охватывающую все узлы схемы [8, 9]. Этим данная схема отличается от схем с внешней и взаимной синхронизацией [6]. Такие схемы, содержащие несколько активных нелинейных устройств с обратными связями, демонстрируют нестабильность работы и способны генерировать сигналы со сложным спектральным составом [7].

Цель работы – изучение характеристик устройства в области стабильной работы кольцевого автогенератора класса E, критериями стабильной работы могут выступать энергетические и информационные характеристики выходного сигнала. Параметром, от которого зависит стабильность работы автогенератора, является изменяющаяся частота генератора, вариация которой вызвана изменением элементов схемы автогенератора класса E.

### Моделирование работы кольцевого автогенератора класса E

Кольцевые автогенераторы строятся как цепочка одинаковых узлов, включенных последовательно друг за другом, наиболее известны кольцевые генераторы на нечетном числе логических инверторов, используемые для получения импульсных сигналов. В таких генераторах узлы генерируют одинаковую мощность, но выходной сигнал снимается с одного узла. От узла к узлу передается информация, необходимая для выполнения временных соотношений в генераторе, – установление частоты колебаний. В кольцевом автогенераторе класса E каждый узел имеет свою нагрузку генератора, на которой выделяется высокочастотная мощность, генерируемая данным узлом. Между узлами передается информация, необходимая для обеспечения генерации, – выполнение условий баланса фаз и баланса амплитуд. Генератор в режиме класса E является ключевым устройством, поэтому для обеспечения высокого КПД необходимо обеспечить в диапазоне работы автогенератора уровень мощности, поступающей на вход транзистора, достаточный для переключения между состоянием отсечки и насыщения.

На рис. 1 показана схема рассматриваемого ВЧ кольцевого автогенератора, состоящего из двух идентичных автогенераторов на МОП транзисторе BS170. Генераторы рассчитывались по методике [1, 10, 11] на частоту 5 МГц и выходную мощность 0,5 Вт при напряжении питания 6 В. Таким образом, автогенератор должен генерировать два синфазных сигнала общей мощностью 1 Вт.

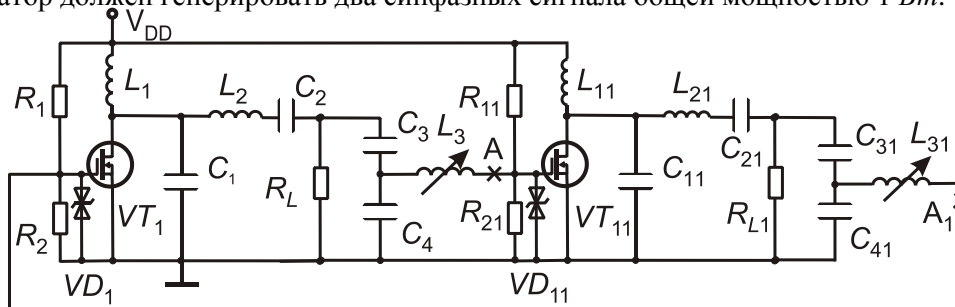


Рис. 1

В предлагаемом генераторе выполняется условие равенства набега фаз  $2\pi n$ , где  $n$  – ноль или четное число, в силу симметрии устройства и построения кольцевого генератора из двух обычных генераторов класса Е. В СВЧ кольцевых автогенераторах  $n$  может быть нечетным [8].

В табл. 1 приведены параметры схемы для одного парциального автогенератора, диод  $VD_1$  – два включенных навстречу друг другу стабилитрона с напряжением стабилизации 15 В.

Таблица 1

Элемент	Номинал	Элемент	Номинал	Элемент	Номинал
$C_1$	292 пФ	$C_4$	1600 пФ	$L_3$	19-41 мкГн
$C_2$	208 пФ	$L_1$	100 мкГн	$R_L$	50 Ом
$C_3$	1600 пФ	$L_2$	6,49 мкГн	$R_1, R_2$	100 кОм

При расчете сопротивления катушек индуктивности  $L_2$  и  $L_3$  принимались равными 1,7 и 12,5 Ом соответственно. В эксперименте эквивалентное последовательное сопротивление переменной индуктивности менялось в зависимости от положения сердечника и могло превышать приведенное значение.

Моделирование автогенератора осуществлялось для поиска частотных зависимостей энергетических и спектральных характеристик, поскольку частота колебаний является обобщенной функцией изменения параметров всех элементов схемы. Использовалось моделирование во временной области методом переменных состояния [1, 11]. Шаг интегрирования по времени выбирался исходя из достижения требуемой точности расчета и учета влияния особенностей ключевого режима работы. На рис. 2,а представлены рассчитанные зависимости выходной мощности и КПД каждого парциального генератора, которые соответствуют зависимостям обычного автогенератора класса Е при его перестройке. Отличия связаны с тем, что перестройка кольцевого генератора осуществлялась изменением индуктивности одного элемента – катушки  $L_3$ , в то время как катушка индуктивности в цепи обратной связи второго узла  $L_{31}$  оставалась постоянной. Рис. 2,б показывает аналогичные экспериментальные зависимости.

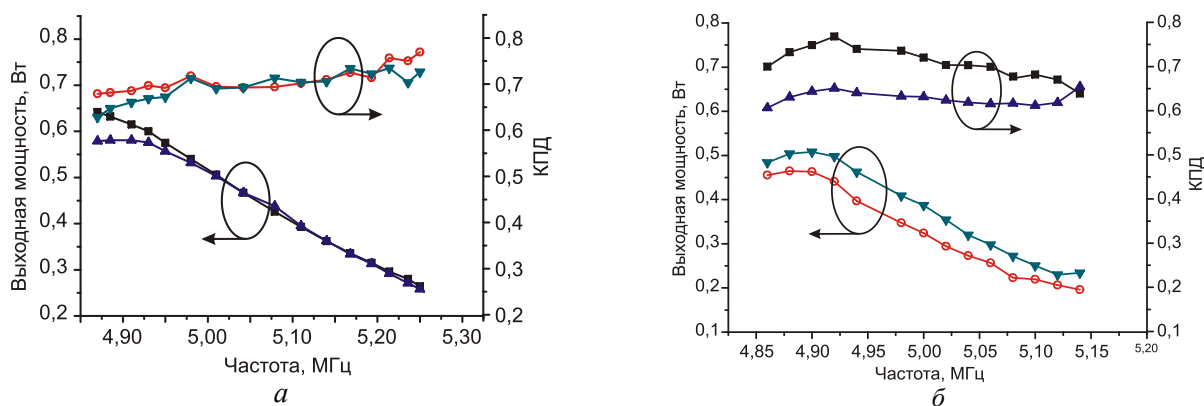


Рис. 2

Во всем диапазоне перестройки, представленном на рис. 2, не обнаружена генерация побочных колебаний, спектр выходного сигнала представляет собой типичный спектр автогенератора класса Е [1, 11]. Вместе с тем, в кольцевых автогенераторах класса Е экспериментально обнаружена генерация нескольких частот, сопровождаемая появлением развитого спектра выходного сигнала [9]. Моделирование показывает, что для автогенератора класса Е такое явление возможно при первоначальной настройке парциальных генераторов класса Е на достаточно отличающиеся частоты. В таком случае происходит настройка выходной согласующей цепи каждого узла на другую частоту, а не только изменяются параметры одного элемента в цепи обратной связи. Тогда кольцевой генератор, образованный такими различающимися генераторами, может генерировать, создавая на своих нагрузках спектр (рис. 3), подобный спектру генератора с автомодуляцией. Однако этот режим реализуется при начальной расстройке генераторов, соизмеримой с диапазоном перестройки изучаемого кольцевого генератора и поэтому его изучение не соответствует цели данной работы.

Для оценки возникновения побочных колебаний при перестройке первоначально настроенного кольцевого автогенератора были проведены расчеты с изменением индуктивности в больших преде-

лах, при этом происходило падение выходной мощности и КПД, и в спектре сигнала, полученного путем вычисления преобразования Фурье, появлялись некратные частотные составляющие. На рис. 4 показаны спектры на одном из выходов при обычной работе кольцевого генератора (рис. 4, а) и в случае, когда один из генераторов расстроен и появляются побочные колебания (рис. 4, б). Такой режим также не отвечает условиям получения высокого КПД и не рассматривается здесь.

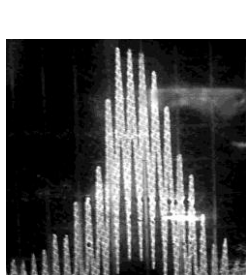
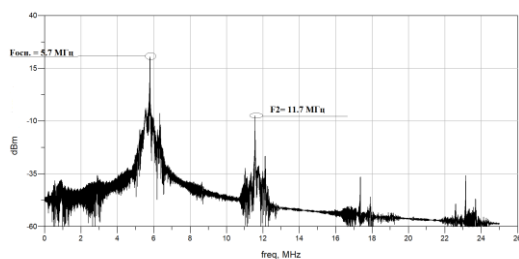
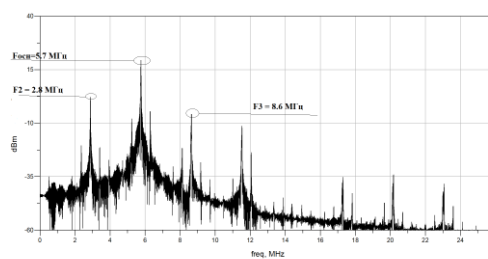


Рис. 3



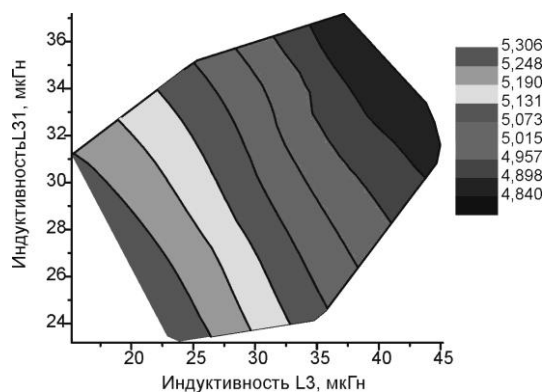
а



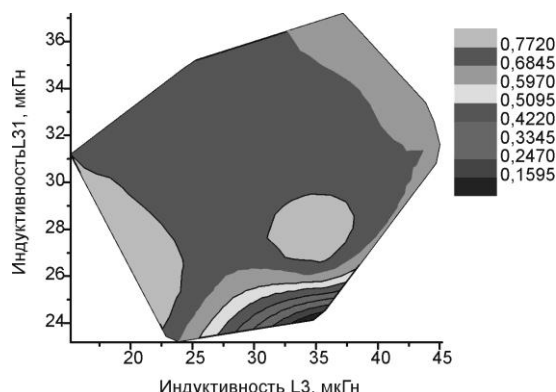
б

Рис. 4

На рис. 5 показаны результаты моделирования для автогенератора с частотой 5 МГц, отображающие изменение частоты генерации (рис. 5, а) и КПД одного из генераторов (рис. 5, б) в зависимости от совместно изменяемых индуктивностей  $L_3$  и  $L_{31}$ .



а



б

Рис. 5

Изменение частоты, как видно на рис. 5, а, происходит быстрее при совместном изменении индуктивностей, в то же время это говорит о большей устойчивости кольцевого автогенератора к воздействию дестабилизирующих факторов. На рис. 5, б видно, что в допустимом диапазоне изменения выходной мощности генератора он сохраняет высокий КПД, частотная зависимость КПД схожа на соответствующие зависимости усилителя мощности класса Е [1].

### Экспериментальное исследование ВЧ кольцевого автогенератора класса Е

Для проверки теоретических предположений был изготовлен экспериментальный макет кольцевого автогенератора на частоту 5 МГц, состоящий из двух автогенераторов класса Е, настроенных для работы на частоту 5 МГц. Повышение рабочей частоты по сравнению с автогенератором [9] сказалась на увеличении мощности управления транзисторами, что заметно изменило параметры цепи обратной связи – емкостей  $C_3$  и  $C_4$ . Именно с такими значениями емкостей было проведено моделирование автогенератора. При проектировании автогенераторов класса Е необходимо учитывать особенности реализации цепи обратной связи. Мощность управления транзистора равна [1, 12]  $P_g = I_g^2(R_d + R_g)/2$ , где  $R_g$  и  $R_d$  – сопротивления потерь затвора транзистора и цепи управления затвором соответственно. В свою очередь  $I_g = Q_g \omega$ , где  $Q_g$  – заряд, необходимый для управления полевым транзистором,  $\omega$  – рабочая частота. Выбирая транзистор с меньшей входной емкостью, получим меньший ток управления, но потребуются большая индуктивность в цепи затвора, что вызовет повышение сопротивления  $R_d$ . Поэтому в нижней части диапазона ВЧ может быть выгодным

использование более мощных транзисторов для получения высокого КПД автогенератора, с учетом более низкого сопротивления в открытом состоянии у мощного транзистора.

Для того чтобы настроить кольцевой генератор и получить на его выходах сигнал, соответствующий одиночному автогенератору класса Е, необходимо выполнить следующие условия: а) обеспечить максимальную идентичность как топологии генераторов, так и параметров элементов схемы, особенно в цепи затвора транзистора, так как малое изменение емкости монтажа может вызвать значительное изменение индуктивности и ее эквивалентного последовательного сопротивления; б) контролировать идентичность нагрузочных импедансов транзисторов в полосе частот автогенератора; в) исключить протекание токов выходной цепи одного парциального генератора через участки цепи, общие с другим генератором.

В эксперименте было обнаружено, что параметры транзисторов и защитных диодов, использованных в экспериментальном макете, заметно отличались, это привело к тому, что при отдельной настройке генераторов, размыкании их цепей обратной связи в точках А и А1 (рис. 1) и соединении в конфигурацию кольцевого автогенератора его настройка была затруднительной вплоть до отсутствия генерации. Если же составить схему автогенератора так, чтобы индуктивности остались подключенными к затворам соответствующих транзисторов, то есть индуктивность  $L_3$  оставалась подключенной к затвору  $VT_1$ , индуктивность  $L_{31}$  к затвору  $VT_{11}$ , то автогенератор начинает работать сразу и показывает лучшие частотные зависимости. Это связано с тем, что в используемом в автогенераторе транзисторе BS 170 входная емкость имеет типичное значение  $24 \text{ нФ}$ , а максимальное  $40 \text{ нФ}$  [13].

Важным параметром кольцевого автогенератора является разность фаз сигналов на его выходах. При полной симметрии схемы разность фаз на выходах автогенератора будет равна нулю. Но если в парциальных генераторах отличаются набеги фаз в транзисторе (из-за изменения режима работы), в выходной согласующей цепи (от емкости  $C_1$  до  $R_L$ ) и в цепи, создающей обратную связь в автогенераторе (емкости  $C_3$  и  $C_4$ , индуктивность  $L_3$  и входная емкость транзистора), то фазы на выходах будут отличаться. На рис. 6 показана разность фаз выходного сигнала при моделировании идеально симметричной схемы на частоте генерации и полученная в результате эксперимента.

Уровень гармоник выходного сигнала автогенератора в эксперименте на частоте  $5 \text{ МГц}$  составлял: второй  $-27 \text{ дБ}$ , третьей  $-48 \text{ дБ}$ , что объясняется относительно невысокой нагруженной добротностью выходной согласующей цепи  $\omega L_2/R = 11,3$ , где  $R = 0,1836/\omega C_1$  – активное нагрузочное сопротивление транзистора. При перестройке частоты уровни гармоник изменяются на относительно небольшие значения, например, на частоте  $5,2 \text{ МГц}$  уровень второй гармоники становится  $-26 \text{ дБ}$ , а третьей  $-40 \text{ дБ}$ . Это объясняется искажением формы сигналов напряжения на стоке транзистора при отходе от номинального режима класса Е. На рис. 7 показан спектр выходного сигнала на частоте  $5 \text{ МГц}$  на одном из выходов автогенератора.

На рис. 8 показаны экспериментальные формы напряжения на стоке одного из транзисторов и на соответствующем выходе автогенератора. Видно, что формы соответствуют режиму класса Е (выполнению условия переключения в нуле напряжения на стоке и с нулевой производной), это обеспечивает высокий КПД устройства. Напряжение на выходе синусоидально и соответствует заявленной мощности  $0,5 \text{ Вт}$ .

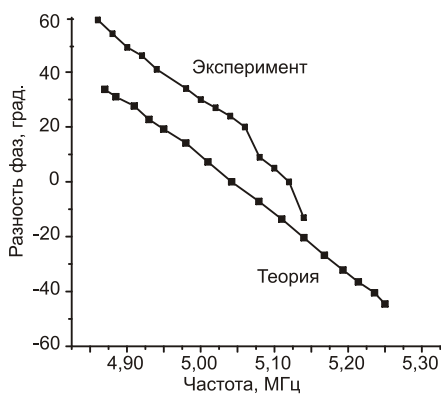


Рис. 6

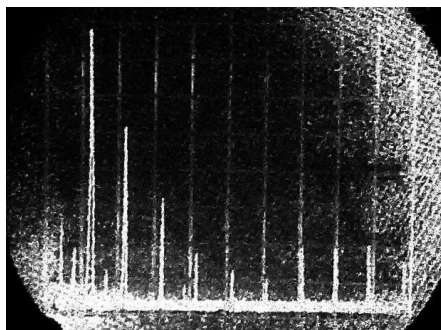


Рис. 7

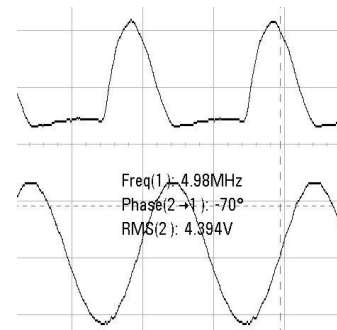


Рис. 8

Параметры исследуемого кольцевого генератора представлены в табл. 2, где показаны диапазоны изменения выходной мощности, КПД и уровня гармоник для каждого узла кольцевого генератора

в диапазоне перестройки индуктивностей обратной связи. В эксперименте диапазон изменения индуктивности был ограничен конструктивными особенностями катушек индуктивности. Внимание при моделировании и эксперименте обращалось на диапазон, в котором выходная мощность изменялась приблизительно на 3 дБ, и в этом диапазоне анализировалась стабильность работы автогенератора – самовозбуждение при включении питания и отсутствие побочных колебаний.

Таблица 2

	Узел	Диапазон изменения			
		Индуктивность $L_3, (L_{31}), мкГн$	Выходная мощность, Вт	КПД	Уровень гармоник, дБ
Моделирование	I	15 – 45	0,264 – 0,651	0,68 – 0,77	-16 – -29,5
	II	23 – 37	0,258 – 0,594	0,63 – 0,73	-15,5 – -29,5
Эксперимент	I	19 – 41	0,164 – 0,43	0,64 – 0,77	-23 – -28
	II	19,5 – 39	0,233 – 0,51	0,6 – 0,66	-23 – 39

Таким образом, в работе впервые изучены свойства ВЧ кольцевого автогенератора класса Е и показано, что он может обеспечить устойчивую работу в диапазоне выходных параметров аналогичного одиночного автогенератора. Известный метод проектирования ВЧ автогенераторов класса Е применим к расчету парциальных генераторов кольцевого автогенератора. Для сохранения фиксированной разности фаз выходных сигналов необходимо использовать синхронную перестройку генераторов, входящих в состав кольцевого автогенератора. При когерентности выходных сигналов сужается диапазон помех для сторонних радиотехнических устройств.

### Выводы

Результаты моделирования и экспериментального исследования ВЧ кольцевого автогенератора класса Е показывают, что в области изменения параметров схемы, обеспечивающих высокие энергетические характеристики, он является устойчивым устройством, характеризующимся монотонной перестройкой частоты генерации. Кольцевой автогенератор класса Е может быть использован для получения большей мощности в тех применениях, где необходим высокий КПД и синфазное распределение мощности нескольким потребителям.

**Список литературы:** 1. Крыжановский, В.Г. Транзисторные усилители с высоким КПД. – Донецк : Апекс, 2004. – 448 с. 2. Ellinger, F., Lott, U., Bachtold, W. Design of a Low-Supply-Voltage High-Efficiency Class-E Voltage-Controlled MMIC Oscillator at C-Band // IEEE Tran. on MTT. – V.49, No.1. – January 2001. – P. 203-206. 3. Bryerton, E.W., Shiroma, W.A., Popović, Z.B. A 5-GHz High-Efficiency Class-E Oscillator // Microwave and Guided Wave Letters V. 6, No. 12 (Dec. 1996). – P. 441-443. 4. Mikolajewski, M. A self-oscillating h.f. power generator with a Class E resonant amplifier // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical sciences, Vol. 61, No. 2, 2013. – P.527-524. 5. Krizhanovski, V.G., Chernov, D.V., Kazimierczuk, M.K. Low-Voltage Electronic Ballast Based on Class E Oscillator // IEEE Transactions On Power Electronics. – 2007. – Vol. 22, No. 3. – P. 863-870. 6. Kykkotis, C., Hall, P. S., Ghafouri-Shiraz, H. Active antenna oscillator arrays in communication system // 1997 MMT-S int. Microwave Symp. Dig., V. 2: P. 591 – 594. 7. Chang, K., York, R. A., Hall, P. S., Itoh, T. Active Integrated Antennas // IEEE Tran. On. MTT, V. 50, No. 3, March 2002. – P. 937 – 944. 8. Крыжановский, В.Г., Принцовский, В.А. Кольцевой СВЧ автогенератор класса Е на двух транзисторах // 18-я межд. Крымская конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, 8-12 сентября 2008 г. : Материалы конф. – Севастополь : Вебер, 2008. – С.61-62. 9. Крыжановский, В.Г., Григоров, К.А., Принцовский, В.А., Рассохина, Ю.В. Кольцевой генератор ВЧ и СВЧ диапазонов // Сб. науч. тр. 1-й межд. науч. конф. "Электронная компонентная база, состояние и перспективы развития" в рамках 3-го Междунар. науч. форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития", 30 сент.- 3 окт., 2008. Харьков-Судак, 2008. АН ПРЭ, ХНУРЭ, 2008. – Т. III. С. 5-6. 10. Kazimierczuk, M. K., Krizhanovski, V. G., Rassokhina, Ju. V., Chernov, D. V. Class-E MOSFET Tuned Power Oscillator Design Procedure // IEEE Trans. On Circuits and Systems I. Regular Papers. – V. 52, No. 6.– June 2005. – P.1138-1147. 11. Крыжановский, В.Г., Чернов, Д.В., Рассохина Ю.В. Автогенератор класса Е в режиме синхронизации FSK сигналом // Радиотехника. – 2006. – Вып. 147. – С.92-98. 12. El-Hamamsy, S.-A. Design of high-efficiency RF Class-D power amplifier // IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 9 Issue: 3, May 1994. – P. 297-308. 13. www.fairchildsemi.com/ds/BS/BS170.pdf