

УДК 621.375.026

В.Ю. Саяпин, В.И. Тисленко

Исследования уровня подавления интермодуляционных искажений в нелинейном усилителе мощности с системой предискажения сигнала

Определены параметры модели реального усилителя мощности. Выполнена оценка параметров предистортера. Рассчитаны коэффициенты модели предистортера. Приведены расчетные значения снижения уровня ИМИ в режиме усиления двухтонового и полосового OFDM-сигналов. Показано снижение уровня ИМИ при подаче на вход реального усилителя мощности предискаженного двухтонового сигнала и полосового OFDM-сигнала.

Ключевые слова: интермодуляционные искажения, предистортер, усилитель мощности, модель нелинейной динамической системы.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-2-18-22

Проблема снижения интермодуляционных искажений (ИМИ) при работе усилителя мощности (УМ) в нелинейном режиме известна давно и является актуальной по настоящее время [1–4]. Сравнительный анализ вариантов построения усилителей мощности с системой введения предискажений, выполненный в [4], показывает, что перспективный вариант построения системы может быть реализован на основе применения полиномиальной модели с памятью для усилителя мощности и предистортера (предискажателя). При этом используется не прямая архитектура построения предистортера с адаптацией к вариациям характеристик реального усилителя. Алгоритм адаптации использует рекурсивный метод прогноза ошибки. Данный вариант построения обеспечивает высокий уровень подавления ИМИ, малую длительность переходного процесса в плане достижения требуемого уровня компенсации ИМИ и адаптацию системы к возможным изменениям характеристик усилителя мощности при относительно простой реализации системы. Экспериментальная проверка путем прямого моделирования предполагает выполнение следующих этапов: идентификация нелинейной модели реального УМ, идентификация параметров модели предистортера, определение соответствия расчетного и экспериментального уровня подавления ИМИ.

В инженерной практике часто используют следующие два метода оценки эффективности подавления ИМИ [3]. Классический 2-тоновый метод предполагает подачу на вход усилителя двух близких по частоте сигналов с последующим измерением в выходном сигнале уровней комбинационных составляющих 3-го и 5-го порядков [2]. Уровень подавления ИМИ измеряют, определяя отношение уровня комбинационной компоненты в выходном сигнале УМ в схеме с предистортером и без него. Другой метод предполагает подачу на вход усилителя полосового сигнала с последующим измерением в полосе сигнала отношения мощности сигнала к шуму

(С/Ш). При этом удобно использовать сигнал с модуляцией OFDM.

В работе определены параметры модели реального УМ, на их основе выполнена оценка параметров предистортера (степень полинома и глубина памяти) и далее рассчитаны коэффициенты модели предистортера. Расчетный уровень ИМИ в схеме УМ с предистортером определялся путем моделирования работы системы. Приведены результаты снижения уровня ИМИ при подаче на вход реального УМ предискаженного сигнала.

Модель усилителя мощности

На первом этапе выполняется моделирование УМ. На вход усилителя подается 2-тоновый сигнал на частотах $f_1 = 1600$ Гц и $f_2 = 1900$ Гц ($\Delta f = 300$ Гц), который используется для амплитудной модуляции сигнала несущей частоты 10 МГц. Полиномиальная модель УМ имеет вид

$$z(n) = \sum_{j=0}^{m-1} \sum_{i=1}^q h_{ij} y(n-j) |y(n-j)|^{i-1} \quad (1)$$

и определена заданием двух параметров – глубина памяти m и степень полинома q . Степень полинома определяется требованиями к УМ в части уровня подавления ИМИ заданного порядка в сигнале на выходе. Обычно ограничиваются заданием уровня ИМИ 3-го и 5-го порядков. Однако для повышения точности моделирования порядок можно увеличить и до 7–9-й степени. Глубина памяти связана с постоянной времени УМ и определяет, согласно (1), влияние предыдущих отчетов сигнала на текущее значение. Как правило, при правильном выборе интервала квантования величина $m = 2-3$, и при этом достигается адекватность модели. Дальнейшее увеличение m не приводит к значительному улучшению точности моделирования, однако значительно увеличивает вычислительную сложность [4]. Матрица коэффициентов \mathbf{H} модели УМ, полученная при решении задачи идентификации, равна:

$$\mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} -14,14 + 98,98i & 8,81 + 309,50i & 0 & 0 & -9,33 + 158,69i \\ -23,47 - 103,11i & 0 & 0 & 19,44 - 152,05i & 50,21 + 93,58i \end{bmatrix}.$$

На рис. 1 приведены спектры измеренного выходного сигнала реального усилителя и модели УМ с параметрами $q = 5$ и $m = 2$. Видно, что на выходе реального УМ присутствуют ИМИ вплоть до 25-го порядка, однако их уровни, начиная с 7-го порядка, малы. Отметим, что на рис. 1 уровень тестовых сигналов и уровни ИМИ 3-го и 5-го порядков имеют одинаковый цвет, поскольку они одинаковы в реальном УМ и в его модели. Таким образом, полагаем, что учет ИМИ 3-го и 5-го порядков является достаточным для обеспечения требований к УМ. Изменение величины m в сторону увеличения не приводит к

большому совпадению результатов моделирования с реальными данными.

Отметим, что идентификация параметров модели УМ, ориентированная на применение двухтонового сигнала, позволяет просто получить оценки параметров q и m . Однако она не может обеспечить адекватность модели УМ при подаче на вход полосового сигнала типа OFDM. Идентификация совокупности параметров \mathbf{H} (1) для полосового сигнала выполнялась с использованием алгоритма непрямого обучения [4]. Матрица коэффициентов \mathbf{H} модели УМ, полученная при решении задачи идентификации, равна:

$$\mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} -4,32 + 43,26i & -80,65 - 418,15i & 0 & 0 & -5,22 - 18,26i \\ 1,84 - 34,23i & 0 & 0 & 8,86 + 25,18i & 39,29 - 38,45i \end{bmatrix}.$$

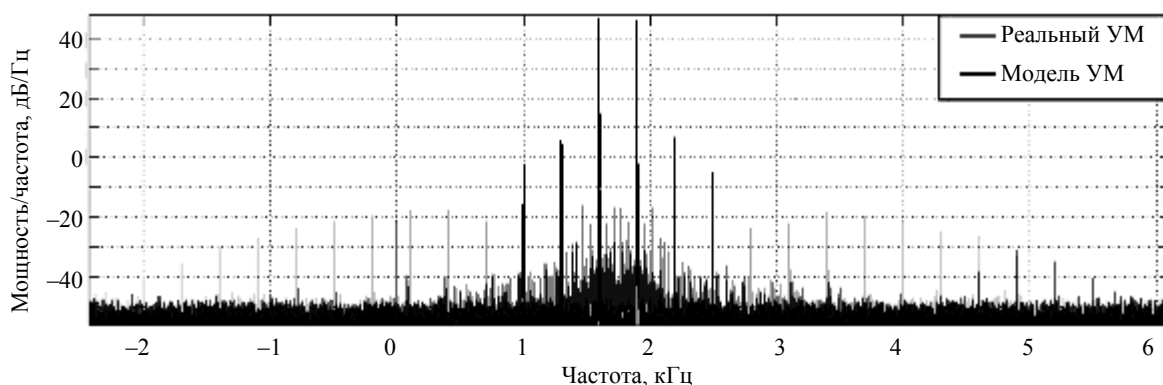


Рис. 1. Спектр выходного 2-тонового сигнала реального УМ и спектр моделируемого выходного сигнала

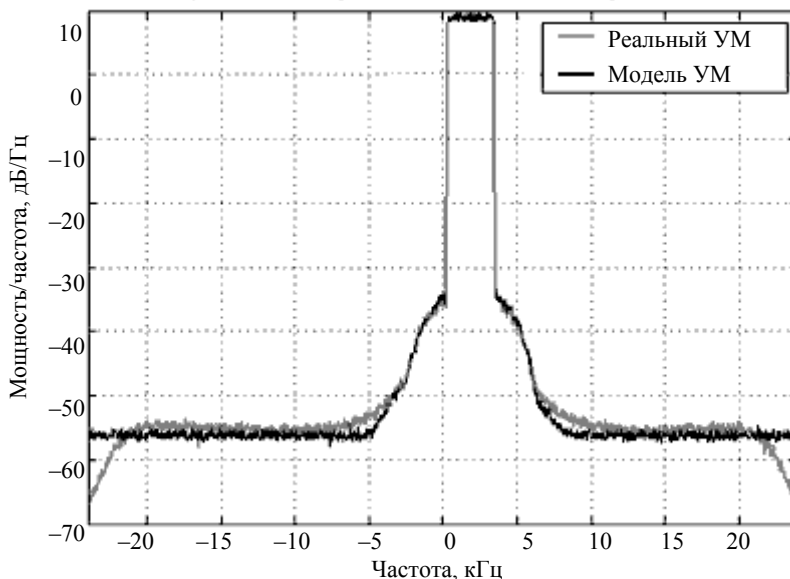


Рис. 2. Спектр выходного сигнала УМ и выходного сигнала модели УМ при полосовом входном сигнале

На рис. 2 приведены измеренные спектры выходного сигнала УМ и модели УМ при входном полосовом сигнале (полоса 3,1 кГц). Видно, что расхождение спектров не превышает 2–3 дБ относительно шума квантования (–57 дБ), что вполне допустимо. Очевидно, это связано с отсутствием в модели УМ составляющих ИМИ выше 5-го порядка.

Моделирование предистортера

Методика получения коэффициентов модели предистортера приведена в [4]. По существу она повторяет соответствующий алгоритм для УМ.

Матрица коэффициентов \mathbf{H} модели предистортера двухтонового сигнала, полученная при решении задачи идентификации, равна:

$$\mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} -5,10 + 22,89i & 4,18 - 126,25i & 0 & 0 & -4,79 + 30,71i \\ -2,53 - 18,23i & 0 & 0 & 1,62 - 31,35i & 14,75 - 17,91i \end{bmatrix}.$$

Матрица коэффициентов \mathbf{H} модели предистортера полосового сигнала OFDM:

$$\mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} -5,49 + 10,26i & -17,16 - 89,67i & 0 & 0 & 1,79 - 6,85i \\ 2,88 - 5,69i & 0 & 0 & -3,10 + 8,08i & -10,21 + 3,44i \end{bmatrix}.$$

Оценив уровень компонент 3-го и 5-го порядков в системе без предистортера и сравнив их величины в системе с предистортером, можно оценить снижение уровня интермодуляционных искажений.

На рис. 3 приведен результат работы системы с предискажением сигнала. Для визуальной оценки уровня искажений области графика вблизи ИМИ 3-го и 5-го порядков приведены в увеличенном масштабе. Видно, что снижение уровня ИМИ 3-го порядка составляет 66,5 дБ, 5-го порядка – 36 дБ.

Уровень подавления ИМИ при усилении полосового сигнала определялся в виде изменения отно-

шения С/Ш для двух вариантов УМ: без применения предистортера и с ним. Суть метода заключается в разделении искаженного выходного сигнала усилителя (рис. 4, а) на две составляющие. Одна (сигнальная) – идеально усиленный входной сигнал, другая (шумовая) – шумовой сигнал, обусловленный ИМИ и шумом квантования (рис. 4, б). Величина С/Ш определялась в виде отношения мощности сигнала к мощности шума в полосе сигнала, что достигается путем полосовой режекции сигнальных компонент на выходе УМ с последующей фильтрацией шума в полосе сигнала (рис. 4, в).

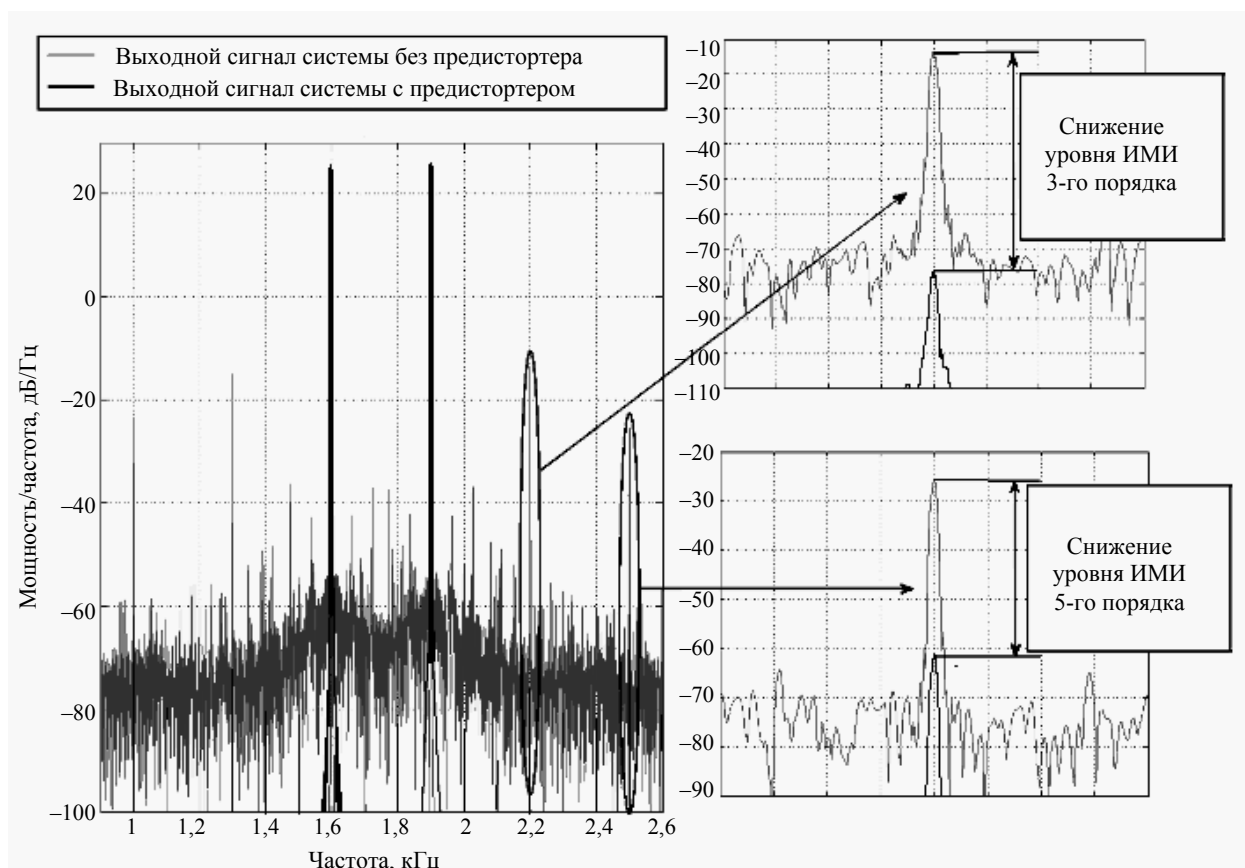


Рис. 3. Расчетные спектры выходных сигналов для модели УМ с предистортером и без него

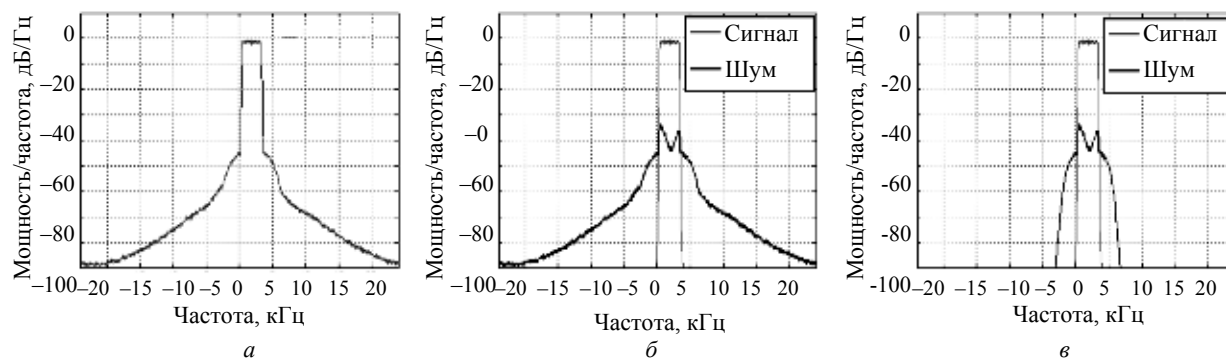


Рис. 4. Разделение выходного сигнала на идеальный неискаженный входной сигнал и шум системы без предистортера: а – сигнал на выходе УМ; б – идеальный усиленный сигнал и шум; в – идеальный усиленный сигнал и фильтрованный шум

На рис. 5 приведены спектральные плотности мощности выхода УМ для системы с предистортером, аналогичные по смыслу таковым на рис. 4.

Сопоставление результатов моделирования (рис. 4 и 5) показывает, что в схеме УМ с предистортером отношение С/Ш составляет 76,8 дБ и без пре-

дистортера – 36,2 дБ, т.е. достигается улучшение С/Ш на 40,6 дБ.

Данная методика позволяет осуществить сравнение эффективности подавления ИМИ по реальному входному сигналу, что является ее важным преимуществом в сравнении с двухтоновым методом.

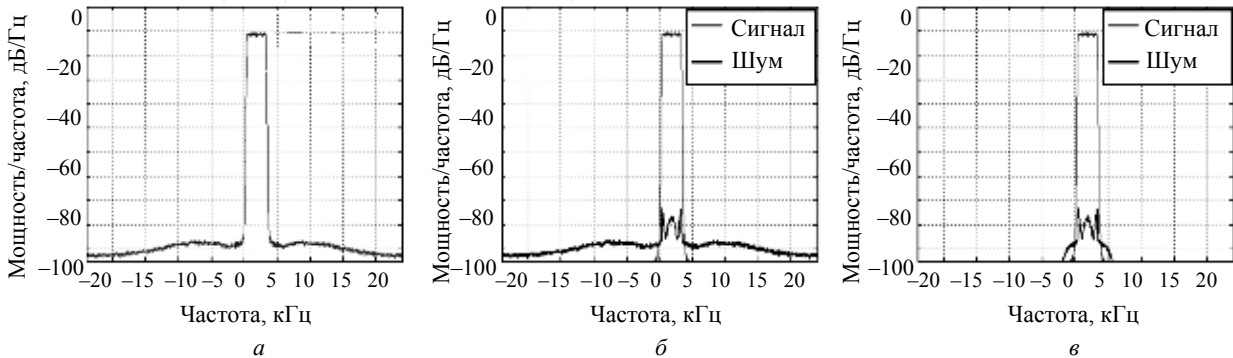


Рис. 5. Разделение выходного сигнала на идеальный неискаженный входной сигнал и шум системы с предистортером: а – сигнал на выходе УМ; б – идеальный усиленный сигнал и шум; в – идеальный усиленный сигнал и фильтрованный шум

Эффективность подавления ИМИ при использовании предистортера

Эффективность разработанного алгоритма подавления ИМИ проверялась на реальном усилителе мощности. Исследования выполнены с использованием реального УМ в составе цифрового КВ/УКВ возбуждательного устройства «Монолит».

На вход реального усилителя (рис. 6) подавался предискаженный сигнал, сформированный с помощью разработанной программной модели для значений параметров, определенных выше. На рис. 6 по-

казана схема экспериментального макета. Генерация сигналов осуществлялась звуковой картой в составе ЭВМ.

В качестве тестируемых сигналов выбраны двухтоновый сигнал (рис. 7, а) для оценки снижения НКИ 3-го и 5-го порядка и OFDM-сигнал (рис. 7, б), для оценки улучшения отношения сигнал/шум. Предискаженные сигналы сформированы на основе моделей предистортеров, полученных по экспериментальным данным, приведенным выше.

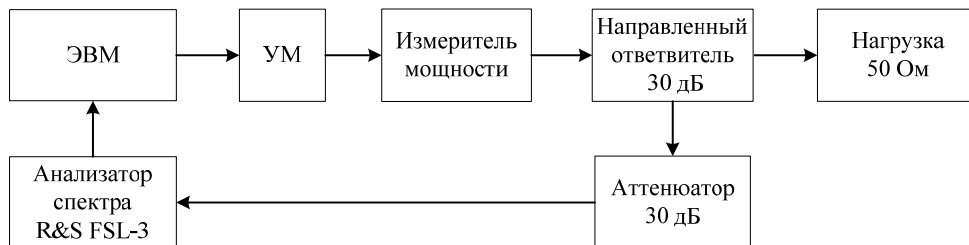


Рис. 6. Схема экспериментального макета

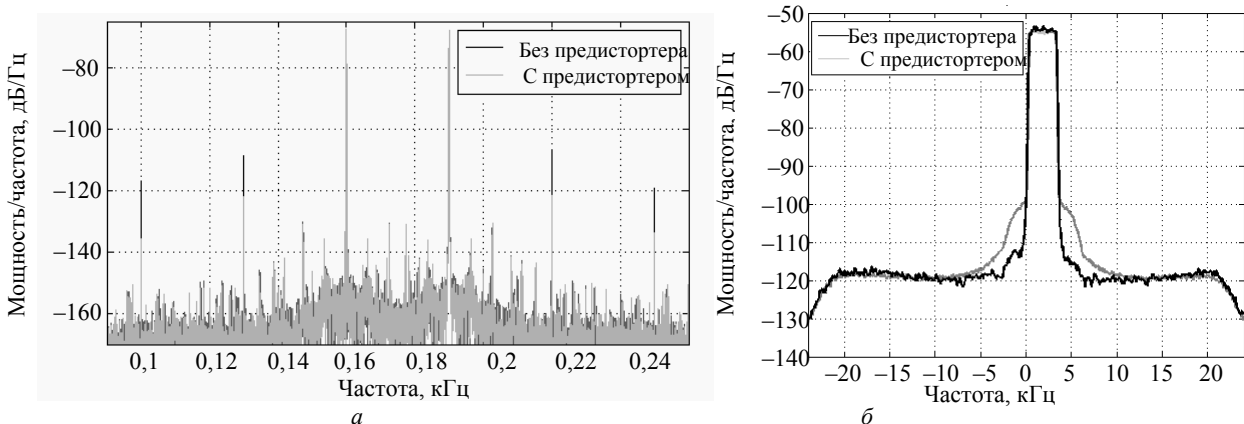


Рис. 7. Спектры двухтонового (а) и полосового (б) сигналов на выходе усилителя мощности с предискажением сигнала и без предискажения

В результате проведенного эксперимента были получены следующие результаты:

Снижение уровня НКИ 3-го порядка составляет 14,4 дБ (с уровня –39,4 до –53,8 дБ); 5-го порядка – 14,6 дБ (с уровня –51,5 до –66,1 дБ).

Сравнение выходных сигналов усилителя, полученных при пропуске неизменного OFDM-сигнала и предискаженного OFDM-сигнала, показало, что улучшение отношения сигнал/шум составляет 10,7 дБ.

Заключение

Расчетное подавление искажений составило 66,5 дБ для ИМИ 3-го порядка и 36 дБ для ИМИ 5-го порядка при использовании двухтонового входного сигнала, улучшение отношения С/Ш для полосового OFDM сигнала составило 40,6 дБ.

Алгоритм компенсации ИМИ обеспечивает снижение уровня искажений в реальном УМ при двухтоновом входном сигнале на 14,4–14,6 дБ, при полосовом входном сигнале отношение С/Ш увеличивается на 10,7 дБ.

Высокие значения снижения комбинационных составляющих, полученные при моделировании, объясняются точным совпадением структуры математической модели усилителя мощности (порядок нелинейности и глубина памяти) с соответствующей структурой, введенной в обучаемый предистортер. Очевидно, что в реальной системе эти структуры совпадают лишь приближенно. Это является причиной расхождения расчетных и фактических уровней подавления ИМИ.

Литература

1. A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomials / L. Ding, G.T. Zhou, D.R. Morgan et al. // IEEE Transactions on Communications. – 2004. – Vol. 52. – P. 159–165.

2. Нефедов В.И. Линеаризация характеристик мощных транзисторных усилителей систем подвижной связи [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://www.dissercat.com/content/linearizatsiya-kharakteristik-moshchnykh-tranzistornykh-usilitelei-sistem-podvizhnoi-svyazi>, платный (дата обращения: 22.03.2016).

3. Schetzen M. The Volterra and Wiener Theories of Nonlinear System. – Malabar, Florida, USA: Krieger publishing company, 2006. – 618 p.

4. Саяпин В.Ю. Обзор и сравнительный анализ способов построения компенсаторов нелинейных искажений в усилителях мощности / В.Ю. Саяпин, В.И. Тисленко, В.В. Родионов // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 4 (38). – С. 26–31.

5. Курушин А.А. Расчёт динамического диапазона многокаскадного СВЧ-устройства / А.А. Курушин, В.Б. Текшев // Радиотехника. – 1981 – Т. 36, № 8. – С. 88–90.

Саяпин Вячеслав Юрьевич

Мл. науч. сотрудник НИИ радиотехнических систем

(РТС) ТУСУРа

Тел.: +7-906-956-70-35

Эл. почта: sayapinvy@main.tusur.ru

Тисленко Владимир Ильич

Д-р техн. наук, профессор каф. РТС

Тел.: +7-913-802-61-41

Эл. почта: wolar1491@yandex.ru

Sayapin V.Y., Tislenko V.I.

Research of suppression level of intermodulation distortion in a nonlinear power amplifier with predistortion signal system

Parameters of the real power amplifier model was defined. The estimation of parameters of predistorter was done. Coefficients of predistorter model was calculated. Calculated values of reducing of intermodulation distortion in output signals of two-tone and OFDM power amplifier model was shown. Decrease of intermodulation distortion level in output signals of the real power amplifier was shown.

Keywords: intermodulation distortion, predistorter, power amplifier, nonlinear system model.