

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧЁТНЫХ ГАРМОНИК ДЛЯ ЦИФРОВОГО ПРЕДЫСКАЖЕНИЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА ПРИ ЛИНЕАРИЗАЦИИ АМПЛИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЧ-УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

**Петушков Сергей Владимирович,**  
Аспирант НИУ "МЭИ", инж.-исследователь  
АО "Российские космические системы", Россия, Москва,  
[sp-rks@ya.ru](mailto:sp-rks@ya.ru)

**Кондрашов Александр Сергеевич,**  
к.т.н., начальник отделения АО "Российские космические системы", Россия, Москва, [ak-rks@mail.ru](mailto:ak-rks@mail.ru)

**Белов Леонид Алексеевич,**  
к.т.н., профессор НИУ "МЭИ", Россия, Москва,  
[belovla@gmail.com](mailto:belovla@gmail.com)

**Ключевые слова:** системы передачи информации, усилитель мощности, интермодуляционные искажения, предискажающий линеаризатор, чётные гармоники, электромагнитная совместимость.

В настоящее время в связи с увеличением скорости и объемов передачи информации по современным каналам связи при обострении дефицита частотного ресурса и ужесточении нормативов электромагнитной совместимости расширяется область применения сложных сигналов с высокой спектральной эффективностью, что накладывает на радиопередающие устройства ряд требований по линейности. Для достижения высоких показателей энергетической эффективности (коэффициента полезного действия) и выходной мощности радиопередающего устройства необходимо работать вблизи режима насыщения усилителя мощности, входящего в состав радиопередающего устройства. Однако из-за явлений амплитудной компрессии и амплитудно-фазовой конверсии (АМ/АМ и АМ/ФМ преобразований) в активном элементе усилителя мощности возникают интермодуляционные искажения усиливаемых сигналов, которые в рабочей полосе частот ухудшают качество приёма информации, а за её пределами нарушают требования электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. Система линеаризации амплитудных характеристик усилителя мощности позволяет снизить интермодуляционные искажения передаваемых радиосигналов и увеличить выходную мощность при допустимом уровне интермодуляционных искажений, что повышает энергетическую эффективность радиопередающего устройства в целом. Исследован вариант полностью цифровой системы линеаризации СВЧ-усилителей мощности, работающих в режиме близком к насыщению, на основе использования предискажения передаваемого сигнала его чётными гармониками. Предложенная схема может быть интегрирована в цифровой блок формирования передаваемого информационного сигнала без усложнения схемы усилителя мощности. Моделирование транзисторного усилителя с цифровым линеаризатором показало, что уровень мощности интермодуляционных искажений 3-го порядка двухчастотного тестового сигнала может быть понижен на 15 дБ при функционировании усилителя в энергетически выгодном режиме с выходной мощностью на 2 дБ ниже мощности в режиме насыщения при усилении гармонического колебания. Для сигнала с 4-позиционной фазовой манипуляцией псевдослучайной последовательностью и сглаживанием фронтов по Найквисту с выходной мощностью на 1 дБ ниже мощности в режиме насыщения показана возможность снижения уровня интермодуляционных искажений на 12 дБ с одновременным улучшением на 7 дБ компактности спектра для выполнения требований электромагнитной совместимости.

#### Для цитирования:

Петушков С.В., Кондрашов А.С., Белов Л.А. Использование чётных гармоник для цифрового предискажения входного сигнала при линеаризации амплитудных характеристик СВЧ-усилителя мощности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Том 10. – №6. – С. 3-7.

#### For citation:

Petushkov S.V., Belov L.A., Kondrashov A.S. Digital linearizer of RF power amplifiers with input signal predistortion by even harmonics. T-Comm. 2016. Vol. 10. No.6, pp. 3-7. (in Russian)

**Введение**

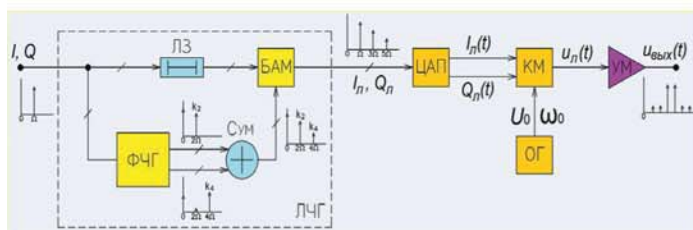
Одним из ключевых элементов системы передачи информации является радиопередающее устройство (РПДУ), к которому в зависимости от условий применения предъявляется комплекс противоречивых требований: высокая энергетическая эффективность, малый уровень искажений передаваемых сигналов, выполнение нормативов электромагнитной совместимости, ограничение массы и габаритов, высокая надёжность [1]. Для достижения требуемых значений энергетической эффективности и выходной мощности необходимо работать в режиме близком к насыщению усилителя мощности (УМ). Однако при этом из-за явления амплитудной компрессии и амплитудно-фазовой конверсии (АМ/АМ и АМ/ФМ преобразований) в активном элементе УМ возникают интермодуляционные искажения (ИМИ) усиливаемых сигналов, частотные составляющие которых в рабочей полосе частот могут недопустимо ухудшить качество приёма информации, а за её пределами нарушают требования электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств (ЭМС) [2].

Эффективным решением для устранения указанных противоречий является применение в составе РПДУ сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона системы предискажающей линейаризации. В аналоговых системах такого рода [3] используются элементы, характеристики которых изменяются в зависимости от параметров окружающей среды, что ухудшает настройку для необслуживаемых спутниковых ретрансляторов. Известные предискажающие корректоры амплитуды и фазы входного сигнала УМ требуют введения дополнительного векторного модулятора на входе усилителя мощности, что усложняет схему линейаризатора и ограничивает полосу частот полезных сигналов, передаваемых с допустимым уровнем искажений. Система предискажающей линейаризации [4] может быть интегрирована в цифровой блок формирования передаваемого информационного сигнала, однако обеспечивает ограниченный уровень снижения интермодуляционных искажений выходного сигнала УМ лишь 3-го порядка.

В данной работе рассмотрен новый вариант полностью цифрового линейаризатора чётными гармониками входного сигнала (ЛЧГ), обеспечивающий снижение уровня ИМИ выходных сигналов РПДУ более высокого порядка и повышение энергетической эффективности за счёт возможности работы УМ в режиме близком к насыщению при допустимом уровне интермодуляционных искажений.

**Постановка задачи и основные соотношения**

Структурная схема РПДУ с предлагаемым линейаризатором представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Структурная схема РПДУ с корректором линейности ЛЧГ (ФЧГ – формирователь чётных гармоник; ЛЗ – линия задержки; БАМ – балансный амплитудный модулятор; КМ – квадратурный модулятор; ОГ – опорный генератор; УМ – усилитель мощности)

По схеме рис.1 на вход линейаризатора ЛЧГ поступает цифровой поток квадратурных отсчётов передаваемой информации  $I, Q$ . На его выходе поток отсчётов  $I_n, Q_n$  содержит дополнительные частотные составляющие, относительный уровень которых близок по амплитуде и противоположен по фазе спектральным продуктам искажений третьего и пятого порядков, возникающих в УМ. Цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) формирует квадратурные напряжения  $I_n(t), Q_n(t)$  на модулирующих входах квадратурного модулятора (КМ), на опорный вход которого поступает колебание несущей частоты  $\omega_0$ . В выходном сигнале  $u_{\text{вых}}(t)$  интермодуляционные искажения оказываются в значительной мере скомпенсированными за счёт введённого предискажения.

Суть работы ЛЧГ поясняется на примере формирования и усиления мощности тестового сигнала с одинаковыми уровнями на частотах, отличающихся от центральной частоты  $\omega_0 = 2\pi f_0$  на величину расстройки  $\pm\Omega/2$ . Для формирования такого сигнала на входы  $I, Q$  линейаризатора ЛЧГ схемы рис.1 подаются цифровые потоки данных, соответствующие колебаниям:

$$I(t) = \sin\Omega t ; Q(t) = 0. \tag{1}$$

Если блок ЛЧГ отключён, то есть  $I_n, Q_n$  совпадают с  $I, Q$ , то на входе УМ формируется двухчастотный тестовый сигнал

$$u_{\text{вх}}(t) = 0,5U_0 \{ \cos[(\omega_0 - \Omega/2)t] + \cos[(\omega_0 + \Omega/2)t] \} \tag{2}$$

где  $U_0$  – входная амплитуда несущего колебания, а фаза несущего колебания  $\varphi_0$  с частотой  $\omega_0$  без потери общности принята нулевой  $\varphi_0 = 0$ .

При усилении в УМ входного сигнала вида (2) спектр выходного сигнала  $u_{\text{вых}}(t)$  содержит, кроме основных составляющих на частотах  $\omega_{1,2} = \omega_0 \pm \Omega/2$  мешающие интермодуляционные составляющие 3-го порядка на частотах  $2\omega_1 - \omega_2$  и  $2\omega_2 - \omega_1$  5-го порядка на частотах  $3\omega_1 - 2\omega_2$  и  $3\omega_2 - 2\omega_1$ , а также составляющие более высоких нечётных порядков.

При включённом ЛЧГ на выходе Сум формируются цифровые потоки, соответствующие постоянной составляющей, второй и четвёртой гармоникам частоты передаваемого сигнала. После суммирования их в Сум с коэффициентами  $k_2$  и  $k_4$  соответственно они поступают на модулирующий вход балансного амплитудного модулятора (БАМ), на опорном входе которого действует задержанный в линии задержки ЛЗ на время запаздывания в формирователе чётных гармоник ФЧГ поток отсчётов передаваемого сигнала  $I, Q$  по (1). В выходном сигнале ЛЧГ  $I_n, Q_n$  содержатся составляющие на 1-ой, 3-ей и 5-ой гармониках входного сигнала. Компенсация ИМИ на выходе РПДУ достигается за счёт того, что входные составляющие на 3-ей и 5-ой гармониках входного сообщения оказываются равные по амплитуде и противоположные по фазе интермодуляционным искажениям 3-го и 5-го порядков, возникающим в УМ.

На выходе линейаризованного УМ в спектральной окрестности несущей частоты  $\omega_0$  формируется полезный сигнал на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$  с мощностью  $P_{\text{вых}}$ , а также сигналы ИМИ по обе стороны от рабочих частот с суммарной мощностью  $P_{\text{ИМИ}}$ . Уровень составляющих ИМИ на каждой из соответствующих частот определяется собственными характери-

ками АМ/АМ и АМ/ФМ преобразований в УМ, выбранными значениями компенсирующих коэффициентов  $k_2$  и  $k_4$  и уровнем  $Y = P_{вх} / P_{вх}^{нас}$  средней мощности входного сигнала  $P_{вх}$  по отношению к значению  $P_{вх}^{нас}$  в режиме насыщения.

Для УМ на лампе бегущей волны в качестве  $P_{вх}^{нас}$  обычно принимают входную мощность, соответствующую максимуму выходной мощности, для твердотельных (ТУМ) – выходную мощность в режиме 1 дБ компрессии усиления для используемого выходного транзистора.

Средняя за период разностной частоты  $\Omega$  выходная мощность усилителя на частотах входного сигнала  $\omega_0 \pm \Omega/2$  нормируется к значению выходной мощности для одночастотного сигнала  $Z = P_{вых} / P_{вых}^{нас}$ .

В качестве критерия уровня ИМИ по двухчастотному тесту принимают [2] величину  $C/I$ , равную отношению нормированной мощности  $C$  составляющих на частотах входного сигнала  $\omega_1$  и  $\omega_2$  к суммарной нормированной мощности составляющих 3-го, 5-го и т.д. порядков на соответствующих частотах  $I = \sum I_i$ , где  $i = 3, 5, \dots$

Количественное значение уровня ИМИ в приложениях (в частности, в многоканальных системах передачи информации) оценивается также [5] по сигналу со сплошным спектром с помощью критерия ПМСК (Помеха в соседнем канале, Adjacent Channel Power Ratio – ACPR). Значение ПМСК определяется как отношение мощности сигнала в рабочей полосе частот к мощности составляющих в соседней полосе частот.

Внеполосные модуляционные излучения возникают в линейном режиме УМ как характеристика выбранного вида модуляции несущего колебания информационным сигналом; составляющие ИМИ дополнительно увеличивают уровень внеполосных спектральных составляющих. В качестве интегральной оценки выполнения требований ЭМС используют параметр прямоугольности спектра  $K_{II} = Z_{1,5\Delta} / Z_{\Delta}$  – отношение спектральной плотности мощности выходного колебания  $Z_{1,5\Delta}$  при отстройке от несущей на  $\pm 1,5 \cdot \Delta$  к её значению  $Z_{\Delta}$  на границах  $\pm \Delta$  рабочей полосы частот.

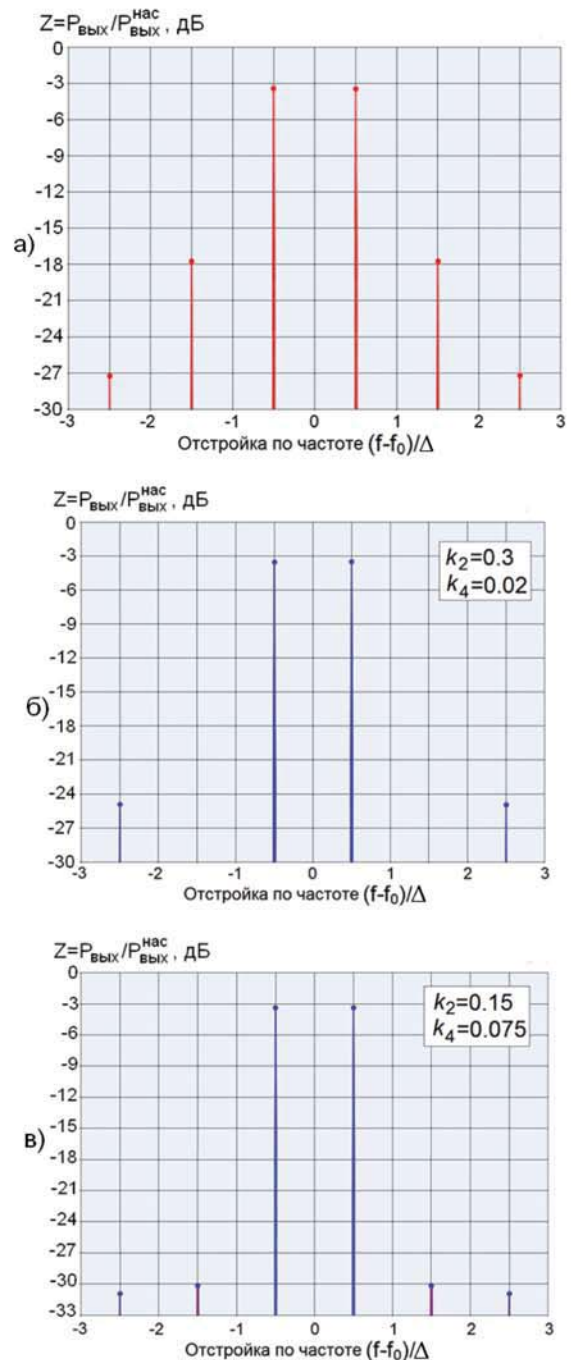
**Результаты**

В модельных исследованиях для учёта нелинейных АМ/АМ преобразований сигнала в УМ необходимо задавать нечётную часть его характеристики передачи  $z(y)$  для мгновенных значений входного  $y(t)$  и выходного  $z(t)$  сигналов. Применительно к твердотельным усилителям мощности ТУМ в работе использована экспоненциальная характеристика с плавным ограничением вида

$$z(y) = \begin{cases} a[1 - \exp(-by)], & \text{если } y < 0 \\ a[\exp(by) - 1], & \text{если } y > 0 \end{cases} \quad (4)$$

где  $a$  и  $b$  – параметры аппроксимации. Применение ЛЧГ по схеме рис. 1 позволяет по сравнению с ТУМ без линейризации снизить уровень ИМИ третьего или пятого порядка при фиксированной выходной мощности сигнала. На рисунке 3 сопоставлены спектрограммы выходного сигнала без линейризатора (а), с компенсацией ИМИ 3-го порядка (б) и с ком-

пенсацией ИМИ 5-го порядка (в) за счёт выбора параметров  $k_2$  и  $k_4$ . На этих графиках  $\Delta = \Omega/2\pi$  – разность значений циклической частоты входного сигнала  $\Delta = f_2 - f_1$ .



**Рис. 3.** Спектрограммы выходного сигнала ТУМ с экспоненциальной характеристикой  $z(y)$  при двухчастотном входном сигнале для  $Z = -1$  дБ без линейризации (а, линия красного цвета), с настройкой ЛЧГ на минимум ИМИ 3-го порядка (б) и с настройкой ЛЧГ на примерное равенство составляющих 3-го и 5-го порядков (в)

Из рассмотрения рис. 3 видно, что при коррекции компонент ИМИ только 3-го порядка возрастает уровень составляющих пятого порядка. Соответственно при настройке на минимум компонент ИМИ только 5-го порядка возрастает

уровень составляющих 3-го порядка и может увеличиться уровень ИМИ 7-го порядка. На рисунке 3, в показан пример настройки, минимизирующей одновременно составляющие 3-го и 5-го порядков.

В [5] показано, что количественные значения уровня ИМИ различаются в зависимости от параметров закона распределения амплитуд входного сигнала. Для проверки функционирования системы ЛЧГ при входном сигнале со сплошным спектром выполнены расчёты для сигнала с псевдослучайной 4-уровневой фазовой манипуляцией ФМ4, в котором для выполнения нормативов электромагнитной совместимости и формирования компактного спектра шириной  $\Delta$  применено сглаживание манипуляции фазы при помощи фильтра Найквиста [6] типа «корень квадратный из приподнятого косинуса» с параметром скругления  $\alpha = 0,35$ . Количественная оценка уровня ИМИ выполнялась по критерию ПМСК. На рис. 4 показаны линией красного цвета спектрограмма для ТУМ без линейризации и линией синего цвета – с линейризацией чётными гармониками по схеме рис. 1 с настройкой на минимум одновременно внеполосных составляющих 3-го и 5-го порядков.

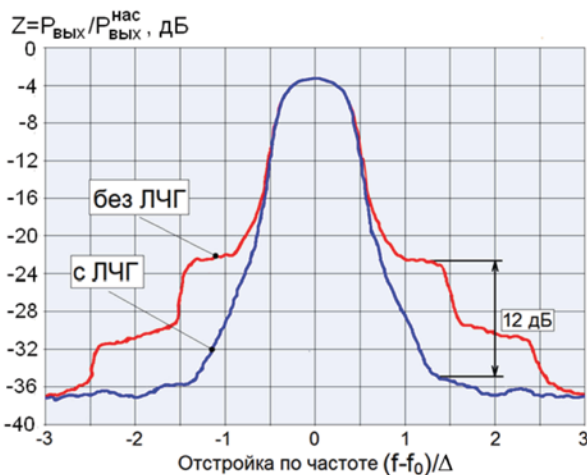


Рис. 4. Спектр выходного сигнала ТУМ при  $Z = -1$  дБ без использования линейризатора (линия красного цвета) и с цифровым линейризатором ЛЧГ при  $k_2 = 5, k_4 = 0,7$  (линия синего цвета)

Из рассмотрения рис. 4 видно, что при усилении широкополосного сигнала со сплошным спектром и коррекции нелинейности УМ с помощью ЛЧГ, достигается значительное снижение уровня ИМИ при фиксированной выходной мощности сигнала в рабочей полосе частот. Одновременно улучшается значение коэффициента прямоугольности спектра от 10 дБ без линейризации до 17 дБ при оптимальной настройке ЛЧГ.

Применение любой системы линейризации нацелено на повышение энергетической эффективности РПДУ при допустимом уровне искажений передаваемого сигнала. Наибольшие значения выходной радиочастотной мощности и энергетической эффективности ТУМ достигаются при работе вблизи насыщения, когда значения  $Z$  незначительно отличаются от 0 дБ. Применение линейризатора ЛЧГ, представленного в данной работе, именно в этом режиме работы обеспечивает заметное снижение уровня ИМИ. В качестве

количественной характеристики выигрыша по ИМИ используется  $D_i = \text{ИМИ}_i - \text{ИМИ}_i^{\text{ЛЧГ}}$ , дБ – выраженная в децибелах разность между нормированной мощностью ИМИ, интермодуляционных продуктов нечётного порядка в полосе частот сигнала без ЛЧГ и нормированной мощностью ИМИ<sup>ЛЧГ</sup> этих продуктов при настроенной системе ЛЧГ, где  $i = 3, 5$ . На рисунке 5 показана связь величины  $D_i$  выигрыша по ИМИ за счёт применения ЛЧГ и нормированного значения средней выходной мощности  $Z = P_{\text{вых}} / P_{\text{вых}}^{\text{нас}}$  при двухчастотном тестовом входном сигнале.

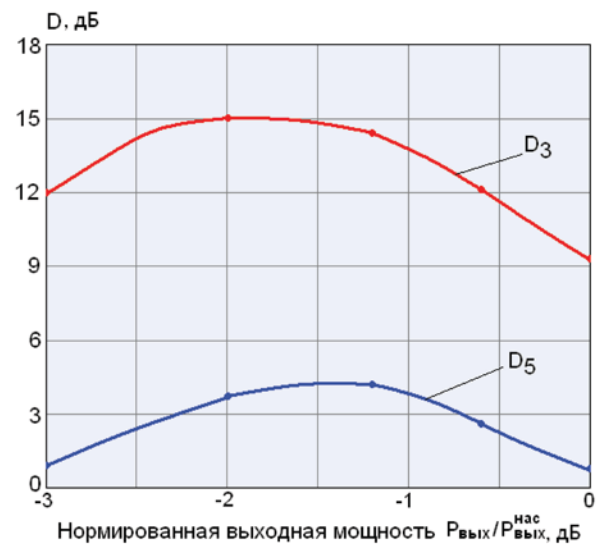


Рис. 5. Зависимость выигрыша по ИМИ от нормированного значения средней выходной мощности за счёт применения ЛЧГ для двухчастотного тестового сигнала

Из рассмотрения графика на рис. 5 можно сделать вывод о том, что использование ЛЧГ в составе РПДУ позволяет снизить уровень ИМИ 3-го порядка на 15 дБ при нормированной выходной мощности -2 дБ. Такой режим работы УМ соответствует выходной мощности, близкой к максимальной, где достигается наибольшее значение коэффициента полезного действия.

### Выводы

Предложена новая цифровая система линейризации ЛЧГ, основанная на внесении предискажений чётными гармониками входного сигнала. Корректирующие предискажения формируются полностью в цифровой части формирователя сигналов радиопередающего устройства и не требуют поэтому заметного увеличения стоимости, массы и габаритных размеров. В работе показана возможность снижения на 12 дБ уровня внеполосных излучений, вызванных появлением ИМИ с улучшением на 7 дБ существенного для соблюдения требований ЭМС параметра прямоугольности полного спектра. Предложенная система линейризации ЛЧГ наиболее эффективна при работе выходного каскада усилителя мощности вблизи насыщения, где может быть достигнут высокий к.п.д. при одновременном заметном снижении уровня интермодуляционных искажений на 10-15 дБ.

Применение новой системы линеаризации позволяет получить улучшение энергетических характеристик при допустимом уровне искажений передаваемых сигналов и выполнении нормативов электромагнитной совместимости для бортовых и наземных радиопередающих устройств.

### Литература

1. *Спутниковая связь и вещание*; 3-е изд. / под ред. Л.Я. Кантора. – М.: Радио и связь, 1997. – 528 с.
2. *Сечи Ф., Бужатти М.* Мощные твёрдотельные СВЧ-усилители: Пер. с англ. под ред. А.А. Борисова. – М.: Техносфера, 2016. – 416 с.

3. *Y. Kim, K.-K. Jeon, E.-K. Kim, B.-C. Kim.* An analog Lineariser Based on Amplitude Modulation with Even Harmonic Signals. *Microwave Journal*, Vol. 52, № 2, February 2009, pp. 80-88.

4. Патент RU 2 538 306 C1, МПК: H 04 B 7/005 (2006.01). Формирователь радиосигналов с цифровым предискажением чётными гармониками / Кондрашов А.С.; патентообладатель АО «Российские космические системы»; заявл. 11.11.2013; опублик. 10.01.2015, бюл. №1.

5. *Белов Л.А., Кондрашов А.С., Петушков С.В.* Корреляционная оценка уровня интермодуляционных искажений СВЧ-сигналов в усилителях мощности // *Электросвязь*, 2015. – №5. – С. 36-41.

6. *Мартыросов В.Е.* Теория и техника приёма дискретных сигналов ЦСПИ. – М.: Изд. Радиотехника, 2005. – 144 с.

## DIGITAL LINEARIZER OF RF POWER AMPLIFIERS WITH INPUT SIGNAL PREDISTORTION BY EVEN HARMONICS

**Sergey V. Petushkov**, *postgraduate student of Moscow Power Engineering Institute (National Research University), Russian Space Systems, JSC, Research engineer, Moscow, Russia, [sp-rks@ya.ru](mailto:sp-rks@ya.ru)*

**Leonid A. Belov**, *Moscow Power Engineering Institute (National Research University), Professor, Ph.D., Russia, Moscow, [belovla@gmail.com](mailto:belovla@gmail.com)*

**Aleksandr S. Kondrashov**, *Russian Space Systems, JSC, Head of department, Ph.D, Moscow, Russia, [ak-rks@mail.ru](mailto:ak-rks@mail.ru)*

### Abstract

At the present time, the application area of compound signals with high spectral efficiency expands due to the increased transfer rates and information content transmitting through the modern communication channels, and owing to the exacerbated frequency deficiency and tougher standards for EMC. For these reasons a number of requirements for linearity are imposed on the transmitters. To achieve the required high levels of the transmitter's output power and energy efficiency (efficiency) it is necessary for the power amplifier, which is a part of the transmitter, to operate near saturation point. However, due to the effects of amplitude compression and amplitude-phase conversion (AM/AM and AM/PM conversions) intermodulation distortion of the amplified signal occurs in the power amplifier's active element. Intermodulation distortion degrades quality of information reception in the operating frequency band, and does not meet the radioelectronic devices' EMC requirements beyond it. The most promising technique for resolving this contradiction is to use the linearization systems in the power amplifiers that reduce intermodulation distortion of the transmitted radio signals. Using these systems can increase the amplifier's output power at an acceptable level of intermodulation distortion which improves the energy efficiency of the whole transmitter. The new version of the all-digital linearization system of RF power amplifiers operating near saturation point is researched in this article. This system is based on using predistortion of the transmitted signal by its even harmonics. The proposed scheme can be easily integrated into the transmitted information signal forming digital unit without complicating the power amplifier scheme. Modeling the transistor amplifier with digital linearizer showed that the 3rd order intermodulation distortion power level can be reduced by 15 dB when the amplifier operates with the highest power efficiency and its output power is 2 dB less than its saturated power output at two-frequency test signal and the harmonic oscillation amplified. The possibility of reducing the distortion level by 12 dB is shown with the simultaneous increase in the output spectrum compactness by 7 dB that allows meeting the EMC requirements while the power amplifier is modeled with the real bandpass QPSK signal smoothed by RRC filter and the amplifier's output power is 1 dB less than its saturated power output.

**Keywords:** *data transmission systems, High-power amplifier, intermodulation distortion, predistortion linearizer, even harmonics, electromagnetic compatibility.*

### References

1. *Satellite communications and broadcasting*. 3rd ed. / Ed. L.Y. Cantor. Moscow: Radio and Communications, 1997. 528 p. (*in Russian*)
2. *F. Sechi, M. Bujatti.* Solid-State Microwave High-Power Amplifiers: Translated from English. ed. A.A. Borisov. Moscow: Technosphere, 2016. 416 p. (*in Russian*)
3. *Y. Kim, K.-K. Jeon, E.-K. Kim, B.-C. Kim.* An analog Lineariser Based on Amplitude Modulation with Even Harmonic Signals. *Microwave Journal*, Vol. 52, No. 2, February 2009, pp. 80-88.
4. Патент RU 2538306 C1, IPC: H 04 B 7/005 (2006.01). Shaper radio signals with digital predistortion by even harmonics / A.S. Kondrashov; patent Russian Space Systems, JSC; Appl. 11/11/2013; publ. 01.10.2015, Bull. No.1. (*in Russian*)
5. *L.A. Belov, A.S. Kondrashov, S.V. Petushkov,* Correlation method to estimate the intermodulation distortion of the microwave signals in the power amplifiers / *Electrosvyaz*, 2015, No. 5. Pp. 36-41. (*in Russian*)
6. *V. Martirosov.* The theory and technology of reception of digital signals DSTI. Moscow: Radio Engineering, 2005. 144 p. (*in Russian*)