

ТЕОРИЯ ЦЕПЕЙ

УДК.621.375.026

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ С ВЫСОКИМ ИМПЕДАНСОМ НАГРУЗКИ НА 2-Й ГАРМОНИКЕ

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

В. А. Кузьмин, старший научный сотрудник ФГУП «18 ЦНИИ»

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

Приводятся результаты исследования высокоэффективного усилителя мощности (УМ), на выходе активного элемента которого обеспечивается высокий импеданс на 2-й гармонике основного колебания. В нормированном виде установлена связь энергетических характеристик с параметрами схемы и режима УМ. Показано, что несмотря на относительную простоту реализации, данный УМ имеет преимущество по КПД перед УМ класса В и F при одинаковой выходной мощности.

Ключевые слова: полигармонический усилитель мощности, инверсный класс F, энергетические характеристики.

Введение. До настоящего времени сохраняется интерес к высокоэффективным ключевым и полигармоническим усилителям мощности (УМ), применение которых в радиопередатчиках позволяет снизить рассеиваемую мощность, повысить КПД и улучшить массогабаритные характеристики. Среди высокоэффективных УМ особое место занимают УМ инверсного класса F, при работе в котором напряжение на активном элементе в идеальном случае представляет положительные 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 другими УМ (классов В, С, Е, F и пр.) благодаря прямоугольной форме тока [1]. Подобный вывод был сделан в [2].

Принцип действия идеального УМ инверсного класса F предусматривает использование бесконечного ряда гармоник, что обуславливает ограничение их рабочей частоты сверху. Уменьшение числа гармоник, участвующих в формировании высокоэффективного режима и количества резонансных цепей, обеспечивающих настройку на гармониках, позволяют существенно упростить практическую реализацию и регулировку УМ, а также снять принципиальные частотные ограничения.

В экспериментальной работе [3] была впервые показана возможность реализации бигармонического режима с повышенным КПД в транзисторном УМ (на частоте 100 кГц) при использовании в коллекторной цепи дополнительного контура, настроенного на 2-ю гармонику. Известны транзисторные УМ с бигармоническим возбуждением, в которых высокие значения КПД достигаются за счет увеличения коэффициента использования коллекторного тока [4, 5]. Однако у таких УМ достаточно сложная цепь возбуждения.

В [6] предлагается техническое решение УМ инверсного класса F (используется в архитектуре Догерти), в котором цепь, состоящая из нескольких отрезков однородных линий, обеспечивает на выходных электродах транзистора полюс импеданса на 2-й гармонике и нуль импеданса на 3-й. Такой УМ на частоте 2,14 ГГц имеет КПД, равный 82,1%, при выходной мощности 22,4 Вт.

Необходимо отметить, что в работах, посвященных УМ инверсного класса F, сведения о подобных УМ носят неполный характер, например, отсутствуют данные о диапазонных и нагрузочных характеристиках, не рассмотрено влияние угла отсечки на энергетические показатели.

В статье представляются результаты исследования УМ, на выходе активного элемента которого по 2-й гармонике обеспечивается режим, близкий к холостому ходу, а высшие гармоники (по номеру выше второй) ослабляются благодаря фильтрующим свойствам выходной емкости активного элемента. При этом уплощенная форма тока активного элемента позволяет на высоких частотах иметь конкурентное преимущество такого УМ по КПД перед УМ других классов. Кроме того, активный элемент в данном УМ возбуждается по входу моногармоническим воздействием, и входная цепь не требует усложнения.

Исходная модель. Схема изучаемого УМ представлена на рис. 1.

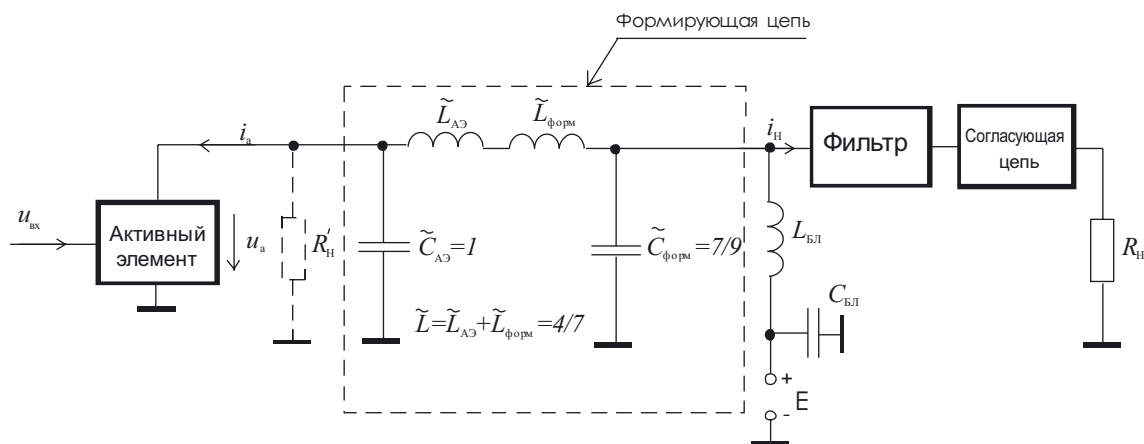


Рис. 1. Схема исследуемого УМ

В качестве фильтра в схеме использован высокодобротный последовательный контур, настроенный на частоту входного сигнала. Фильтр обеспечивает развязку на высших гармониках между нагрузкой R_n и формирующей цепью. В состав формирующей цепи помимо формирующих 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_n и C_n могут быть определены по формулам:

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

где \tilde{L}_n, \tilde{C}_n — 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 $\tilde{\omega} = 1,5$ — его нуль. Выбор нулевого импеданса при $\tilde{\omega} = 1,5$ сделан для получения приемлемых диапазонных характеристик исследуемого УМ. Речь об этом пойдет ниже.

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

При проведении исследований использовалась кусочно-линейная модель активного элемента, отражающая три его основных состояния: активное, отсечки и насыщения. Модель активного элемента может отражать работу как биполярного, так и МДП-транзистора. В случае МДП-транзистора входное напряжение $u_{\text{вх}}$ соответствует напряжению на затворе, а в случае биполярного имитирует неравновесный базовый заряд. Данная модель подробно рассмотрена в [7]. Исследования УМ проводились в среде схемотехнического моделирования PSpice.

Энергетические характеристики. На рис. 2 показаны типичные временные зависимости тока активного элемента i_a и напряжения u_a , свидетельствующие о наличии высокоэффективного режима.

Семейства зависимостей относительной выходной мощности $P_1/P_{1\text{кр}}^B$ и КПД исследуемого УМ от относительной входной мощности $P_{\text{вх}}/P_{\text{вх,кр}}^B$ представлены на рис. 3, а и б

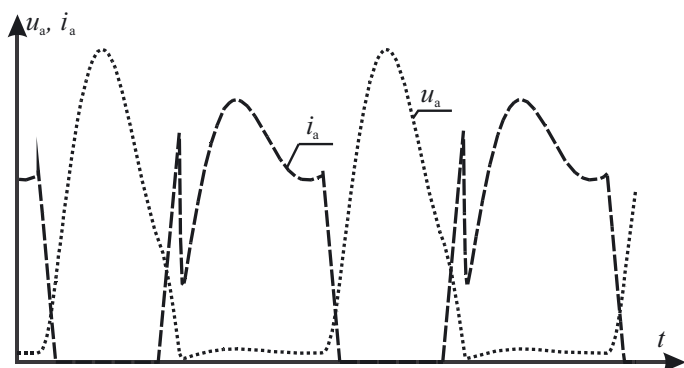
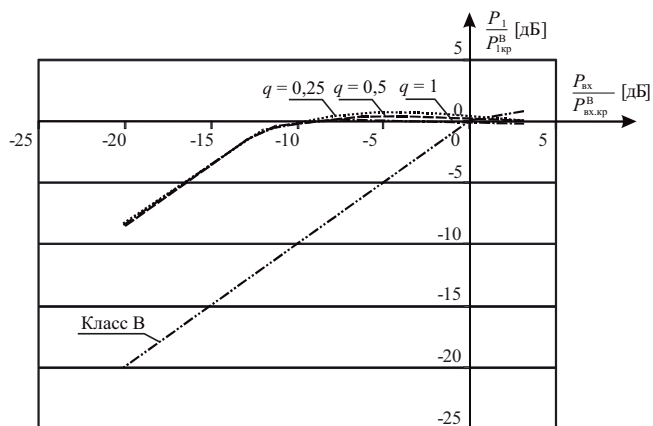
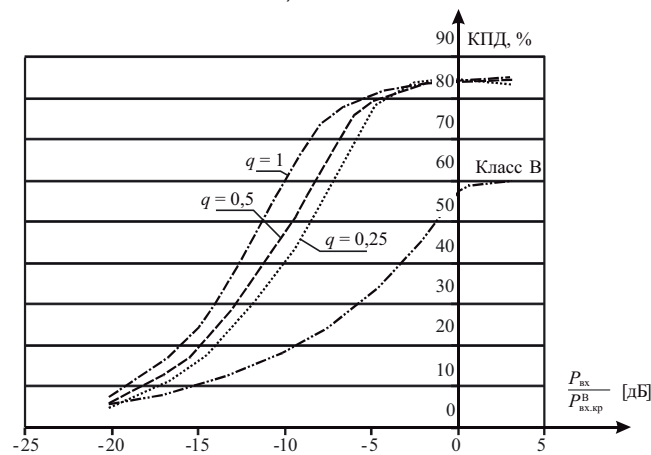


Рис. 2. Временные зависимости тока i_a и напряжения u_a при $r_{\text{нас}}/R'_n = 0,05; q = \omega R'_n C_{\text{аз}} = 0,5$



а)



б)

Рис. 3. Амплитудные характеристики

($P_{1\text{кр}}^B, P_{\text{вх,кр}}^B$ — соответственно выходная и входная мощность УМ класса В в критическом режиме).

Зависимости сняты при разных значениях добротности $q = \omega R'_n C_{\text{аз}}$, где R'_n — сопротивление нагрузки, пересчитанное к выходу активного элемента. Для сравнения на тех же рисунках показаны амплитудные характеристики УМ класса В. Данные зависимости рассчитаны при $r_{\text{нас}}/R'_n = 0,05$, типичном для современных СВЧ-транзисторов. При построении амплитудных характеристик сопротивление нагрузки УМ класса В R_n^B рассчитывалось из условия равенства мощностей УМ класса В в критическом режиме ($P_{1\text{кр}}^B$) и идеального УМ инверсного класса F ($P_1^{F\text{инв}}$), наиболее близкого по характеристикам к изучаемому УМ. Значения этих мощностей определяются выражениями:

$$P_{1\text{кр}}^B = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{R_n^B + 2r_{\text{нас}}} \right)^2 R_n^B;$$

$$P_1^{F\text{инв}} = \frac{\pi^2}{8} \left(\frac{E}{R'_n + \frac{\pi^2}{4} r_{\text{нас}}} \right)^2 R'_n.$$

Последнее выражение для $P_1^{F\text{инв}}$ легко получить на основе [1]. Из анализа зависимостей, приведенных на рис. 3, следует, что рассматриваемый УМ при уровне входной мощности $P_{\text{вх}}/P_{\text{вх,кр}}^B = (0 \pm 2)$ дБ обладает на 20–25% большим КПД по сравнению с УМ класса В в критическом режиме.

На рис. 4 приведены зависимости относительного тока потребления I_0 исследуемого УМ от уровня входного сигнала

ла. Зависимости пронормированы к току потребления УМ класса В в критическом режиме:

$$I_o^B = \frac{E - \sqrt{E^2 - 16P_{\text{кр}}^B r_{\text{нас}}}}{2\pi r_{\text{нас}}}$$

Характерной особенностью этих зависимостей является монотонное уменьшение потребляемого тока с ростом уровня входного сигнала.

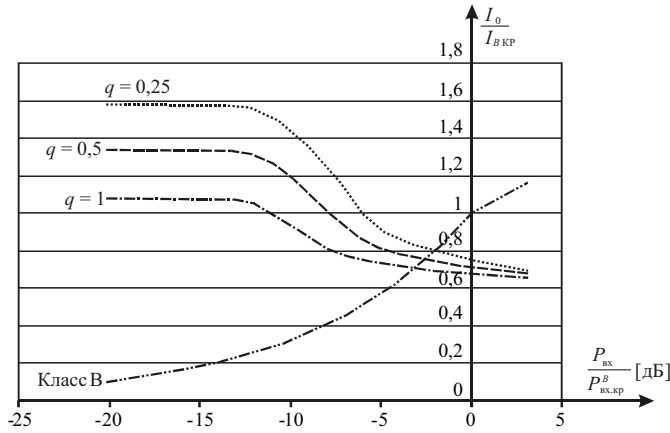


Рис. 4. Зависимости относительного значения тока потребления от уровня входного сигнала

На рис. 5 показаны зависимости КПД от добротности q при нулевой реактивной расстройке на 2-й гармонике и $r_{\text{нас}}/R'_H = 0,05$.

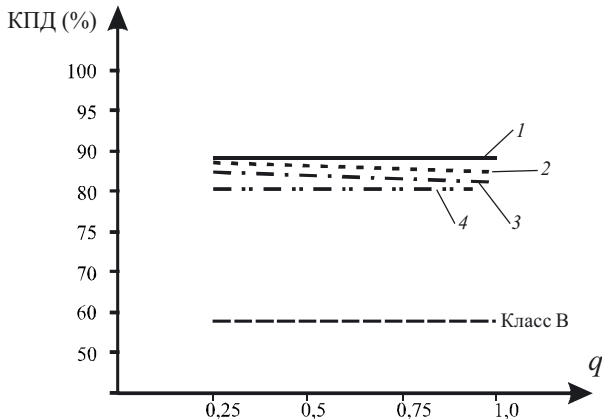


Рис. 5. Зависимости КПД от нагруженной добротности q

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

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

Кривая 2 относится к полигармоническому УМ инверсного класса F, на выходе активного элемента которого формирующий двухполюсник обеспечивает высокие импедансы на 1-, 2- и 4-й гармониках и низкий импеданс на 3-й [8]. Зависимость 3 принадлежит исследуемому УМ, на выходе активного элемента которого подчеркивается 2-я гармоника напряжения. На том же рисунке приведена линия 4, соответствующая КПД идеального УМ класса F, базирую-

щегося на бесконечном ряде 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 зависимостей рис. 5 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 В (при условии равенства мощностей), но и идеальный УМ класса F.

Следует заметить, что зависимости 2 и 3 на рис. 5 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. 5–7, соответствуют уровню входного сигнала $P_{\text{вх}}/P_{\text{вх.кр}}^B = 1$.

Влияние угла отсечки. 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. 6).

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.

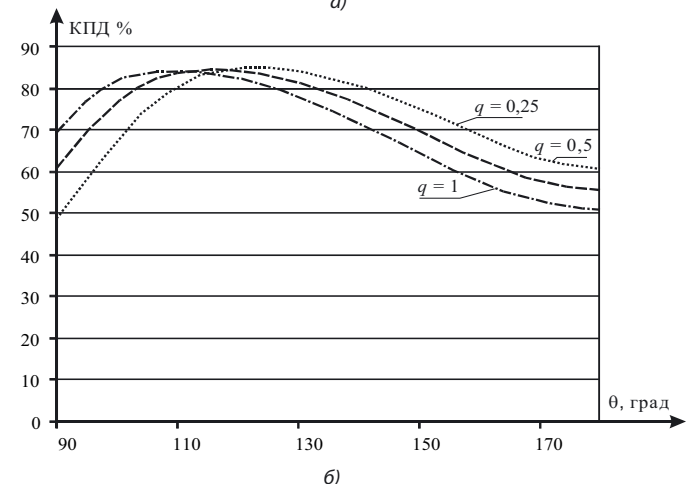
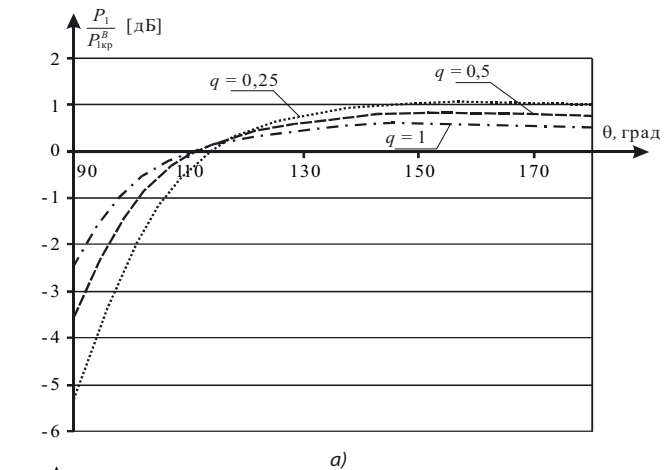


Рис. 6. Зависимости нормированной мощности (а) и КПД (б) от угла отсечки θ

Допустимое отклонение угла отсечки в большую от оптимального значения сторону составляет $\approx 15^\circ$ при снижении КПД на 5%. Расчет пик-фактора $P = \frac{u_{a\text{ макс}}}{E}$ ($u_{a\text{ макс}}$ — максимальное напряжение на активном элементе) показал, что при изменении угла отсечки в указанных допустимых пределах пик-фактор изменяется незначительно. Так, при $q = 0,25$ пик-фактор $3,3 < P < 3,9$; при $q = 0,5$ составляет $3 < P < 3,6$, а при $q = 1$ лежит в пределах $2,9 < P < 3,3$.

Влияние реактивной расстройки. На рис. 7 представлены зависимости энергетических характеристик от относительного значения реактивной расстройки B'_n/G'_n (здесь $G'_n = 1/R'_n$, B'_n — значение реактивной расстройки на выходных электродах активного элемента). Индуктивная расстройка незначительно (на 1,5–2%) повышает КПД относительно значения КПД при $B'_n = 0$.

Зависимости на рис. 7 позволяют оценить область допустимых реактивных расстроек при заданном снижении КПД. Так, при снижении КПД на 2–2,5% допустимые реактивные расстройки лежат в пределах $-0,5 < B'_n/G'_n < 0,05$. Расчет пик-фактора напряжения на активном элементе показывает, что при таких допустимых расстройках пик-фактор находится в следующих пределах: при $q = 0,25$ значение $3,3 < P < 4,4$; при $q = 0,5$ составляет $3,1 < P < 3,9$; при $q = 1$ лежит в пределах $2,9 < P < 3,4$.

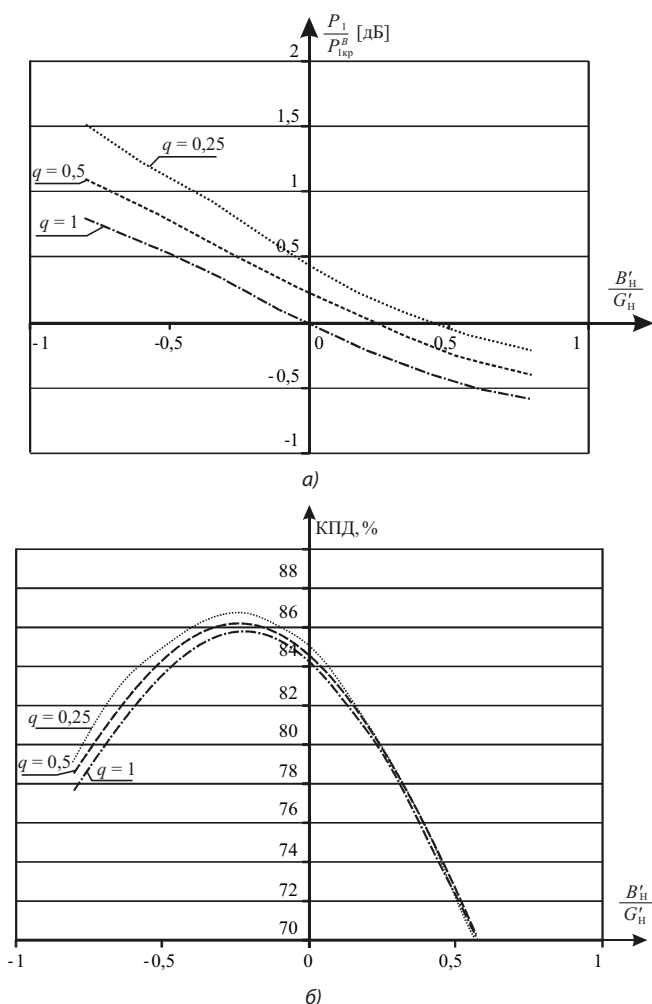


Рис. 7. Зависимости нормированной мощности (а) и КПД (б) от относительного значения реактивной расстройки

Диапазонные свойства. При исследовании диапазонных характеристик модели УМ предполагалось, что выходной фильтр и согласующая цепь достаточно широкополосны и не определяют рабочую полосу частот УМ. Широкополосность фильтра при расчетах обеспечивалась настройкой в резонанс последовательного колебательного контура в каждой частотной точке. При этом согласующая цепь сохраняла в полосе частот постоянное активное сопротивление нагрузки на выходе активного элемента. При таких условиях ограничение рабочей полосы частот определялось только формирующей цепью за счет изменения импедансов на высших гармониках при перестройке частоты.

Анализ полученных диапазонных характеристик показал, что относительная полоса рабочих частот, определяемая по снижению КПД на 5% и выходной мощности на 0,5 дБ, составляет 20, 14 и 8%, соответственно, для добротностей $q = 0,25$; 0,5 и 1. Полученные значения полосы частот достаточны для многих практических применений, однако они существенно уступают значениям, которые можно рассчитать с помощью соотношения Боде [9] для обычного моногармонического УМ с широкополосными согласующими цепями при тех же добротностях. В связи с этим целесообразно проведение отдельной работы, направленной на улучшение диапазонных свойств.

Эксперимент. Схема экспериментального макета представлена на рис. 8. В качестве активного элемента использован НЕМТ-транзистор CGH40025 фирмы CREE. Индуктивные элементы выходной цепи выполнены в виде отрезков полосковых линий. Полосковые элементы условно обозначены на схеме прямоугольниками, рядом с которыми даны их электрические параметры: фазовая длина в градусах и волновое сопротивление. Расчетные значения импедансов выходной цепи со стороны подключения транзистора с учетом его выходной емкости составляют: при $f = 1,3$ ГГц сопротивление $R'_n = 32$ Ом; при $f = 2,6$ ГГц импеданс $Z'_n \approx -j300$ Ом; при $f = 3,9$ ГГц — $Z'_n \approx -j15$ Ом.

На частоте 1,3 ГГц макет УМ имеет КПД, равный 82% при напряжении питания 32 В, выходной мощности 21 Вт и коэффициенте усиления ≈ 16 дБ. При этом паспортное значение КПД выбранного транзистора составляет 62%.

Заключение. В исследованном полигармоническом УМ на выходе активного элемента выделяется напряжение 2-й гармоники. Представленный УМ по своим энергетическим характеристикам лишь незначительно уступает идеальному УМ инверсного класса F, имеющему преимущество по КПД перед другими УМ при наличии потерь в активном элементе.

Благодаря высокой энергетической эффективности и простоте реализации, такой УМ может получить широкое распространение. Появление новых мощных НЕМТ-транзисторов с небольшой выходной емкостью позволит создать полигармонические УМ инверсного класса F в СВЧ-диапазоне.

Согласно систематизированной классификации, предложенной в [10], представленный УМ при нагруженной добротности $q > 0,5$ можно отнести к бигармоническому УМ инверсного класса F, поскольку в этом случае высшие гармоники (больше 2-й) ослаблены и не оказывают заметного влияния на энергетические характеристики. При $q < 0,5$ роль высших гармоник становится заметной, и УМ следует классифицировать как полигармонический УМ инверсного класса F.

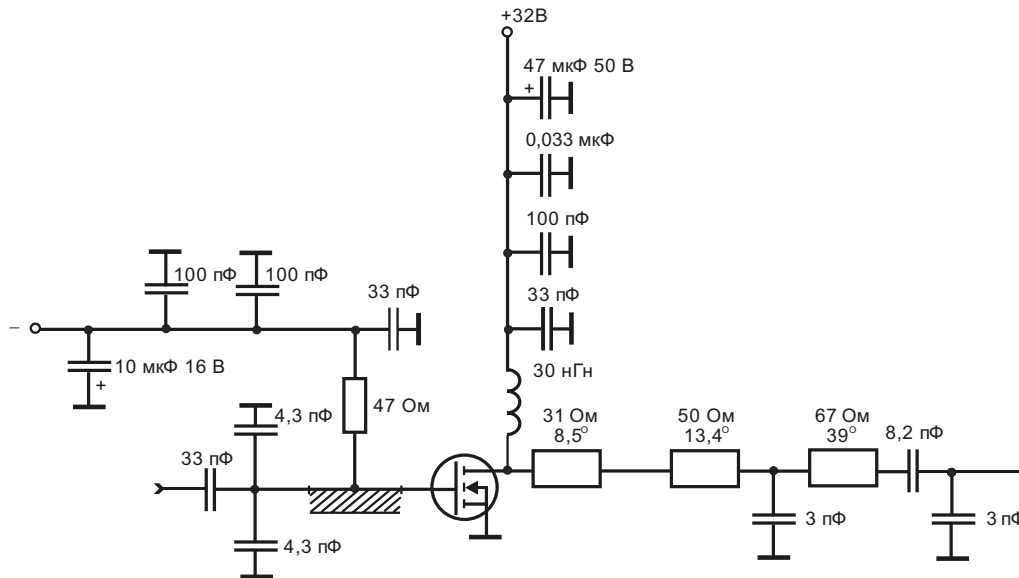


Рис. 8. Схема экспериментального макета

ЛИТЕРАТУРА

1. **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.
2. **Попов И. А., Беличенко С. А.** Об оптимальной форме тока в одноконтурном ключевом генераторе с фильтровой нагрузкой // Сб. статей «Полупроводниковые приборы в технике электросвязи», Вып.25.— М.: Радио и связь, 1985.— С.85–87.
3. **Берман Л. С.** Повышение полезной мощности резонансного полупроводникового усилителя путем повышения его КПД, ч. II // Радиотехника.— 1958.— Т. 13, № 3.— С.70–73.
4. **Бердыев В. С., Петров Б. Е.** Исследование транзисторного усилителя мощности в бигармоническом режиме // Электронная техника. Сер.10. Микроэлектронные устройства.— 1986.— Вып.3 (57).— С.14–22.
5. **Бердыев В. С., Петров Б. Е.** КПД усилителя мощности на биполярном транзисторе при бигармоническом возбуждении и негармонической форме напряжения на коллекторе // Электронная техника. Сер.10. Микроэлектронные устройства.— 1988.— Вып.1 (67).— С.36–41.
6. **Grebennikov A.** High — Efficiency Advanced Multistage Doherty GaN HEMT Power Amplifiers // RF Technology International.— February 2012.
7. **Воронович В. В., Потапов А. Ю.** Высокочастотная модификация генератора с формирующей линией // Электросвязь.— 2001.— № 5.— С.47–50.
8. **Воронович В. В., Потапов А. Ю., Рогов Н. В.** Энергетические характеристики усилителя мощности инверсного класса F при ограничении числа гармоник // Электросвязь.— 2013.— № 8.— С.40–43.
9. **Бодэ Г.** Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью.— М.: Изд-во иностр. лит., 1948.— 641с.
10. **Алипов А. С., Козырев В. Б.** Систематизированная классификация транзисторных усилителей мощности // Электросвязь.— 2006.— № 10.— С.37–43.

Получено 18.02.14

ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРА!



60-летие со дня рождения отмечает исполнительный директор МОКС «ИНТЕРСПУТНИК» **Виктор Сергеевич Вешунов**.

В. С. Вешунов родился 22 января 1955 г. в столице США Вашингтоне, где его отец работал первым секретарем посольства СССР. В 1977 г. окончил Московский государственный институт международных отношений. С 1977 по 1993 г. работал в системе Министерства иностранных дел СССР, а затем МИД России, в том числе в Посольстве СССР в Индии. С переходом в отдел между-

народного сотрудничества в области мирного использования космоса Управления международного научно-технического сотрудничества МИД РФ его карьера дипломата перешла в новую плоскость — космическую. Следующий виток — с престижной должности заведующего отделом МИДа России, где он занимался, в частности, подготовкой соглашений Роскосмоса по сотрудничеству в области космоса, на работу в Международную организацию космической связи «ИНТЕРСПУТНИК», где прошел по служебной лестнице от эксперта до исполнительного директора.

За годы работы в МОКС «ИНТЕРСПУТНИК» В. С. Вешунов проявил себя как результативный, обладающий глубокими знаниями в области права и дипломатическими способностями специалист, что в немалой степени определяло и определяет успехи в различных аспектах деятельности Организации, которая сегодня насчитывает 26 Государств-Членов. Он поощрен благодарностью Президента Российской Федерации.

В. С. Вешунов является академиком Российской академии космонавтики, чле-

ном Российской ассоциации международного права, Международного института космического права (Париж), Международной юридической ассоциации (Лондон), Американского института аэронавтики и астронавтики (Рестон), членом-корреспондентом Международной астронавтической федерации (Париж), академиком Международной общественной академии связи (Москва).

Виктор Сергеевич — автор многочисленных публикаций по вопросам международного космического права и деятельности МОКС «ИНТЕРСПУТНИК», соавтор учебника «Международное космическое право».

Эрудированный и всегда открытый и доброжелательный, Виктор Сергеевич снискал уважение не только коллег в сфере своей профессиональной деятельности, но и всех, кому посчастливилось общаться с ним.

Редколлегия и редакция журнала «Электросвязь» поздравляют Виктора Сергеевича с юбилеем и желают ему здоровья, благополучия и успехов на поприще развития спутниковой связи.