

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И УСИЛЕНИЕ СИГНАЛОВ

УДК 621.375.026

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ ИНВЕРСНОГО КЛАССА  $F$  ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ ЧИСЛА ГАРМОНИК

В.В. Воронович, главный научный сотрудник ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ, д.т.н.

А.Ю. Потопов, ведущий научный сотрудник ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ, к.т.н.; potapovandrey@mail.ru

Н.В. Рогов, зам. начальника отдела ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ

**Ключевые слова:** усилитель мощности, генератор инверсного класса  $F$ , полигармонический генератор, энергетические характеристики.

**Введение.** Ключевые и полигармонические генераторы в выходных каскадах радиопередатчика широко применяются как средство улучшения энергетических характеристик. В последнее время достаточно большое количество публикаций посвящено высокоэффективным генераторам с внешним возбуждением (усилителям мощности), работающим в так называемом классе  $F$ , а также в инверсном классе  $F$  (для краткости инверсный класс  $F$  обозначают как класс  $F^{-1}$ ) [1, 2]. При работе в классе  $F$  напряжение  $u_k$  на активном элементе в идеальном случае имеет форму меандра, а выходной ток активного элемента  $i_k$  представляет собой положительные полуволны косинусоиды.

Достоинством класса  $F$  является отсутствие выходной мощности на гармониках. Обусловлено оно тем, что в разложении Фурье для напряжения  $u_k$  нет четных гармоник, а для  $i_k$  – нечетных (кроме основной). При работе в классе  $F^{-1}$  формы тока и напряжения дуальны по отношению к классу  $F$ . Очевидно, что при отсутствии потерь в активном элементе и во внешних согласующих цепях КПД генераторов классов  $F$  и  $F^{-1}$  одинаков и равен 1.

В [2] приведены аналитические выражения для КПД, выходной мощности и импеданса нагрузки на основной частоте для генераторов классов  $F$  и  $F^{-1}$  в предположении идеальности упомянутых форм напряжения, тока и при наличии потерь в активном элементе. Там же показано, что при конечном значении сопротивления насыщения активного элемента  $r_{\text{нас}}$  КПД генератора класса  $F^{-1}$  выше, чем у генератора класса  $F$  при одинаковой выходной мощности. В [3] сделан подобный вывод: при фиксированной энергии, потребляемой от источника питания, максимум КПД может быть достигнут при прямоугольной форме тока.

Временные зависимости  $u_k$  и  $i_k$ , близкие к идеальным для классов  $F$  и  $F^{-1}$ , могут быть получены при соответствующем подключении к активному элементу формирующей цепи в виде отрезка длинной линии [4–6]. Однако верхняя рабочая частота таких генераторов ограничена из-за неблагоприятного влияния на энергетические показатели паразитных элементов (в частности, выходной емкости активного элемента и индуктивности выводов).

Известно, что ограничение числа гармоник позволяет снять принципиальные частотные ограничения при реализации высокоэффективных режимов. Результаты моделирования и эксперименты [1, 7] подтверждают возможность создания генераторов инверсного класса  $F$  при ограниченном числе гармоник. Однако результаты этих работ носят качественный характер, что не позволяет делать обобщающие выводы.

Цель статьи – исследование энергетических характеристик генератора инверсного класса  $F$  при ограничении числа

гармоник, участвующих в формировании высокоэффективного режима.

**Модель исследуемого генератора.** Схема исследуемого генератора представлена на рис. 1. При анализе принято условие, что фильтр без потерь, включенный между активным элементом и нагрузкой, обеспечивает протекание в нагрузке синусоидального тока и имеет высокий входной импеданс на высших гармониках. На том же рисунке пунктиром показаны пересчитанные к выходным зажимам активного элемента на частоте 1-й гармоники активная проводимость  $G'_H$  и реактивная часть проводимости нагрузки  $B'_H$ , обусловленная возможной расстройкой фильтра. С учетом этого ток нагрузки можно представить в виде:

$$i_H = I_H \sin(\omega t - \varphi), \quad (1)$$

где  $\varphi = \arctg \frac{B'_H}{G'_H}$  – разность фаз между током нагрузки и 1-й гармоникой коллекторного напряжения;  $\omega$  – круговая частота первой гармоники;  $I_H$  – амплитуда тока нагрузки.

Формирующие двухполосники могут быть реализованы в виде канонических цепей Фостера или Кауэра. Один из вариантов двухполосника изображен на рис. 2.

Проводимость двухполосника в нормированном виде в операторной форме описывается выражением:

$$Y(p) = \frac{(p^2 + 1)(p^2 + 4)(p^2 + 16)}{p(p^2 + 2,25)(p^2 + 9)}, \quad (2)$$

где  $p$  – оператор дифференцирования  $d/d\tilde{t}$  по нормированному времени  $\tilde{t} = \omega t$  при использовании  $Y(p)$  (для символической записи дифференциальных уравнений) или  $j\tilde{\omega}$  – при анализе периодических процессов с нормированной круговой частотой  $\tilde{\omega}$ . В (2) нормированная круговая частота 1-й гармоники  $\tilde{\omega}$  принята равной 1, т.е.  $\tilde{\omega} = \omega / M = 1$ , где  $M$  – положительная постоянная нормирования по частоте.

Конкретный тип двухполосника выбирают на относительно низких частотах с учетом конструктивных соображений и удобства настройки. На высоких частотах становится невозможным пренебрежение такими паразитными параметрами схемы, как выходная емкость активного элемента

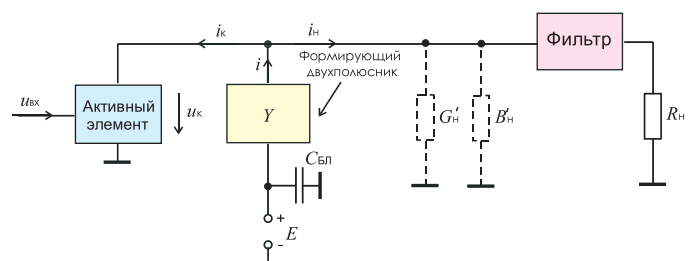


Рис. 1. Принципиальная схема генератора инверсного класса  $F$

и индуктивность коллекторного (стокового) вывода. В этом случае в качестве формирующих двухполюсников целесообразно использовать варианты, позволяющие сделать паразитные параметры элементами двухполюсника.

Синтез таких двухполюсников может быть выполнен по процедуре, описанной в [8]. Нормированные значения элементов  $\tilde{L}_n, \tilde{C}_n$  размерностью соответственно в Гн и Ф, полученные в результате синтеза на основе выражения (2) при условии  $\tilde{\omega} = 1$ , даны на рис.2. Нормированные величины преобразуются в фактические путем их денормирования по формулам:

$$L_n = \frac{N}{M} \tilde{L}_n; \quad C_n = \frac{\tilde{C}_n}{NM}, \quad (3)$$

где  $L_n, C_n$  – фактические значения индуктивности и емкости;  $N$  – положительная постоянная нормирования по уровню.

Заметим, что все последующие выводы, касающиеся частотных свойств, справедливы при использовании формирующих двухполюсников, когда выходную емкость активного элемента можно включить в состав двухполюсника без изменения его структуры.

Нелинейные дифференциальные уравнения, описывающие работу генератора в соответствии со схемой (рис. 1), решали на ЭВМ с помощью системы схемотехнического моделирования PSpice. В результате были найдены временные зависимости токов, напряжений и энергетические характеристики генератора. При проведении расчетов выходной фильтр представлял собой высокочастотный последовательный контур.

Выходную мощность первой гармоники  $P_1$  и КПД вычисляли соответственно по формулам:

$$P_1 = \frac{I_n^2 G_n'}{2[1 + (B_n' / G_n')^2]}, \quad (4)$$

$$\eta = \frac{P_1}{P_0}, \quad (5)$$

где  $P_0 = I_{k0} E$ ;  $I_{k0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_k(\tilde{t}) d\tilde{t}$ .

При проведении исследований активный элемент был представлен в виде кусочно-линейной модели, адаптированной для системы PSpice и подробно описанной в [9]. Данная модель может отражать работу как биполярного, так и МДП-транзистора. Входное напряжение модели  $u_{вх}$  в случае биполярного транзистора имитирует неравновесный управляющий заряд в базе, а в случае МДП-транзистора – напряжение на затворе.

**Энергетические характеристики.** Типичные временные зависимости тока  $i_k$ , напряжения  $u_k$ , подтверждающие наличие высокоэффективного режима в генераторе инверсного класса  $F$ , приведены на рис. 3. Результаты расчетов КПД и выходной мощности в зависимости от добротности  $q$  при  $B_n' = 0$  и  $r_{нас} G_n' = 0,05$  (типичном значении для современных биполярных и МДП-транзисторов) представлены на рис. 4. Выходная мощность  $P_1$  пронормирована к выходной мощности  $P_1^B$  наиболее распространенного генератора класса  $B$ :

$$P_1^B = \frac{1}{2} \left[ E / \left( 2r_{нас} + \frac{1}{G_n'} \right) \right]^2 / G_n'. \quad (6)$$

На рис. 4, а приведена расчетная зависимость КПД для полигармонического генератора, у которого на выходе активного элемента формирующий двухполюсник обеспечивает высокое сопротивление на 1-й и 3-й гармониках и низкое – на 2-й. В зарубежной литературе такие генераторы относятся к генераторам класса  $F$ . Зависимость рассчитана на основе результатов работы [10] при условии равенства мощностей сравниваемых генераторов.

Из рис. 4 видно, что КПД исследуемого генератора заметно выше, чем у генераторов классов  $F$  и  $B$ . Следует заметить, что расчетные зависимости на рис. 4 получены при оптимальных (с точки зрения достижения максимального КПД) углах отсечки. Более подробно влияние угла отсечки на работу генератора будет рассмотрено ниже. При этом необходимо особо отметить, что для получения высокого КПД мощность входного сигнала для генератора класса  $F^{-1}$  должна быть примерно на 3 дБ выше, чем у генератора класса  $F$ .

Зависимости  $P_1/P_1^B$  от  $q$  показывают, что отношение  $P_1/P_1^B$  всегда остается больше 2. Следовательно, повышение КПД при реализации класса  $F^{-1}$  сопровождается увеличением выходной мощности, т.е. более полным использованием активного элемента по мощности.

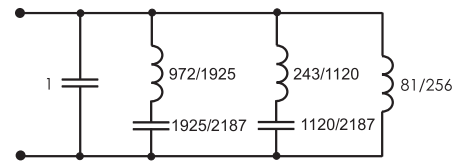


Рис. 2. Формирующий двухполюсник

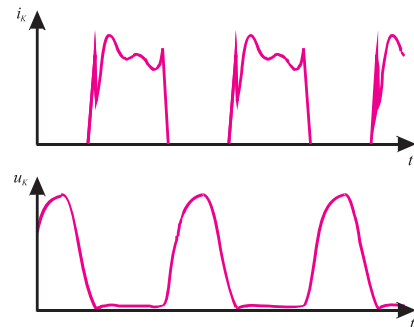


Рис. 3. Временные зависимости тока  $i_k$  и напряжения  $u_k$  при  $r_{нас}/R_n' = 0,05$  и  $q = 0,25$

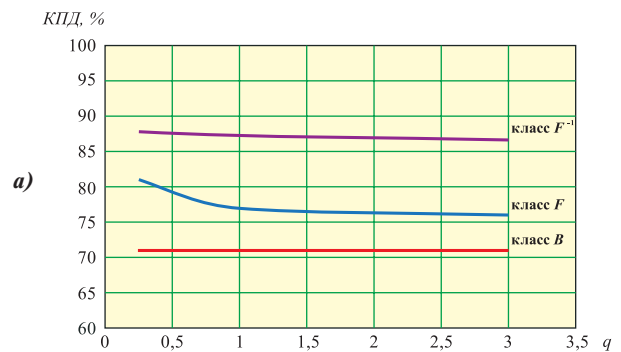


Рис. 4. Зависимость КПД (а) и нормированной мощности  $P_1/P_1^B$  (б) от добротности  $q$

На рис. 5 представлены зависимости КПД и нормированной выходной мощности от относительного значения реактивной расстройки  $B'_H/G'_H$ . Индуктивная расстройка по сравнению со случаем  $B'_H = 0$  незначительно повышает КПД, а ее оптимальное значение, относящееся к максимуму КПД, возрастает с уменьшением добротности  $q$ . Выходная мощность при  $B'_H < 0$  заметно возрастает, что обусловлено увеличением амплитуды 1-й гармоники напряжения на активном элементе.

Приведенные зависимости позволяют определить допустимую реактивную расстройку цепи нагрузки при заданном снижении КПД. Например, если считать удовлетворительным снижение КПД на 2%, то область допустимых расстроек будет лежать в пределах  $-0,3 < B'_H/G'_H < 0,2$ . Расчетная зависимость пик-фактора напряжения на активном элементе показывает, что при изменении  $B'_H/G'_H$  от  $-0,5$  до  $+0,5$  пик-фактор меняется от 2,8 до 3,5.

**Влияние угла отсечки на энергетические характеристики.** С помощью расчетов на ЭВМ установлена связь между энергетическими характеристиками генератора класса  $F^{-1}$  и углом отсечки  $\theta$ . Определено, что КПД имеет максимум при некотором оптимальном угле отсечки  $\theta_{\text{опт}} > 90^\circ$ , отклонение от которого в сторону как увеличения, так и уменьшения приводит к снижению КПД. Это обстоятельство отличает генератор класса  $F^{-1}$  от генераторов класса  $C$ , для которых характерно монотонное увеличение КПД с уменьшением  $\theta$ .

С ростом добротности  $q$  значение  $\theta_{\text{опт}}$  для генератора класса  $F^{-1}$  снижается и при  $q = 0,25; 1; 3$  составляет соответственно  $\theta_{\text{опт}} = 110^\circ; 103^\circ; 100^\circ$  (рис. 6, а). Установлены допустимые отклонения угла отсечки от  $\theta_{\text{опт}}$ , при которых энергетические характеристики генератора ухудшаются незначительно. При снижении КПД на 2% максимально допустимое значение  $\theta$  превышает  $\theta_{\text{опт}}$  на  $10^\circ$  независимо от параметра  $q$ . Допустимое значение  $\theta$  связано с уменьшением выходной мощности и составляет  $8^\circ$  при снижении  $P_1$  на 10% (рис. 6, б).

Расчет пик-фактора коллекторного (стокового) напряжения  $\Pi$  от угла отсечки  $\theta$  показал, что при изменении  $\theta$  в пределах  $90^\circ < \theta < 120^\circ$  пик-фактор  $\Pi$  изменяется незначительно. Так, при  $q = 0,25$  пик-фактор находится в пределах  $3,0 < \Pi < 3,25$ , а при  $q = 1; 3$  – в пределах  $2,5 < \Pi < 2,9$ .

**Диапазонные характеристики.** Диапазонные свойства генератора инверсного класса  $F$  исследованы в предположении, что входная согласующая цепь и выходной фильтр достаточно широкополосны и, следовательно, полоса рабочих частот определяется только формирующим двухполосником.

Расчеты показали, что для генератора с двухполосником, изображенным на рис. 2, относительная полоса рабочих

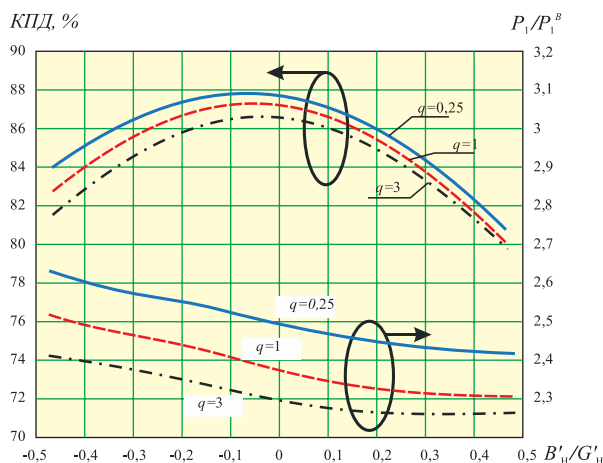


Рис. 5. Зависимость КПД и нормированной выходной мощности от относительного значения реактивной расстройки

частот, в пределах которой  $P_1$  снижается на 10%, составляет 26; 8; 3,5% для добротностей  $q = 0,25; 1; 3$ , что соответствует  $(\Delta\omega/\omega_1)q = 0,065; 0,08; 0,105$ . Эти значения целесообразно сопоставить с предельным, полученным с помощью соотношения Боде [11] для обычного моногармонического генератора с широкополосной фильтрующей цепью:  $(\Delta\omega_{\text{пред}}/\omega_1)q = 2,73$ . Последнее значение получено при потерях мощности на отражение, равных 10%. Это значение существенно превышает аналогичные расчетные значения для исследуемого генератора. Поэтому актуальна постановка отдельной задачи, направленной на улучшение диапазонных свойств генератора инверсного класса  $F$ .

**Эксперимент.** На рис. 7 представлена принципиальная схема оконечного каскада радиопередатчика, выходная цепь которого рассчитана для работы этого каскада в инверсном классе  $F$  на частоте  $\approx 330$  МГц. В качестве активного элемента применен МДП-транзистор PD85015E фирмы ST. Измерение импедансов со стороны подключения транзистора с учетом его выходной емкости дало следующие результаты: при  $f = 330$  МГц значение  $R'_H = 1/G'_H \approx 8$  Ом; при  $f = 660$  МГц импеданс  $Z'_H = (42 + j0,5)$  Ом; при  $f = 990$  МГц импеданс  $Z'_H \approx -j4,5$  Ом.

Приведенные данные показывают, что импеданс на 2-й гармонике существенно превышает сопротивление нагрузки  $R'_H$  на основной частоте, а импеданс на 3-й гармонике – значительно меньше  $R'_H$ . Каскад имеет КПД, равный 80%, при выходной мощности 12 Вт, напряжении питания 12 В и коэффициенте усиления 15 дБ (паспортное значение КПД указанного транзистора составляет 60%). Собранный на таком же транзисторе генератор класса  $F$  (в котором на стоке транзистора подчеркивается 3-я гармоника напряжения, а 2-я минимизируется) при выходной мощности 11,5 Вт имеет КПД  $\approx 73\%$ .

**Заключение.** В нормированном (обобщенном) виде установлена связь энергетических характеристик генератора инверсного класса  $F$  с параметрами его схемы при ограничении числа гармоник, участвующих в формировании высокоэф-

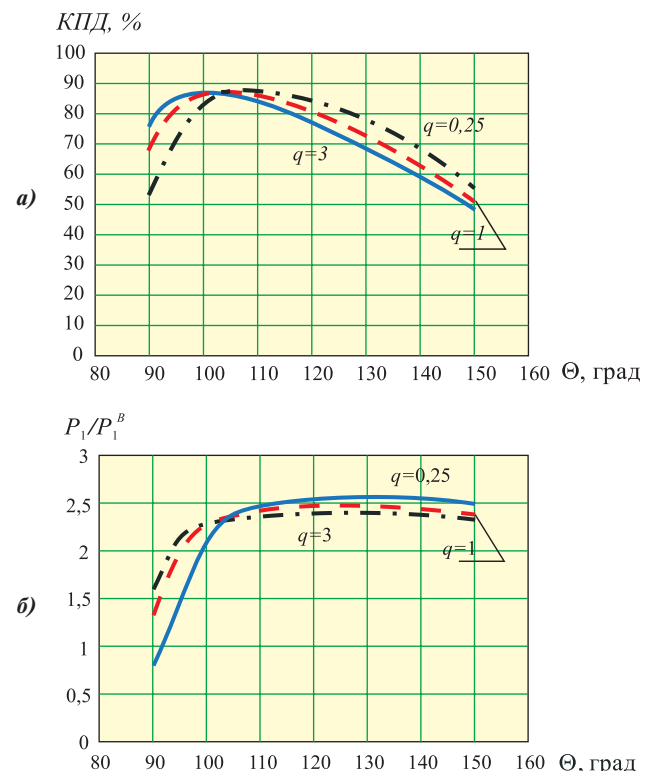


Рис. 6. Зависимости КПД и нормированной мощности от угла отсечки при разных значениях добротности  $q$

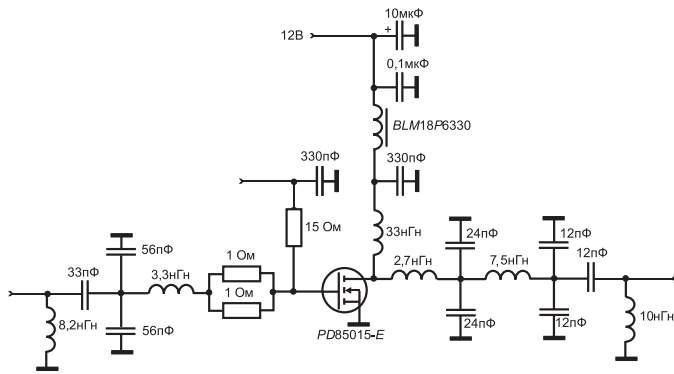


Рис. 7. Схема генератора инверсного класса F

фективного режима. При этом показано, что при наличии потерь в активном элементе КПД генератора инверсного класса F выше, чем у генератора класса F и других генераторов при одинаковой выходной мощности. Теоретические и экспериментальные исследования подтвердили целесообразность изучения и внедрения генераторов инверсного класса F как средства улучшения энергетических характеристик радиоаппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Sheikh A. et al.** Peak Class F and Inverse Class F Drain Efficiencies Using SiLDMOS in Limited Bandwidth Design // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2009. – Vol.19, №7. – P.473–475.

2. **Woo Y., Yang Y.** Analysis and Experiments for High – Efficiency Class-F and Inverse Class-F Power Amplifiers // IEEE Trans Microw Theory Tech. – 2006. – Vol.54, №5. – P.1969–1974.

3. **Попов И.А., Беличенко С.А.** Об оптимальной форме тока в однотактном ключевом генераторе с фильтровой нагрузкой / Сборник статей «Полупроводниковые приборы в технике электросвязи», Вып.25. – М.: Радио и связь, 1985. – С.85–87.

4. **Рааб Ф.** Мощный усилитель на полевом транзисторе // Электроника. – 1976. – Вып.12. – С.57–63.

5. **Борисов В.А., Воронович В.В.** Исследование ключевого режима транзисторного генератора с параллельной формирующей линией // Радиотехника и электроника. – 1988. – Т.31, №8. – С.1590–1597.

6. **Беличенко С.А.** Оптимальный режим однотактного ключевого генератора с фильтровой нагрузкой // Радиотехника. – 1989. – №9. – С.22–23.

7. **Wei C.J. et al.** Analysis and experimental waveform study on inverse class-F mode of microwave power FETS // IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. – June 2000. – P.525–528.

8. **Карни Ш.** Теория цепей. Анализ и синтез: Пер.с англ. под ред. С.Е. Лондона. – М.:Связь, 1973.

9. **Воронович В.В., Потапов А.Ю.** Высокочастотная модификация генератора с формирующей линией // Электросвязь. – 2001. – №5. – С.47–50.

10. **Воронович В.В., Галах В.П.** Исследование полигармонического генератора на биполярном транзисторе при моногармоническом возбуждении // Радиотехника и электроника. – 1997. – Т.42, №1. – С.112–119.

11. **Бодэ Г.** Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью. – М.: Изд-во иностр. лит., 1948. – 641 с.

Получено 26.11.13