

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАТОРОВ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА, РЕАЛИЗОВАННЫХ НА КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ МЕТАЛ-ОКИСЕЛ-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

Никишов Артём Юрьевич<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Московский Физико-Технический Институт (государственный институт)

<sup>2</sup> Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН

E-mail: [nikishov@cplire.ru](mailto:nikishov@cplire.ru)

*В работе рассмотрен вопрос энергетической эффективности кольцевых генераторов хаотических колебаний микроволнового диапазона, реализованных на комплементарных метал-окисел-полупроводниковых структурах. А именно, проанализированы возможности повышения КПД при уменьшении технологической нормы комплементарных метал-окисел-полупроводниковых структур, на которых реализуется генератор, и увеличении внутреннего сопротивления в кольце обратной связи генератора.*

### Введение

Использование сверхширокополосных (СШП) сигналов представляет большой интерес. Одной из областей, где они применяются, являются беспроводные локальные сети (WPANs). Такие сети разрабатываются, в частности, в рамках стандарта IEEE 802.15.4a. Одним из типов сигнала, который рекомендован для использования в СШП WPANs сетях в качестве информационной несущей, является хаотический сигнал.

Наибольший интерес вызывают прямохаотические системы связи, в которых хаотические колебания выполняют функцию несущего сигнала. Основная идея состоит в том, что генерация, модуляция информационным сигналом и демодуляция хаотического сигнала происходит непосредственно в микроволновом диапазоне частот [1-3].

Для реализации таких систем связи необходимы энергетически эффективные источники микроволновых хаотических колебаний [4,5].

В работе рассмотрен вопрос энергетической эффективности кольцевых генераторов хаотических колебаний микроволнового диапазона, реализованных на комплементарных метал-окисел-полупроводниковых (КМОП) структурах. А именно, проанализированы возможности повышения КПД при уменьшении технологической нормы КМОП-структур, на которых реализуется генератор, и увеличения внутреннего сопротивления в кольце обратной связи генератора.

Под технологической нормой КМОП-структур подразумевается минимальная ширина затвора КМОП транзистора, реализуемая на данной технологии.

### I. Структура кольцевого генератора хаотических колебаний

Генератор, рассматриваемый в данной работе, представляет собой кольцевой генератор, реализованный на КМОП-структурах и позволяющий получать хаотические колебания микроволнового диапазона [6, 7].

Основными частями генератора (рис. 1) являются три идентичных усилителя (УС) и частотно избирательная схема (ЧИС), замкнутые последовательно в кольцо обратной связи. Генерируемые колебания снимаются из точки А в кольце обратной связи посредством буферного усилителя (БУФЕР). Данная точка выбрана, поскольку в ней мощность генерируемых колебаний максимальна. Сопротивление нагрузки составляет 50 Ом. Все элементы генератора реализованы на элементной базе КМОП технологии. Частотно-избирательная схема состоит из одного RC- и двух LC- звеньев (Рис.2). УС представляют собой маломощные микроволновые КМОП усилители, каждый из которых состоит из двух каскадов. Первый каскад – инверторный усилитель (схема с общим истоком) с отрицательной обратной связью. Второй каскад – буферный усилитель (схема с общим истоком).

Рассмотрим теперь различные методы повышения КПД генератора и способы уменьшения его энергопотребления.

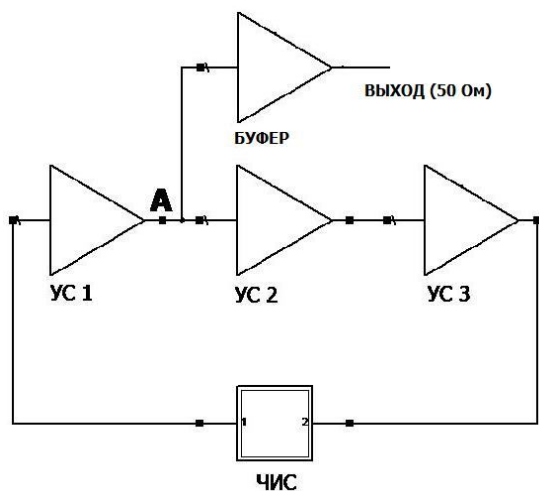


Рис. 1. Блок-схема кольцевого генератора хаотических колебаний, реализованного на КМОП-структурах

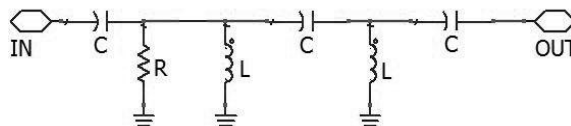


Рис. 2. Блок-схема ЧИС генератора

## II. Изменение энергетических характеристик генератора при уменьшении технологической нормы КМОП-структур

Рассмотрим, как будут меняться энергетические характеристики генератора для различных технологических норм КМОП-структур, а именно для технологий 180 нм, 130 нм и 90 нм.

Пусть для каждой из технологий остаются одинаковыми номиналы всех элементов в кольце обратной связи генератора и в буферном усилителе, кроме, ширины затвора транзисторов и напряжения питания, которые для технологических норм 180 нм, 130 нм и 90 нм составляют соответственно 1.8 Вольт, 1.2 Вольт и 1.0 Вольт. Пусть также все элементы в кольце обратной связи генератора будут согласованы на 50 Ом, то есть отношение внутреннего сопротивления генератора к выходному сопротивлению системы 1:1.

В этом случае спектры мощности хаотических колебаний будут лежать в разных диапазонах частот (рис. 3) вследствие того, что с уменьшением ширины затвора транзисторов уменьшаются переходные ёмкости затвор-сток и затвор-исток, а значит, набег фазы в кольце обратной связи становится меньше. Так для 180нм спектр мощности генерируемых колебаний лежит в диапазоне частот 3-5 ГГц, для 130нм – 5-7 ГГц, а для 90нм – 7-9 ГГц.

В таблице 1 приведены сравнительные энергетические характеристики для генераторов, выполненных на КМОП-структурах с различными нормами.

Из таблицы видно, что при уменьшении технологической нормы в 1.5 и 2 раза по отношению к 180 нм, при прочих равных условиях, КПД передатчика возрастает примерно в 2 и 4 раза соответственно. То есть, если  $l_1$  и  $l_2$  технологические нормы КМОП-структур, а  $KПД_{l_1}$  и  $KПД_{l_2}$  – КПД двух генераторов, реализованных по данным технологическим нормам, то:

$$\frac{KПД_{l_2}}{KПД_{l_1}} = \left( \frac{l_1}{l_2} \right)^2 \quad (1)$$

Формула (1) является оценочной и применима для генераторов, реализованных на КМОП технологии с нормой до 45 нм.

Теперь рассмотрим, как будут соотноситься КПД устройств, выполненных на различных технологиях, если их спектры мощности будут лежать в одном диапазоне частот. На рисунке 4 приведены спектры мощности хаотических колебаний генераторов, выполненных по

технологии 90 нм для диапазона частот 3-5 ГГц и по технологии 180 нм для диапазона частот 5-7 ГГц. Результаты моделирования также приведены в таблице № 1.

В данном случае, при смещении спектра мощности хаотических колебаний генератора, реализованного на технологии 90 нм, в область более низких частот, его выходная мощность увеличивается до 1.4 мВт. Однако для того чтобы сместить спектр мощности в область низких частот, приходится увеличить крутизну транзисторов в кольце обратной связи, чтобы повысить значение ёмкостей перехода сток-затвор и исток затвор, в результате чего растёт потребляемая генератором мощность и КПД оказывается 3.9%.

Для генератора, реализованного на технологии 180 нм, смещение спектра мощности хаотических колебаний в область высоких частот приводит к падению выходной мощности до 0.56 мВт и КПД до 0.73%. Это связано с тем, что коэффициент усиления и мощность насыщения усилителей, являющихся активными элементами генератора, значительно уменьшаются с увеличением частоты.

Таким образом, генераторы хаотических колебаний, реализованные на КМОП-структурах с меньшей нормой, имеют потенциально больший КПД и способны эффективно работать в более широком диапазоне частот.

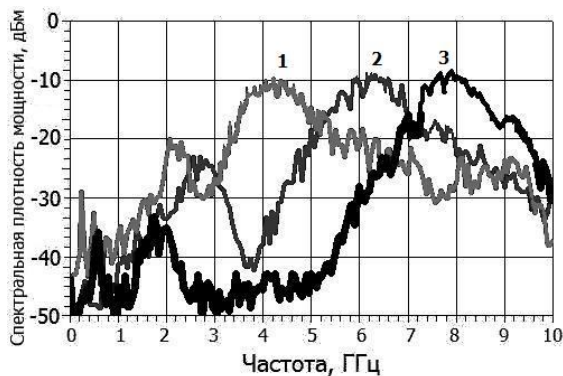


Рис. 3. Спектры мощности хаотических колебаний генераторов, реализованных на КМОП-структурах с нормами 180 нм (линия – 1, диапазон частот 3-5 ГГц), 130 нм (линия – 2, диапазон частот 5-7 ГГц) и 90 нм (линия – 3, диапазон частот 7-9 ГГц)

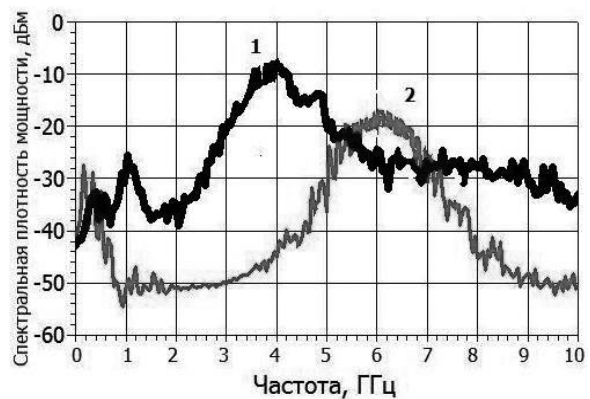


Рис. 4. Спектры мощности хаотических колебаний генераторов, реализованных на КМОП-структурах с нормами 90 нм (линия – 1, диапазон частот 3-5 ГГц) и 180 нм (линия – 2, диапазон частот 5-7 ГГц)

Таблица №1

Технология	90 нм		130 нм	180 нм	
Диапазон частот (ГГц)	3-5	7-9	5-7	3-5	5-7
Напряжение питания (Вольт)	1.0	1.0	1.2	1.8	1.8
Ток питания в кольце обратной связи (мА)	27	19.5	26	36	27
Ток питания буферного усилителя (мА)	9.6	9.6	11.6	15	15
Общий ток питания (мА)	36.6	29.1	37.6	51	42
Мощность (мВт)	36.6	29.1	45.3	92	75.6
Излучаемая мощность (мВт)	1.4	1	0.85	0.73	0.56
КПД	3.9%	3.5%	1.8%	0.8%	0.73%

### III. Увеличение энергетической эффективности генератора при увеличении внутреннего сопротивления в кольце обратной связи

Уменьшить энергопотребление генератора можно с помощью масштабирования номиналов элементов в его кольце обратной связи. А именно, за счёт увеличения активных и реактивных сопротивлений элементов в  $n$ -раз так, чтобы потребление по току уменьшилось в  $n$ -раз. То есть отношение внутреннего сопротивления в кольце обратной связи генератора ( $50 \cdot n$  Ом) к выходному сопротивлению системы (50 Ом) становится  $n:1$ .

Понижение сопротивления с  $n \cdot 50$  Ом в точке А (рис. 1) до 50 Ом на выходе осуществляется с помощью прежнего буферного усилителя, который имеет высокое входное и низкое выходное сопротивление.

В силу наличия в схеме генератора индуктивных элементов и невозможности использования значительных по величине их номиналов в силу физических ограничений существующих в КМОП технологиях, в данной работе  $n=5$ .

Рассмотрим, как меняется КПД при применении данного метода для генератора, реализованного на КМОП-структурах с технологической нормой 180 нм.

Первоначально, при потребляемой мощности  $P_{n=1} = (I_b + I_g) \cdot V_g = 92$  мВт (где  $I_g$  - ток потребляемый генератором (51 мА) при напряжении  $V_g = 1.8$  В) излучаемая мощность генератора составляет 0.73 мВт (таблица 1). Отсюда КПД составляет 0.8%.

В результате применения данного метода потребление становится равным  $P_n = (I_b + I_g/n) \cdot V_g$ . Так как ток в кольце обратной связи уменьшается в  $n=5$  раз, то  $P_{n=5} = 40$  мВт. При этом выходная мощность генератора возрастает с 0.73 мВт до 1 мВт. Это связано с тем, что коэффициент усиления буфера растёт с увеличением внутреннего сопротивления кольца обратной связи генератора. Таким образом, КПД передатчика возрастает в 3 раза с 0.8% до 2.5%.

Если теперь мы рассмотрим устройства, реализованные на технологиях 130 нм и 90 нм с использованием метода повышения энергоэффективности, описанного в данном пункте, то КПД устройств возрастает также примерно в 3 раза до 5.5% и 9.6% соответственно (таблица 2).

При этом также оказывается справедливой формула (1). Здесь, также как и в предыдущем разделе, для каждой из технологий остаются одинаковыми номиналы всех элементов в кольце обратной связи генератора и в буферном усилителе, кроме, ширины затвора транзисторов и напряжения питания.

В идеальном случае, если бы не было ограничений на номиналы элементов КМОП-технологии, то КПД генератора определялось бы в основном мощностью насыщения буферного усилителя генератора и его потреблением. Так, если попробовать оценить максимальный КПД для генератора, реализованного на КМОП-структурах с технологической нормой 90 нм при мощности насыщения буферного усилителя 2 мВт и потреблении 9.6 мВт, то максимальный КПД получится порядка 25%.

А для технологий 130 нм (мощность насыщения буферного усилителя 1.7 мВт при потребляемой мощности 14 мВт) и 180 нм (мощность насыщения буферного усилителя 1.3 мВт при потребляемой мощности 27 мВт) – 12.2% и 6.2% соответственно.

**Таблица №2**

Технология	90 нм	130 нм	180 нм
<b>Диапазон частот (ГГц)</b>	7-9	5-7	3-5
<b>Напряжение питания (Вольт)</b>	1.0	1.2	1.8
<b>Ток питания в кольце обратной связи (мА)</b>	4	5.2	7.2
<b>Ток питания буферного усилителя (мА)</b>	9.6	11.7	15
<b>Общий ток питания (мА)</b>	13.6	16.9	22.2
<b>Мощность (мВт)</b>	13.6	20	40
<b>Излучаемая мощность (мВт)</b>	1.3	1.1	1
<b>КПД</b>	9.6%	5.5%	2.5%

### **Заключение**

В работе рассмотрен вопрос энергетической эффективности генераторов хаотических колебаний микроволнового диапазона, реализованного на КМОП-структурах.

Исследования показали, что, при прочих равных условиях, если  $I_1$  и  $I_2$  технологические нормы КМОП-структур, а  $KPD_{11}$  и  $KPD_{12}$  – КПД двух генераторов, реализованных по данным технологическим нормам, то эти величины связаны по формуле (1). Формула (1) является оценочной и применима для генераторов, реализованных на КМОП-структурах с технологической нормой до 45 нм.

Также в работе сделан вывод, что кольцевые генераторы хаотических колебаний, реализованные на КМОП-структурах с меньшей нормой, имеют потенциально больший КПД и способны эффективно работать в более широком диапазоне частот. Так для КМОП технологии 90 нм КПД устройств достигает 10% при спектре мощности, лежащем в диапазоне частот 7-9 ГГц при излучаемой мощности 1.3 мВт.

При этом можно оценить максимально достижимый КПД для генераторов хаотических колебаний рассматриваемой структуры, в том случае, если бы не было технологических ограничений на номиналы элементов КМОП-технологии. Тогда КПД генератора определялось бы в основном мощностью насыщения буферного усилителя генератора и его потреблением. Так, для генератора, реализованного на КМОП-структурах с технологической нормой 90 нм, 130 нм и 180 нм, максимальный КПД получается порядка 25%, 12.2% и 6.2% соответственно.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев А.С., Панас А.И. *Динамический хаос. Новый носитель информации для систем связи*. М.: Физматлит, 2002.
2. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Максимов Н.А., Панас А.И., Старков С.О. *"Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио и СВЧ диапазонах"*, *Радиотехника*, 2000, № 3, с.9-20.
3. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И., Пузиков Д.Ю., Старков С.О., *"Сверхширокополосная прямохаотическая передача информации в СВЧ-диапазоне"*, *Письма в ЖТФ*, 2003, т. 29, вып.2, с. 70-76.
4. Panas A.; Efremova E.; Kyarginsky B.; Nikishov A. «UWB microwave chaotic oscillators based on microchip», *Proceeding of the 15th IEEE International Conference ICECS 2008*. Pages: 942-945.
5. Никишов А.Ю., Панас А.И. "Сверхширокополосный СВЧ генератор хаоса кольцевой структуры на усилительных микросборках", *Успехи современной радиоэлектроники*, 2008, №1, с. 54–62.
6. Nikishov A. Yu., "CMOS UWB microwave chaotic oscillator". *Proceedings of the 2nd Chaotic Modeling and Simulation International Conference (CHAOS2009), Chania, Crete, Greece, June 2009*. Pages: 1341-1348.
7. Nikishov A. Yu., "Generation of the Microwave Chaotic Oscillations by CMOS Structure". *Proceedings of the Progress in Electromagnetic Research Symposium 2009 (PIERS2009), Moscow, Russia, August 2009*. Pages: 447-451.