

УДК 621.396.61

## ПОВЫШЕНИЕ ЛИНЕЙНОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СВЧ-СИГНАЛОВ

Л.А. Белов, профессор Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» (МЭИ), к.т.н.; belovla@gmail.com

А.С. Кондрашов, ведущий инженер-исследователь ОАО «Российские космические системы», аспирант МЭИ

В.М. Рожков, зав. отделом ОАО «Российские космические системы», к.т.н.

К.В. Ромащенко, инженер ОАО «Российские космические системы», аспирант МЭИ

**Ключевые слова:** радиопередатчик, линейность, линеаризация, предискажение, интермодуляционные искажения, энергетическая эффективность.

**Введение.** Усиление мощности широкополосных сигналов СВЧ-диапазона требуется в разнообразных приложениях: в радиопередающих устройствах мобильной и спутниковой радиосвязи, при передаче сигналов цветного телевидения и др. Противоречие, возникающее при этом, состоит в невозможности обеспечить одновременно максимальные значения параметров энергетической эффективности (выходной радиочастотной мощности и коэффициента полезного действия) и допустимого уровня интермодуляционных искажений передаваемых сигналов [1]. Причина заключается в свойственных усилителям СВЧ проявлениях амплитудной компрессии и амплитудно-фазовой конверсии (АМ/АМ и АМ/ФМ преобразования). Цель данной работы – проведение анализа возможностей преодоления указанных противоречий при помощи предискажающей коррекции амплитуды и фазы входного сигнала.

**Основные соотношения.** Функциональная схема усилителя мощности (УМ) сложных СВЧ-сигналов с предискажающей коррекцией АМ/АМ и АМ/ФМ преобразований [2] показана на рис. 1.

Амплитуда  $X(t)$  входного сигнала  $x(t)$ , комплексная амплитуда сигнала  $u(t)$  на входе собственно УМ и комплексная амплитуда выходного сигнала  $y(t)$  изменяются во времени в соответствии с передаваемой информацией. При усилении мощности сигналов с угловой модуляцией или манипуляцией изменения  $X(t)$  возникают в предшествующих каскадах из-за ограничения полосы пропускаемых частот или сглаживания фронтов манипуляции. В результате АМ/АМ и АМ/ФМ преобразований в наиболее энергетически эффективном режиме УМ, близком к насыщению, в обычных усилителях возникают недопустимые нелинейные искажения [3].

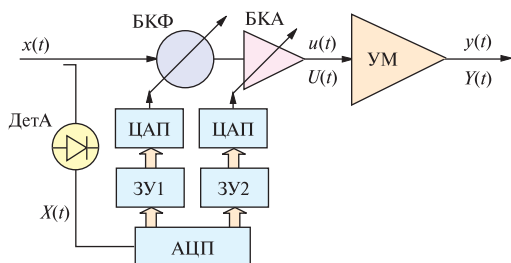


Рис. 1. Функциональная схема УМ с предискажающим линеаризатором

ДетА – быстродействующий детектор амплитуды; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЗУ1, ЗУ2 – запоминающие устройства коррекции фазы и амплитуды соответственно; ЦАП – цифроаналоговые преобразователи; БКФ, БКА – быстродействующие корректоры фазы и амплитуды соответственно; УМ – линеаризируемый усилитель мощности.

Предположим, что входной модулированный СВЧ-сигнал  $x(t)$  достаточно узкополосный для возможности использования метода медленно меняющихся амплитуд. Примем модель нелинейных амплитудных и амплитудно-фазовых преобразований в УМ в следующем виде:

$$Y = aU^2 / [1 + bU^2]; \quad (1)$$

$$\Phi = cU^2 / [1 + dU^2], \quad (2)$$

где  $Y$  – амплитуда входного сигнала УМ;  $U$  – амплитуда сигнала на входе УМ;  $\Phi$  – дополнительный, вызванный АМ/ФМ конверсией, фазовый сдвиг входного сигнала;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  – параметры аппроксимации характеристик АМ/АМ и АМ/ФМ усилителя, пересчитанные к напряжениям от паспортных или измеренных по мощности при гармоническом входном сигнале. Выражение (1) описывает эффект АМ/АМ в вакуумных усилителях СВЧ, например, на лампе бегущей волны (ЛБВ), в которых наблюдается максимум зависимости выходной амплитуды от входной  $Y(U)$ . Выражение (2) характеризует эффекты АМ/ФМ преобразований: они приводят в УМ СВЧ к паразитному фазовому сдвигу, который может значительно отличаться от малосигнального значения при выходной мощности, близкой к насыщению. Без потери общности положим в (1)  $a=1$ , скорректировав оставшиеся коэффициенты.

Предполагаем, что цепи коррекции нелинейности (рис. 1) имеют достаточно высокое быстродействие для динамической компенсации по амплитудной огибающей интермодуляционных искажений (ИМИ), возникающих в УМ в соответствии с (1) и (2).

Для полной компенсации ИМИ при амплитудах, меньших, чем в точке насыщения, цепи коррекции должны иметь следующие характеристики:

$$U = [1 - \sqrt{1 - bX^2}] / bX, \text{ при } X < X_{\text{нас}}; \quad (4)$$

$$U = 1, \text{ при } X > X_{\text{нас}}; \quad (5)$$

$$\Phi = cX^2 / [1 + dX^2]. \quad (6)$$

Известны [3] разные методики тестирования УМ по параметру ИМИ: двухчастотная; многочастотная; шумовая NPR (Noise Power Rating); по уровню внеполосных излучений. Наиболее простой оказывается двухчастотная методика, при которой на вход УМ поступает аддитивная сумма двух гармонических сигналов одинаковой мощности на близких частотах  $f_1$  и  $f_2$ , а параметр ИМЗ<sub>3γ</sub> (интермодуляционные искажения 3-го порядка) измеряется как отношение суммы мощностей нежелательных компонент выходного сигнала на частотах  $2f_1 - f_2$  и  $2f_2 - f_1$  к сумме мощностей на частотах  $f_1$  и  $f_2$ . При этом входная  $P_{\text{вх}}$  и выходная  $P_{\text{вых}}$  мощности являются

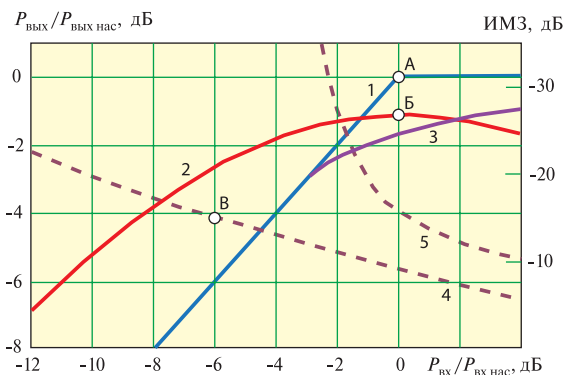


Рис. 2. Зависимости выходной мощности  $P_{\text{вых}}$  (сплошная линия) и уровня ИМЗ (пунктир) от входной мощности  $P_{\text{вх}}$  при одночастотном и двухчастотном тестовом сигналах:

1 – одночастотный сигнал с линейризатором; 2 – двухчастотный сигнал без линейризатора; 3 – двухчастотный сигнал с линейризатором; 4 – усилитель без линейризатора; 5 – усилитель с линейризатором

средними за период разностной частоты  $f_2 - f_1$  в окрестности первой гармоники средней входной частоты.

Результаты моделирования. При помощи имитационного моделирования проведены расчты, соответствующие схеме рис. 1, при разной форме входного сигнала. Значения коэффициентов аппроксимации (1) и (2) соответствовали типовым УМ на ЛБВ с АМ/ФМ конверсией, для которых в точке нормировки  $X=X_{\text{нас}}$  (где при одночастотном входном сигнале выходная мощность максимальна) фазовый сдвиг на  $40^\circ$  отличается от своего малосигнального значения ( $b=1, c=2,5293, d=2,8168$ ).

На рис. 2 показано влияние линейризации на амплитудные характеристики выходной мощности и уровня ИМЗ по упомянутому выше двухчастотному тесту. Входная мощность линейризатора  $P_{\text{вх}}$ , входная мощность УМ и выходная мощность  $P_{\text{вых}}$  нормированы к своим значениям в точке насыщения для одночастотного сигнала, а входные сопротивления считались активными по 50 Ом.

Рассмотрение графиков на рис. 2 показывает, что без линейризации максимальная средняя выходная мощность при двухчастотном сигнале (точка Б на кривой 2) на 1,5 дБ ниже, чем паспортная в точке А для одночастотного сигнала того же активного элемента, что объясняется пульсирующим характером тестового сигнала. Точка В на рис. 2 соответствует наибольшему допустимому уровню ИМЗ<sub>2г</sub>. При этом средняя выходная мощность более, чем в 2 раза (на 3,1 дБ) ниже, чем паспортная (для этого усилительного прибора), которая указывается для точки насыщения при одночастотном входном сигнале. Соответственно и энергетическая эффективность УМ значительно ниже паспортной, если считать, что мощность потребления от источника питания не зависит от уровня входного сигнала.

Введение цепей линейризации позволяет использовать УМ вблизи насыщения с высокой энергетической эффективностью. При уровне ИМЗ<sub>2г</sub> = -15 дБ можно использовать режим насыщения  $P_{\text{вх}}/P_{\text{вх нас}} \approx 0$  дБ, так что средняя выходная мощность (кривая 3) лишь на 1,6 дБ ниже паспортной. Средняя выходная мощность при включенном линейризаторе (кривая 3) в точке насыщения на 0,6 дБ ниже, чем без линейризатора (кривая 2), что объясняется глубокой амплитудной модуляцией в тестовом входном сигнале. Близкие результаты получены для многокаскадного транзисторного УМ СВЧ.

На рис. 3 показана связь между нормированным к малосигнальному значению коэффициентом передачи по мощ-

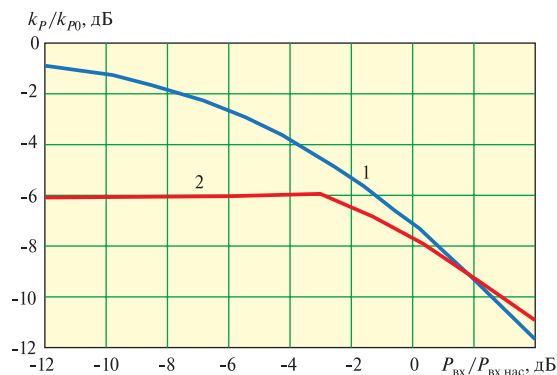


Рис. 3. Зависимость нормированного коэффициента передачи от входной мощности:

1 – без линейризатора; 2 – с включенным линейризатором

ности  $k_p = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$  и входной мощностью  $P_{\text{вх}}/P_{\text{вх нас}}$  при двухчастотном тестовом сигнале.

Из рис. 3 следует, что введение линейризации снижает малосигнальный коэффициент передачи  $k_{p0}$  на 6 дБ, однако увеличивает диапазон входных мощностей с постоянным коэффициентом передачи, т.е. значительно понижает уровень нелинейных искажений в широком интервале изменения входной мощности, что дополнительно увеличивает энергетическую эффективность каскада.

Для уточнения количественных результатов при сигналах, близких по форме и статистике амплитудных изменений к используемым в линиях связи, были проведены расчеты при входном сигнале с 4-позиционной фазовой манипуляцией 4ФМ по псевдослучайному закону чередования символов со сглаживанием фронтов манипуляции фильтром Найквиста с амплитудно-частотной характеристикой вида «корень квадратный из приподнятого косинуса». Как известно [4], такая весовая обработка модулирующего сигнала обеспечивает значительное уменьшение занимаемой полосы частот и отсутствие межсимвольных искажений при приеме. При этом входной сигнал имеет сложный закон распределения амплитуд, вызванный псевдослучайным чередованием передаваемых символов и длительным переходным процессом изменения сигнала на выходе сглаживающего фильтра. Оценка ИМИ проводилась по уровню внеполосных гармонических составляющих, появление которых вызвано искажениями третьего порядка.

На рис. 4, где кривой 1 представлен спектр мощности выходного 4ФМ сигнала без линейризатора в точке насыщения, а кривой 2 – спектр мощности при включенном линейризаторе, поясняется методика измерения параметра ИМЗ<sub>вн</sub>.

Рассмотрение рис. 4 показывает, что без линейризации

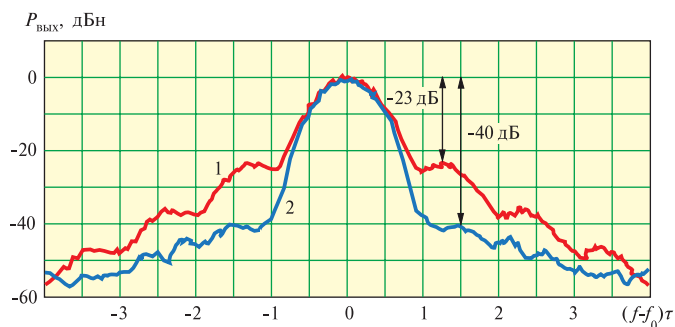


Рис. 4. Спектры сигнала 4ФМ со сглаживанием по Найквисту в режиме насыщения ( $P_{\text{вх}}/P_{\text{вх нас}} = 0$  дБ):

1 – без линейризатора; 2 – с линейризатором.

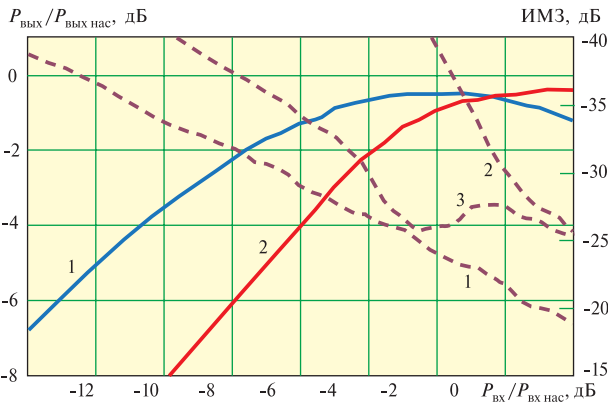


Рис. 5. Зависимости выходной мощности  $P_{\text{вых}}/P_{\text{вых нас}}$  (сплошная линия) и уровня ИМЗ (пунктир) от входной мощности  $P_{\text{вх}}/P_{\text{вх нас}}$  при 4ФМ сигнале: 1 – без линейризатора; 2 – с линейризатором при полной компенсации АМ/АМ и АМ/ФМ; 3 – с линейризацией только зависимости АМ/АМ

работа вблизи точки насыщения не только недопустима по требованиям ИМИ (при таком сигнале норматив ИМЗ<sub>вп</sub> около -25 дБ), но и значительно нарушает требования ЭМС по уровню внеполосных модуляционных излучений вблизи выделенной полосы частот [5]. Введение линейризации (кривая 2) снижает уровень побочных спектральных компонент до допустимого уровня -40 дБ.

На рис. 5 показано влияние линейризации на амплитудные характеристики средней выходной мощности и уровня ИМЗ<sub>вп</sub> при сигнале 4ФМ со сглаживанием фронтов по Найквисту.

Рассмотрение графиков на рис. 5 показывает, что если при усилении 4ФМ сигнала допустимый уровень ИМЗ<sub>вп</sub> со-

ставляет -30 дБ, то введение цепей линейризации позволяет на 1,2 дБ увеличить среднюю выходную мощность, что приводит к повышению его энергетической эффективности.

Исследование влияния компенсации только АМ/АМ искажений (кривая 3 на рис. 5) показало, что уровень ИМЗ<sub>вп</sub> аномально изменяется вблизи режима насыщения.

Заключение. Оценки предельных возможностей повышения выходной мощности, спектральной и энергетической эффективности УМ с АМ/АМ и АМ/ФМ конверсией за счет предоставляющей линейризации показали возможность получения выходной радиочастотной мощности, отличающейся на 0,5–1 дБ от максимальной для одночастотного сигнала при одновременном выполнении нормативов по интермодуляционным искажениям, по спектральной и энергетической эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Colantonio P., Gianini F., Limiti E. High Efficiency RF and Microwave Solid State Power Amplifiers// Wiley, 2009. – 498 p.
2. Kusunoki S., Yamamoto K. Power-Amplifier Module with Digital Adaptive Predistortion for Cellular Phones//Trans. IEEE.– MTT-50.– №12, Dec. 2002. – P. 2979–2985.
3. Белов Л.А., Рожков В.М., Карутин А.Н., Кондрашов А.С., Челноков О.А. Искажения фазоманипулированных сигналов СВЧ в усилителях мощности // Вестник МЭИ. – 2010. – № 3. – С. 122–126.
4. Мартиросов В.Е. Теория и техника приема дискретных сигналов. – М.: Радиотехника, 2005. – 136 с.
5. Белов Л.А., Кондрашов А.С. Формирование и усиление мощности сигналов со многими несущими частотами // Сб. докл. межд. науч./техн. семина. «СИНХРОИНФО 2010» / 2–30 июня 2010, г. Нижний Новгород. – С. 124–126.

Получено