

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 621.375.026

DOI: 10.14529/ctcr180109

УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ ИНВЕРСНОГО КЛАССА F – ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО УЛУЧШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ

А.Г. Гадзиковский

Федеральное государственное унитарное предприятие «18 центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации, г. Москва, Россия

Рассмотрены энергетические характеристики усилителя мощности инверсного класса F с ограниченным числом гармоник и определены нагрузочные характеристики данного усилителя. В результате исследований были определены области допустимых значений параметров схемы и режима усилителя мощности, внутри которой сохраняются высокие энергетические показатели.

Ключевые слова: усилитель мощности, генератор инверсного класса F, энергетические характеристики, нагрузочные характеристики, ограничение числа гармоник.

Введение

Одним из путей улучшения энергетических и массогабаритных характеристик мобильных и бортовых радиопередатчиков является реализация в их выходных каскадах высокоэффективных режимов, имеющих более высокие значения КПД и выходной мощности по сравнению с традиционными режимами классов B и C. Среди высокоэффективных усилителей мощности (УМ) особое место занимает УМ инверсного класса F, при работе в котором напряжение на активном элементе в идеальном случае представляет собой полуволны косинусоиды, а выходной ток активного элемента имеет форму меандра. Доказано, что при наличии потерь в активном элементе УМ инверсного класса F при одинаковой выходной мощности обладает преимуществом по КПД перед УМ других классов (D, E, F) благодаря прямоугольной форме тока [1].

Однако принцип действия идеального УМ инверсного класса F предусматривает использование бесконечного ряда гармоник, что обуславливает ограничение их рабочей частоты сверху. Снять подобные принципиальные частотные ограничения позволяет уменьшение числа гармоник, участвующих в формировании высокоэффективного режима, и количества резонансных цепей, обеспечивающих настройку на гармониках. При этом упрощается практическая реализация УМ и его настройка [2]. Кроме того, в литературе, посвященной УМ инверсного класса F, отсутствуют сведения о его нагрузочных характеристиках, что не позволяет определить область изменения сопротивления нагрузки, внутри которой сохраняются высокие энергетические показатели.

В настоящей статье на основе данных, известных из литературы, рассматриваются энергетические характеристики УМ инверсного класса F при ограничении числа гармоник, а также представляются оригинальные результаты, полученные автором по исследованию нагрузочных характеристик таких УМ.

Модель исследуемого усилителя мощности

Схема исследуемого УМ представлена на рис. 1.

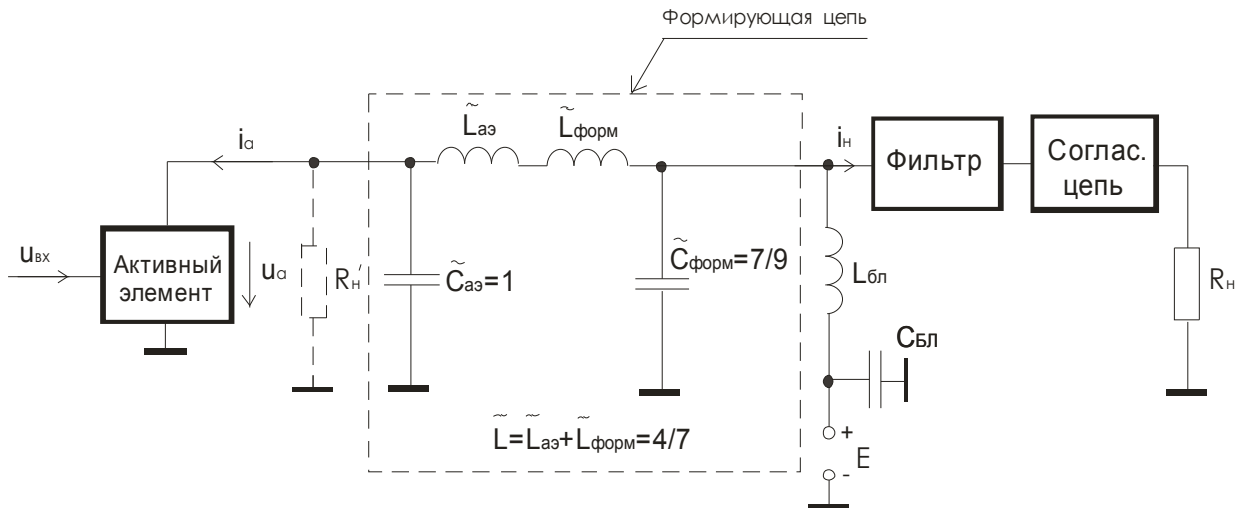


Рис. 1. Схема исследуемого УМ

В общем виде она содержит активный элемент (АЭ), формирующую цепь, фильтр и согласующую цепь. Фильтр обеспечивает развязку на высших гармониках между нагрузкой R_n и формирующей цепью. В состав формирующей цепи помимо формирующей индуктивности $L_{\text{форм}}$ и емкости $C_{\text{форм}}$ включены паразитные параметры активного элемента – его выходная емкость $C_{\text{аз}}$ и индуктивность выходного электрода $L_{\text{аз}}$. Значения элементов размерностью в Гн и Ф даны на рис. 1 в нормированном виде. Фактические значения этих элементов $L_{\text{п}}$, $C_{\text{п}}$ могут быть определены по формулам:

$$L_{\text{п}} = \frac{N}{M} \tilde{L}_{\text{п}};$$

$$C_{\text{п}} = \frac{\tilde{C}_{\text{п}}}{NM},$$

где $\tilde{L}_{\text{п}}$, $\tilde{C}_{\text{п}}$ – нормированные значения элементов;

N – положительная постоянная нормирования по уровню;

$M = \frac{\omega}{\tilde{\omega}}$ – положительная постоянная нормирования по частоте;

ω – круговая частота 1-й гармоники;

$\tilde{\omega} = 1$ – нормированная круговая частота.

Нормированные значения элементов формирующей цепи выбраны таким образом, что на выходных электродах активного элемента на 2-й гармонике ($\tilde{\omega} = 2$) образуется полюс импеданса, а при $\tilde{\omega} = 1,5$ – нуль импеданса.

Согласующая цепь обеспечивает требуемое сопротивление нагрузки R'_n на выходе активного элемента. Элементы $L_{\text{бл}}$ и $C_{\text{бл}}$ являются блокирующими источник постоянного напряжения.

При проведении исследований использовалась кусочно-линейная модель активного элемента, отражающая три его основных состояния: активное состояние, состояние отсечки и состояние насыщения. Модель активного элемента может отражать работу как биполярного, так и МДП-транзистора.

Исследования УМ проводились в среде схемотехнического моделирования PSpice. Результаты расчетов энергетических характеристик в нормированном виде взяты из [2].

Энергетические характеристики

На рис. 2 даны типичные временные зависимости тока активного элемента i_a и напряжения на нем u_a , которые свидетельствуют о наличии высокоэффективного режима.

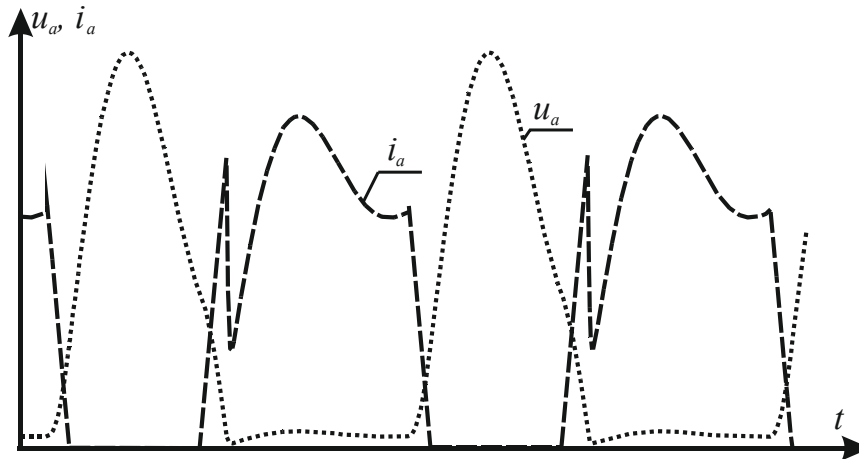


Рис. 2. Временные зависимости тока i_a и напряжения u_a при $r_{нас}/R'_н = 0,05, q = \omega R'_н C_{аэ} = 0,5$

Семейство зависимостей КПД и относительной выходной мощности $P_1/P_{1\text{кр}}^B$ исследуемого УМ от относительной входной мощности $P_{вх}/P_{вх,кр}^B$ представлены на рис. 3, а, б ($P_{1\text{кр}}^B, P_{вх,кр}^B$ – соответственно выходная и входная мощность УМ класса В в критическом режиме).

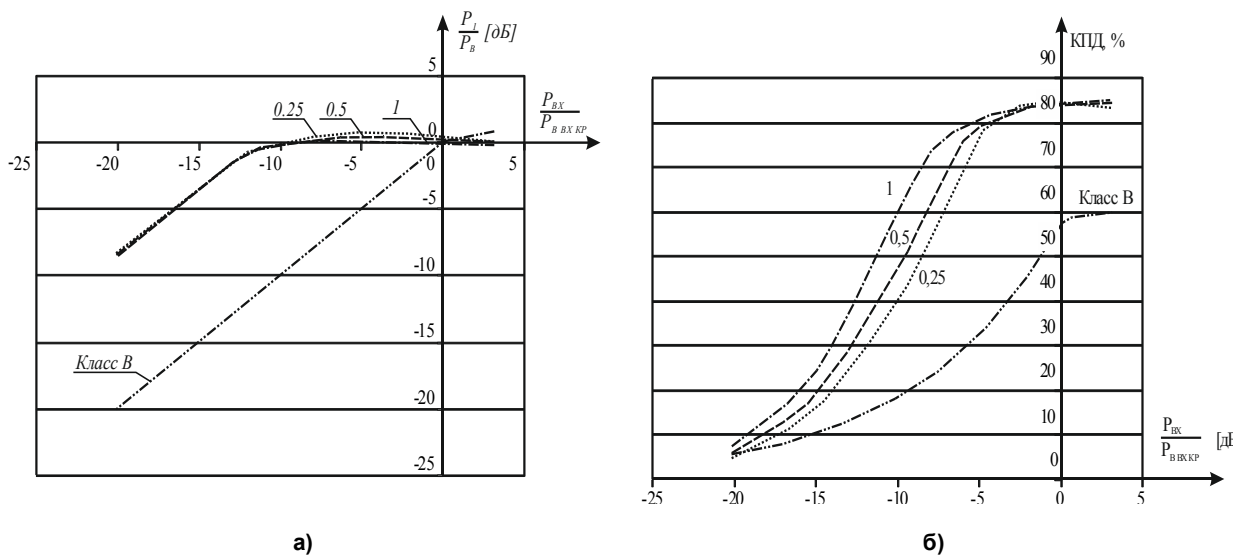


Рис. 3. Амплитудные характеристики

Эти зависимости сняты при разных значениях добротности АЭ $q = \omega R'_н C_{аэ}$, где $R'_н$ – сопротивление нагрузки, пересчитанное к выходу активного элемента. Для сравнения на тех же рисунках показаны амплитудные характеристики генератора класса В. Данные зависимости рассчитаны при $r_{нас}/R'_н = 0,05$, типичном для современных СВЧ транзисторов.

На рис. 4 приведены зависимости КПД от добротности q при нулевой реактивной расстройке на 2-й гармонике и $r_{нас}/R'_н = 0,05$.

Зависимость (1) соответствует идеальному УМ инверсного класса F, использующего для достижения высокого КПД бесконечный ряд гармоник тока и напряжения. Значение КПД такого генератора определяется выражением, полученным с помощью результатов работы [1]:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2}{4} \frac{r_{нас}}{R'_н}}$$

Зависимость (2) относится к полигармоническому УМ инверсного класса F, на выходе активного элемента которого формирующей двухполосник обеспечивает высокие импедансы на

1, 2 и 4-й гармониках и низкий импеданс на 3-й [3]. Зависимость (3) принадлежит исследуемому УМ, на выходе активного элемента которого подчеркивается 2-я гармоника напряжения. На рис. 4 приведена линия (4), соответствующая КПД идеального УМ класса F, использующего в своем принципе действия бесконечный ряд гармоник тока и напряжения. Значение этого КПД рассчитано на основе результатов работы [1] при условии равенства мощностей идеального УМ класса F и идеального УМ инверсного класса F. Из рассмотрения этих зависимостей следует, что, несмотря на относительную простоту реализации, исследуемый УМ лишь незначительно уступает по КПД идеальному УМ инверсного класса F и УМ, при настройке которого контролируются 2, 3 и 4-я гармоники. При этом исследуемый УМ превосходит по КПД не только УМ класса B, но и идеальный УМ класса F.

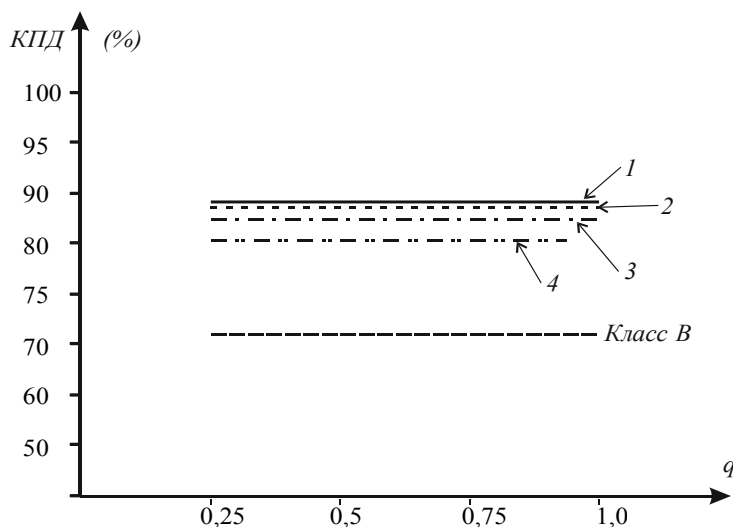


Рис. 4. Зависимости КПД от нагруженной добротности q

Следует заметить, что зависимости (2) и (3) на рис. 4 даны для оптимальных (с точки зрения достижения максимального КПД) углов отсечки. Ниже будет подробно рассмотрено влияние угла отсечки на энергетические характеристики. Обратим внимание также, что зависимости, отраженные на рис. 4, 5, соответствуют уровню входного сигнала $P_{вх}/P_{вх кр}^B = 1$.

С помощью моделирования было определено влияние угла отсечки тока активного элемента на энергетические характеристики. Установлено, что УМ имеет максимальный КПД при некотором оптимальном угле отсечки $\Theta > 90^\circ$ (рис. 5).

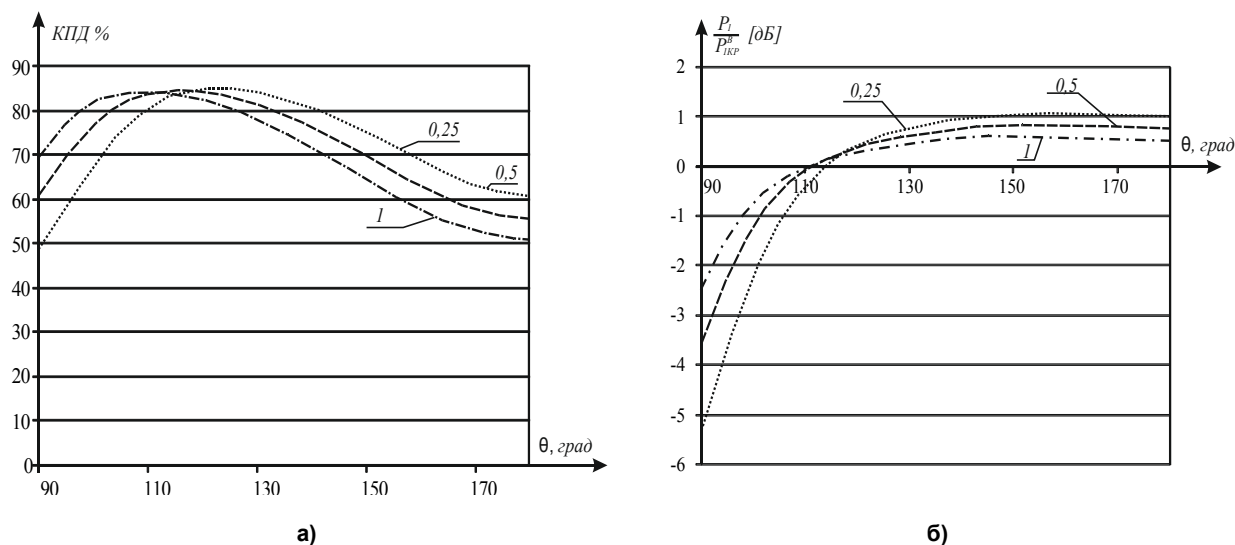


Рис. 5. Зависимости КПД (а) и нормированной мощности (б) от угла отсечки Θ

Для добротностей $q = 0,25; 0,5; 1$ значения оптимальных углов отсечки соответственно составляют $\Theta_{\text{опт}} = 120^\circ; 115^\circ; 110^\circ$. Допустимое уменьшение угла отсечки от оптимального значения связано с падением выходной мощности и составляет $\approx 10^\circ$ при снижении мощности на $\approx 0,5$ дБ. Допустимое отклонение угла отсечки в большую сторону от оптимального составляет $\approx 15^\circ$ при снижении КПД на 5 %.

Расчет нагрузочных характеристик

В настоящей работе было проведено также исследование нагрузочных характеристик усилителя мощности инверсного класса F. В ходе работы были рассчитаны нагрузочные характеристики в виде линий равного КПД и линий одинаковой мощности, представленные на плоскости комплексной проводимости нагрузки (рис. 6, 7). Кроме того, были определены величины пикфактора напряжения на активном элементе в различных точках комплексной плоскости проводимостей нагрузки (рис. 8).

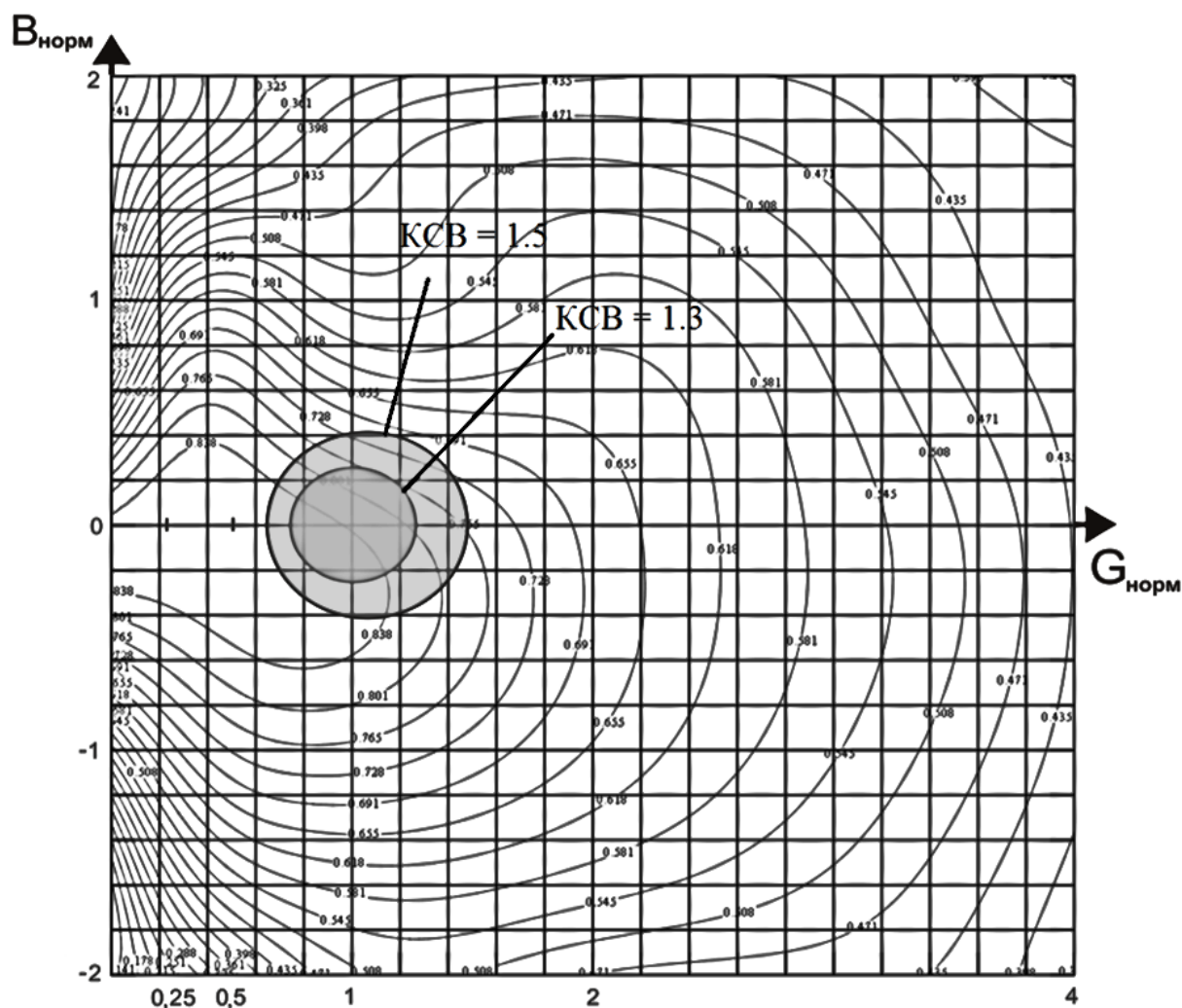


Рис. 6. Результаты расчетов нагрузочных характеристик в виде линий равного КПД

Оси проводимостей нагрузки нормированы к расчетному значению активной проводимости нагрузки $G'_н$, определяемому из условия равенства мощностей УМ класса В и УМ идеального инверсного класса F [2]. Анализируя представленные данные, следует отметить, что наибольший КПД может быть получен при небольшой индуктивной расстройке реактивной проводимости нагрузки. Кроме того, на данном рисунке нанесены линии равного КСВ – 1,3 и 1,5 соответственно. Согласно полученным данным, при изменении КСВ нагрузки в пределах от 1 до 1,5 сохраняется достаточно высокий уровень КПД и мощности.

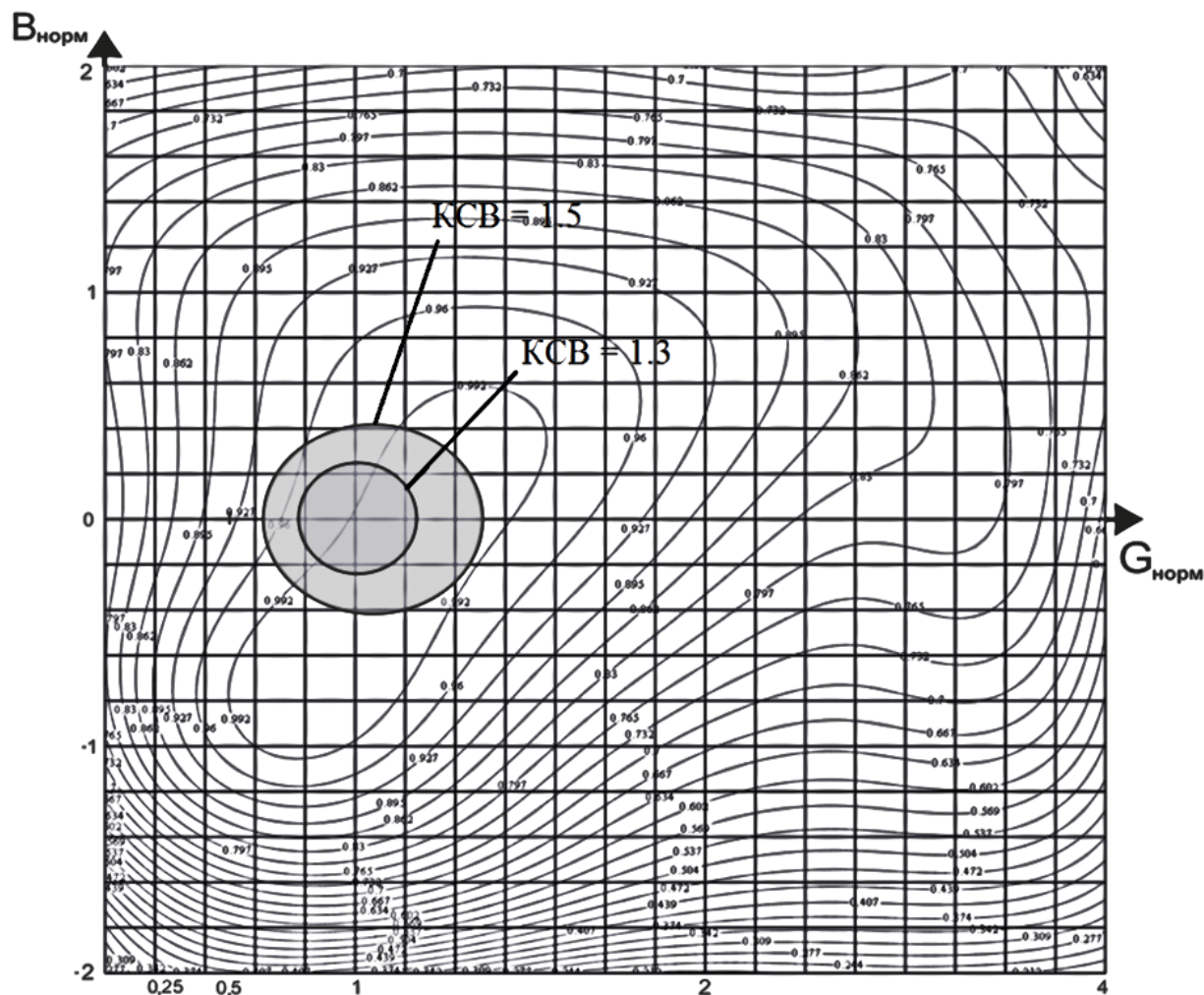


Рис. 7. Результаты расчетов нагрузочных характеристик в виде линий равной выходной мощности, нормированной к её максимальному значению

Согласно представленным данным максимальный уровень мощности достигается при небольшой индуктивной расстройке ($-0,5 < V_{\text{норм}} < -0,1$) и повышенной проводимости активной нагрузки, что не совпадает с областью максимального КПД.

Представленные результаты также показывают, что при изменении КСВ в пределах 1,5 изменение выходной мощности для данного режима усиления составляет не более 7,5 %, а КПД может уменьшаться до 18 %, относительно значения, соответствующего КСВ, равному 1. При КСВ, равном 1,3, изменение выходной мощности соответственно составляет 3,7 % при возможном уменьшении КПД на 10,7 %. Следует также упомянуть, что для изучаемого УМ характерен довольно высокий пик-фактор напряжения на выходном электроде активного элемента.

Из рассмотрения рис. 8, что при изменении КСВ нагрузки в пределах 1,5 значение пик-фактора напряжения изменяется в пределах от 3,1 до 3,9, а при изменении КСВ нагрузки в пределах 1,3 – от 3,2 до 3,7. При более существенной расстройке нагрузки ($KCB > 4$), характерной для аварийной работы усилителя мощности, пик-фактор может составлять 5 и более. Такое высокое значение пик-фактора создает определенные трудности при реализации данного режима, однако с появлением транзисторов на основе GaN, имеющих относительно высокие пробивные напряжения, либо при использовании развязывающих вентилях, это перестает быть серьезной проблемой.

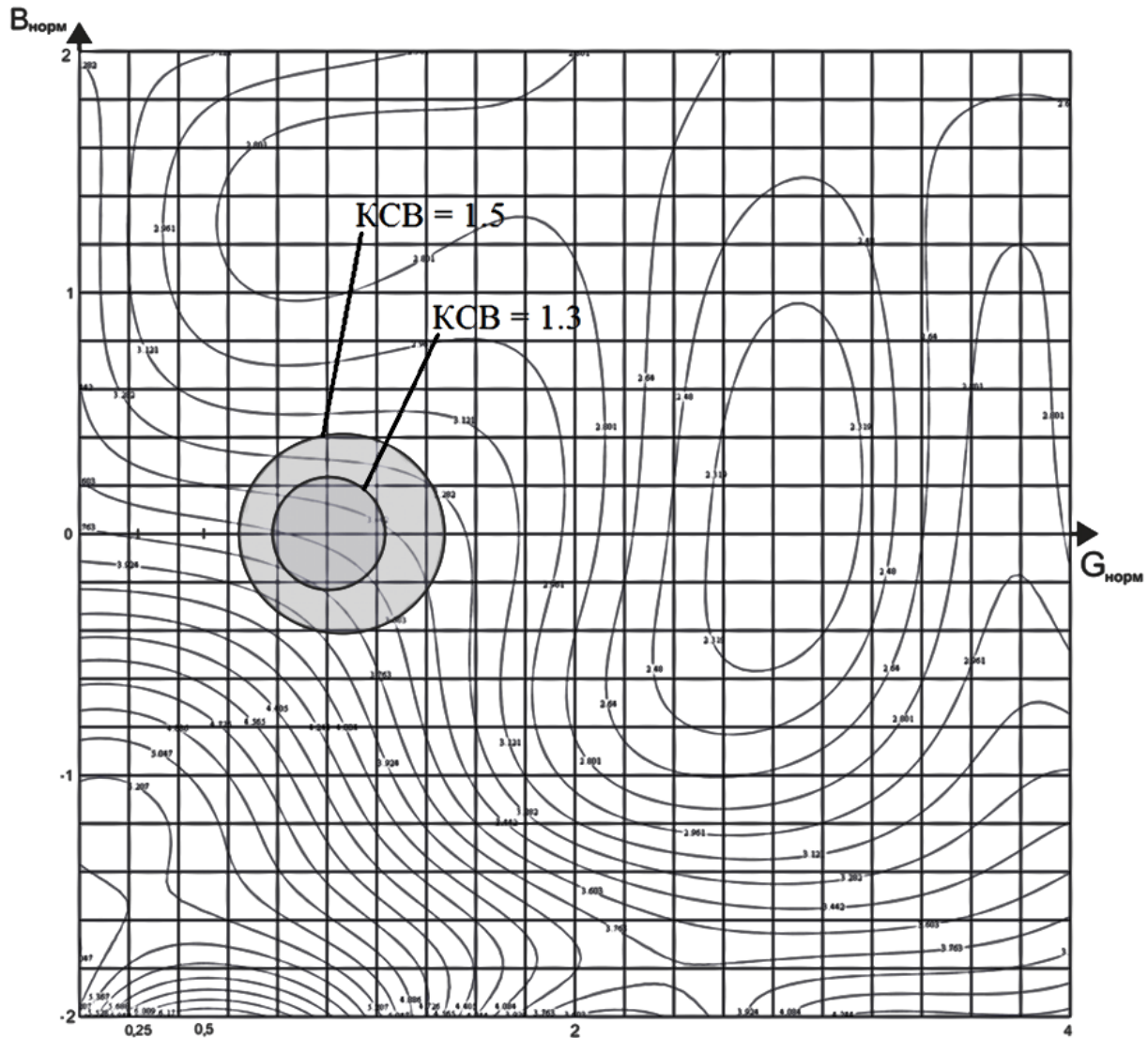


Рис. 8. Результаты расчетов линий равного пик-фактора напряжения на комплексной плоскости проводимости нагрузки

Заключение

Представленный УМ, благодаря высокой энергетической эффективности и простоте реализации может получить широкое распространение. Полученные нагрузочные характеристики показывают, что чувствительность исследуемого УМ к изменению нагрузки примерно такая же, как и у наиболее распространенных УМ классов В и С. Применение инверсного режима класса F в выходных каскадах радиопередатчиков позволяет за счет уменьшения энергопотребления снизить массу и габариты устройств, в которых используются радиопередатчики. Полученные результаты представлены в нормированном виде и могут быть взяты за основу при проектировании высокоэффективных УМ.

Литература

1. Woo, Y. *Analysis and Experiments for High-Efficiency Class-F and Inverse Class-F Power Amplifiers* / Y. Woo, Y. Yang // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2006. – Vol. 54, no. 5. – P. 1969–1974. DOI: 10.1109/TMTT.2006.872805

2. Воронович, В.В. *Исследование полигармонического усилителя мощности с высоким импедансом нагрузки на 2-й гармонике* / В.В. Воронович, А.Ю. Потапов, В.А. Кузьмин // *Электросвязь*. – 2015. – № 8. – С. 25–29.

3. Воронович, В.В. Энергетические характеристики усилителя мощности инверсного класса F при ограничении числа гармоник / В.В. Воронович, А.Ю. Потапов, Н.В. Рогов // *Электросвязь*. – 2013. – № 8. – С. 40–43.

Гадзиковский Артур Геннадьевич, научный сотрудник, Федеральное государственное унитарное предприятие «18 центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации, г. Москва; argad92@gmail.com, fgup18cnii@bk.ru.

Поступила в редакцию 27 июня 2017 г.

DOI: 10.14529/ctcr180109

INVERSE CLASS-F POWER AMPLIFIERS – EFFICIENT IMPROVING INSTRUMENT OF RADIO TRANSMITTER ENERGY CHARACTERISTICS

A.G. Gadzikovskiy, argad92@gmail.com, fgup18cnii@bk.ru

Federal State Unitary Enterprise “18 Central Research and Development Institute” of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

This paper describes energy characteristics of inverse class-F power amplifier with limited quantity of harmonics and defines load characteristics for this type of amplifiers. As a result of the research, allowed ranges of parameter values for class and scheme are defined, where high energy characteristics are saved.

Keywords: power amplifier, inverse class-F generator, energy characteristics, load characteristics, harmonic quantity limitation.

References

1. Woo Y., Yang Y. [Analysis and Experiments for High-Efficiency Class-F and Inverse Class-F Power Amplifiers]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, vol. 54, no. 5, pp. 1969–1974. DOI: 10.1109/TMTT.2006.872805
2. Voronovich V.V., Potapov A.Yu., Kuz'min V.A. [Research of the Polyharmonic Power Amplifier with a High Impedance of Loading on the 2nd Harmonica]. *Telecommunication*, 2015, no. 8, pp. 25–29. (in Russ.)
3. Voronovich V.V., Potapov A.Yu., Rogov N.V. [Power Characteristics of the Power Amplifier of an Inverse Class F at Restriction of Number of Harmonicas]. *Telecommunication*, 2013, no. 8, pp. 40–43. (in Russ.)

Received 27 June 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гадзиковский, А.Г. Усилители мощности инверсного класса F – эффективное средство улучшения энергетических характеристик радиопередатчиков / А.Г. Гадзиковский // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 75–82. DOI: 10.14529/ctcr180109

FOR CITATION

Gadzikovskiy A.G. Inverse Class-F Power Amplifiers – Efficient Improving Instrument of Radio Transmitter Energy Characteristics. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 75–82. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180109