

УДК 621.391.822

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО ШУМА ВЧ АВТОГЕНЕРАТОРА КЛАССА Е

В. В. Крыжановский*, Д. В. Чернов

*Silicon Works Co., Ltd, Дейджон, Республика Корея

Для решения задачи изучения фазового шума в автогенераторах класса Е, которые характеризуются высоким КПД и сильно нелинейным режимом, был рассчитан и изготовлен генератор на частоту 5 МГц на МОП ПТ IRF510. Были измерены его частотные характеристики – зависимости частоты генерации от напряжения питания, спектр гармоник в выходном сигнале и проведено измерение спектра фазового шума в широком диапазоне напряжения питания. Впервые полученные данные о изменении шума при изменении напряжения позволяют сделать вывод о существенном влиянии условий переключения транзистора на уровень фазового шума автогенераторов класса Е.

Ключевые слова: фазовый шум, автогенератор класса Е, экспериментальное исследование шумов автогенератора, МОП ПТ.

Введение. Для современных систем связи одной из важнейших характеристик усилительных и генерирующих устройств является фазовый шум, который ограничивает скорость передачи данных [1]. Вследствие наличия механизмов ограничения амплитуды сигнала в активных устройствах, к которым относятся отрицательная обратная связь и явления насыщения, амплитудный шум имеет существенно меньшее значение и доминирующим является фазовый шум [2]. Этот шум имеет разнообразную природу, и одним из его компонентов является шум $1/f$ или фликкер-шум [2, 3]. В связи с широким использованием усилителей и автогенераторов класса Е, (в основном в энергетических применениях, но в последнее время их продвигают и в область телекоммуникаций [4, 6]), становится актуальной задача определения шумовых колебаний, генерируемых устройствами, работающими в классе Е. В данной работе экспериментально измерен фазовый шум высокочастотного автогенератора класса Е на частоту 5 МГц, построенного по известной схеме [6-8]. Выбор такого объекта исследования определяется изученностью его энергетических характеристик, наличием методики расчета и возможностью учета влияния различных факторов на выходные характеристики автогенератора. В отличие от СВЧ автогенератора [9], в высокочастотном автогенераторе легче провести анализ причин, создающих определенный уровень фазового шума. Накопление данных по характеристикам ВЧ усилителей и автогенераторов класса Е позволяет затем применить полученный опыт для совершенствования устройств микроволнового диапазона [7].

Цель работы – экспериментальное исследование фазовых шумов и спектра выходного сигнала ВЧ автогенератора класса Е при изменении его режима работы.

Автогенератор класса Е. На основе работы [6] был рассчитан генератор на МОП транзисторе IRF510 на частоту 5 МГц и выходную мощность 400 мВт. Параметры устройства представляют собой такое сочетание свойств активного прибора и частоты, которые соответствуют гораздо более высокочастотным автогенераторам. Максимальная частота, на которой транзистор IRF510 может работать со 100% КПД при учете только его выходной емкости (около 95 пФ), в приближении идеального ключа составляет 25 МГц, при расчете по формулам работы [10]. С учетом того, что суммарная длительность нарастания и спада переходной характеристики транзистора для работы в ключевом режиме класса Е может быть до 30 % периода усиливаемой (генерируемой) частоты [7], получим для данного транзистора частоту около 7 МГц. Выбранная частота генерации устройства составляет около 1/3 максимальной частоты, такие соотношения обычно выполняются в СВЧ диапазоне при использовании арсенид галлиевых полевых транзисторов с барьером Шоттки. Таким образом, исследуемый автогенератор может дать указания на свойства СВЧ устройств, в которых транзисторы используются на одной трети граничной частоты [7]. На рис. 1 показана схема автогенератора. Параметры элементов приведены в табл. 1.

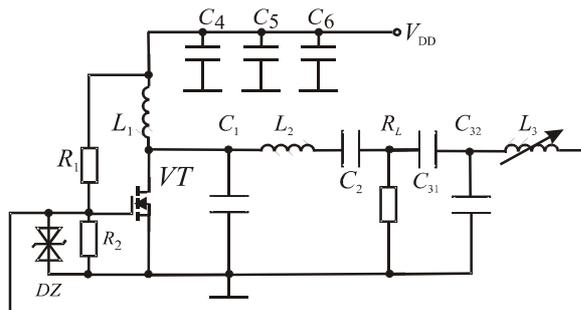


Рис. 1. Схема автогенератора с фильтром помех в цепи питания

Таблиця 1
Значення елементів схеми автогенератора класу Е на частоту 5 МГц

Елемент	Номинал	Елемент	Номинал
R_1	100 кОм	C_4	10 пФ
R_2	200 кОм	C_5	1 нФ
R_L	51 Ом	C_6	100 мкФ
C_1	133 пФ	L_1	Дроссель 10 мГн
C_2	161 пФ	L_2	7,73 мкГн
C_{31}	827 пФ	L_3	7,86 мкГн
C_{32}	28,05 нФ	VT	IRF 510

Експериментальное исследование автогенератора. Экспериментальное исследование автогенератора класса Е проводилось с использованием анализатора спектра Agilent E4440A, на котором была установлена опция «226 – Измерение фазового шума». Схема измерений показана на рис. 2, где БП – регулируемый блок питания с встроенным измерителем постоянного напряжения и потребляемого тока.

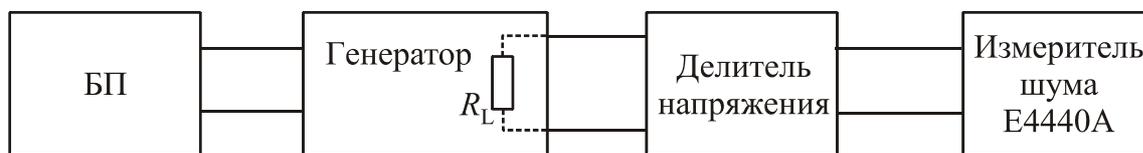


Рис. 2. Блок-схема измерительной установки

Делитель напряжения использовался в виде соединенных внешних резисторов, его амплитудно-частотная характеристика с учетом входной емкости прибора была измерена с помощью используемого спектроанализатора E4440A с применением калиброванного генератора с опорным уровнем 10 дБм на частотах первых пяти гармоник выходного сигнала.

На рис. 3, а показана зависимость частоты генерации от напряжения питания. Относительное изменение частоты генератора составляет 1,3 % при изменении напряжения питания от 2,8 до 6,2 В. Эта характеристика совпадает с параметрами автогенератора на транзисторе IRF530 [6] и отличается монотонной зависимостью от автогенератора класса Е на транзисторе МТР3055Е [9], оба генератора генерировали частоту 0,8 МГц.

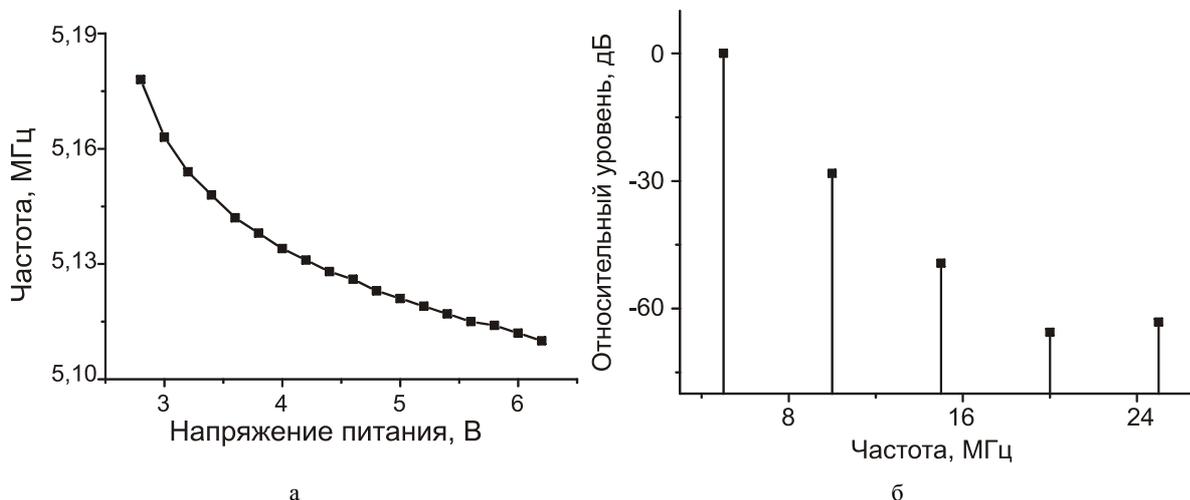


Рис. 3. Характеристики выходного сигнала автогенератора: а) зависимость частоты генерации от напряжения питания; б) мощность высших гармоник относительно основной при напряжении питания 5 В

На рис. 3, б показан относительный уровень гармоник выходного сигнала генератора при напряжении питания 5 В. Относительный уровень второй гармоники на 7 дБ, а третья на 3,5 дБ больше, чем в работе [6], что связано с меньшей нагруженной добротностью контура L_2C_2 . Вместе с тем спектральные характеристики исследуемого автогенератора близки к ранее опубликованным, поэтому этот автогенератор может служить базой для сравнения и шумовых характеристик ВЧ и СВЧ автогенераторов класса Е.

Рис. 4 показує характерний ход частотної залежності спектра фазового шуму автогенератора класу Е при різних напругах живлення. Показана спектральна щільність фазового шуму відносно рівня несущої – потужність шуму в полосі 1 Гц, ділена на потужність першої гармоніки напруги генератора на вході спектроаналізатора. Шум при расстройках від несущої більше ніж 20 кГц, практично не залежить від напруги живлення.

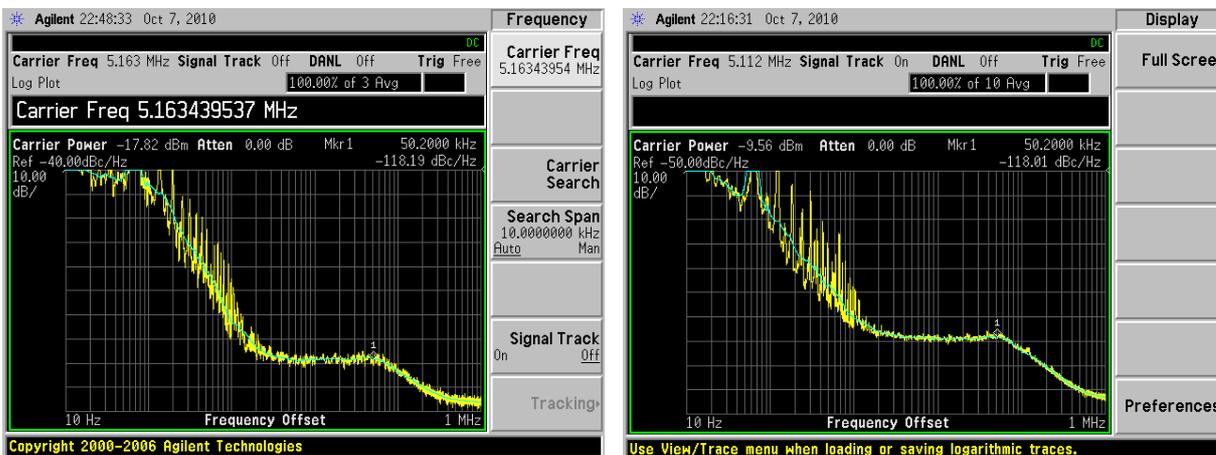


Рис. 4. Спектральна залежність фазового шуму при напругах 3 В (а) і 6В (б)

Однак при менших відстанях від несущої залежність від напруги виражена сильно (рис. 5). При напругі 3 В, коли вихідна напруга автогенератора, яка лінійно залежить від напруги живлення [7], стає малою, шум поблизу несущої різко зростає і досягає значень – 45 дБн/Гц при відстані від несущої 1 кГц. В той же час при напругі живлення 6 В і такій же расстройке шум знижується до – 70 дБн/Гц.

Ця залежність пов'язана з ключовим режимом роботи автогенератора класу Е. Тільки при наявності достаточного рівня сигналу на затворі транзистора відбувається його чітке переключення, що сприяє збереженню стабільної частоти. Таким чином, для автогенератора класу Е основним механізмом зростання фазового шуму є збільшення часу переключення активного елемента (транзистора), що призводить до підвищення чутливості фази коливань до шумів, діючих на вході транзистора. Ці залежності необхідно врахувати при розробці теорії фазового шуму в автогенераторах класу Е.

Висновки. Розраховано і виготовлено автогенератор класу Е на частоту 5 МГц з використанням польового МОП транзистора IRF510. Експериментально виміряно залежності частоти генерації від напруги живлення. Отримані значення фазового шуму в номінальному режимі роботи автогенератора. Вперше отримані дані про зміну шуму при зміні напруги живлення дозволяють зробити висновок про суттєвий вплив умов переключення транзистора на рівень фазового шуму автогенераторів класу Е.

РЕЗЮМЕ

Для рішення задачі вивчення фазового шуму у автогенераторах класу Е, які характеризуються високим ККД а також суттєво нелінійним режимом, було розроблено та виготовлено генератор на частоту 5 МГц на МОН ПТ IRF510. Було виміряно його частотні характеристики – залежність частоти генерації від напруги живлення, спектр гармонік у вихідному сигналі та проведено вимірювання спектру фазового шуму в широкому діапазоні напруги живлення. Вперше отримані дані про рівень шуму при зміні напруги живлення дозволяють зробити висновок про суттєвий вплив умов переключення транзистора на рівень фазового шуму автогенератора класу Е.

Ключові слова: фазовий шум, автогенератор класу Е, експериментальні дослідження шуму автогенератора, МОН ПТ.

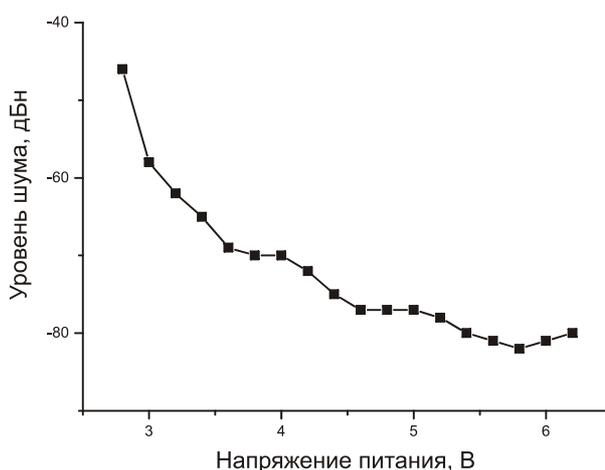


Рис. 5. Залежність відносного рівня фазового шуму автогенератора при расстройке 2 кГц від несущої

SUMMARY

The supply voltage dependency of the phase noise spectrum of class-E oscillator with 5 MHz frequency built on IRF510 field transistor was measured. The spectrum of the output signal harmonics as well as supply voltage dependency of the oscillation frequency were measured. Make conclusion about substantial influence of transistor switching terms on the level of class E oscillator phase noise.

Keywords: phase noise, class E oscillator, experimental investigation oscillator noise, MOSFET.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь / В. А. Галкин. – М.: Горячая линия - Телеком, 2007. – 432 с.
2. Lee T. H. Oscillator Phase Noise: A Tutorial / T. H. Lee, A. Hajimiri // IEEE J. Of Solid-State Circuits. – 2000. – Vol. 35, No. 3. – P. 326-336.
3. Моделирование фликкер-шума в схеме смесителя на MOSFET / В.В. Крыжановский, Ю. В. Рассохина, В. Г. Крыжановский, Б. В. Бондарев // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 18-й международной Крымской конференции (г. Севастополь, 8-12 сентября 2008 г.) – Севастополь, 2008. – С. 137-138.
4. Cantu H. I. Inverse Class E amplifier and oscillator phase noise characteristics / H. I. Cantu, T. Mury, V. F. Fusco / European Microwave Conf. (2007. 9-12 Oct.). – 2007. – P. 740-742
5. Additive Phase Noise in Linear and High-Efficiency X-Band Power Amplifiers / J. Breitbarth, S. Pajic, N. Wang, Z. Popovic / 2006 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig, San Francisco, CA (Jul. 2006). – 2006. – P. 1871-1874.
6. Class-E MOSFET Tuned Power Oscillator Design Procedure / M. K. Kazimierczuk, V. G. Krizhanovski, Ju. V. Rassokhina, D. V. Chernov // IEEE Trans. On Circuits and Systems I. Regular Papers. – 2005. – Vol. 52, No 6. – P. 1138-1147.
7. Крыжановский В. Г. Транзисторные усилители с высоким КПД / В. Г. Крыжановский – Донецк: Апекс, 2004. – 448 с.
8. Крыжановский В. Г. Методика разработки и характеристики автогенератора класса Е / В. Г. Крыжановский, А. Н. Рудякова, Д. В. Чернов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2002. – № 2. – С. 9-12.
9. Принцовский В. А. Фазовые шумы автогенератора СВЧ класса Е / В. А. Принцовский, В. В. Крыжановский / Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций "РТ-2008": Материалы 4-ой междуна. молодежной научн.-техн. конф. (г. Севастополь, 21-25 апреля 2008 г.). – Севастополь: СевНТУ, 2008. – С. 161.
10. Mediano A. Frequency Limitation of High-Efficiency Class E tuned RF Power amplifier Due to a Shunt Capacitance / A. Mediano, P. Molina / IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. – 1999. – MO4C-4.

Поступала в редакцію 28.04.2010 г.