



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-39-47>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.391.82

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК И РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ УСИЛИТЕЛЕЙ РАДИОЧАСТОТЫ ДИАПАЗОНА FR1

В. И. МОРДАЧЕВ<sup>1</sup>, Е. В. СИНЬКЕВИЧ<sup>1</sup>, ФАЮ ВАН<sup>2</sup>, Д. А. ЦИОНЕНКО<sup>1</sup>,  
И. В. ШАКИНКО<sup>1</sup>, А. А. ДУБОВИК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Нанкинский университет информационных наук и технологий  
(г. Нанкин, Китайская Народная Республика)

Поступила в редакцию 06.07.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

**Аннотация.** Выполнены экспериментальные исследования нелинейных свойств маломощных усилителей радиочастоты, аналогичных используемым в оборудовании мобильной связи 4G/5G диапазона FR1. Измерения характеристик усилителей проведены с применением технологии двухчастотного зондирования на частотах полосы n7 (2500–2570 / 2620–2690 МГц), выделенной в республике для систем мобильной связи 4G, и полосы n78 (3300–3800 МГц), которую планируется использовать в республике для систем мобильной связи 5G. На основе результатов измерений двухчастотных характеристик усилителей, их односигнальных амплитудных характеристик, а также двухсигнальных амплитудных характеристик и значений динамического диапазона по интермодуляции 3-, 5-, 7- и 9-го порядков в первой гармонической зоне синтезированы полиномиальные модели высоких порядков, описывающие передаточные характеристики исследуемых усилителей. Синтезированные модели пригодны для применения в широком динамическом диапазоне входных воздействий при одновременном анализе нелинейных эффектов всех видов, представляющих опасность для радиоприема в сложной электромагнитной обстановке в полосах частот мобильной (сотовой) связи, – как «тонких» (интермодуляция), так и «грубых» (блокирование, перекрестные искажения) эффектов. При использовании технологии дискретного нелинейного анализа поведения радиооборудования в сложной электромагнитной обстановке полученные модели обеспечивают высокую эффективность количественного анализа нелинейных процессов и радиопомех, возникающих в оборудовании и радиосетях 4G/5G/6G в сложной электромагнитной обстановке.

**Ключевые слова:** мобильная связь, 4G, 5G, электромагнитная обстановка, усилитель радиочастоты, нелинейность, интермодуляция, блокирование, динамический диапазон, полиномиальная модель.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках совместного научного проекта T22КИТГ-018 (2022YFE0122700) при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Национальной программы ключевых исследований и разработок (КНР).

**Для цитирования.** Экспериментальные исследования характеристик и разработка моделей нелинейности усилителей радиочастоты диапазона FR1 / В. И. Мордачев [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 1. С. 39–47. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-39-47>.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS AND DEVELOPMENT OF NONLINEARITY MODELS FOR FR1-RANGE RADIO-FREQUENCY AMPLIFIERS

VLADIMIR I. MORDACHEV<sup>1</sup>, EUGENE V. SINKEVICH<sup>1</sup>, FAYU WAN<sup>2</sup>,  
DZMITRY A. TSYANENKA<sup>1</sup>, IVAN V. SHAKINKA<sup>1</sup>, ARTHUR A. DUBOVIK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>Nanjing University of Information Science and Technology (Nanjing, People's Republic of China)

Submitted 06.07.2023

**Abstract.** Experimental studies of nonlinear properties of low-power radio-frequency amplifiers similar to those used in 4G/5G mobile communication equipment of the FR1 frequency range are carried out. The measurements of the characteristics of the amplifiers are performed by using the double-frequency testing technique at frequencies of the n7 band (2500–2570 / 2620–2690 MHz), which is allocated in Belarus for 4G mobile communication systems, and the n78 band (3300–3800 MHz), which is planned to be used in Belarus for 5G mobile communications. Based on the results of the measurements of double-frequency characteristics of the amplifiers, their single-tone amplitude characteristics, as well as two-tone characteristics and values of the dynamic range of 3-, 5-, 7-, and 9<sup>th</sup> order intermodulation in the first harmonic zone, high-order polynomial models of transfer characteristics of the investigated amplifiers are synthesized. The synthesized models are suitable for use in a wide dynamic range of input signals in case of simultaneous modeling of nonlinear effects of all kinds that pose a danger to radio reception in a complex electromagnetic environment created in the frequency bands of mobile (cellular) communications: both “subtle” effects (intermodulation) and “rough” effects (desensitization, cross-modulation). When using the technology of discrete nonlinear analysis of the behavior of radio equipment in a complex electromagnetic environment, the obtained models provide high efficiency of simulation and quantitative analysis of nonlinear processes and radio interference occurring in 4G/5G/6G radio equipment and networks in a complex electromagnetic environment.

**Keywords:** mobile communications, 4G, 5G, electromagnetic environment, radio-frequency amplifier, nonlinearity, intermodulation, desensitization, dynamic range, polynomial model.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** The research was carried out within the framework of joint scientific project T22KITG-018 (2022YFE0122700) with the financial support of the Belarusian Republication Foundation for Fundamental Research and the National Key Research and Development Program (People's Republic of China).

**For citation.** Mordachev V. I., Sinkevich E. V., Fayu Wan, Tsyankenka D. A., Shakinka I. V., Dubovik A. A. (2024) Experimental Investigation of Characteristics and Development of Nonlinearity Models for FR1-Range Radio-Frequency Amplifiers. *Doklady BGUIR*. 22 (1), 39–47. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-39-47> (in Russian).

### Введение

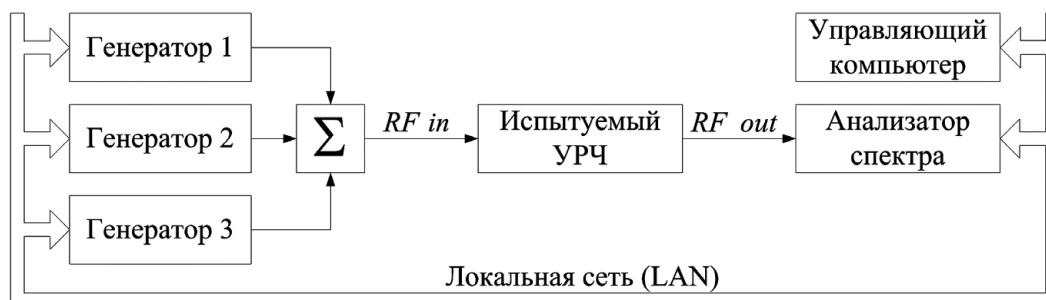
Чрезвычайно интенсивное развитие и проникновение во все сферы человеческой деятельности беспроводных технологий и сервисов в рамках эволюции мобильной связи (МС) 4G→5G→6G связано с ожидаемым увеличением на несколько порядков пространственной плотности источников радиочастотных (РЧ) электромагнитных полей (ЭМП) – до  $10^6$  ед./км<sup>2</sup> в рамках пятого (5G) и до  $10^7$  ед./км<sup>2</sup> – шестого (6G) поколений при одновременном декларируемом увеличении на много порядков территориальной плотности мобильного трафика – до 10 Мбит/с/м<sup>2</sup> для 5G и до 1 Гбит/с/м<sup>2</sup> для 6G [1]. Это неизбежно приведет к существенному усложнению электромагнитной обстановки (ЭМО) и условий радиоприема в местах интенсивного использования оборудования 4G/5G/6G производственного и бытового назначения, включая рост динамического диапазона РЧ ЭМП по меньшей мере на 10–20 дБ при полномасштабной реализации систем и сервисов 5G и 6G (принимая во внимание установленную в [2] количественную связь между

числом РЧ ЭМП, присутствующих на входе радиоприемника (РП), и их динамическим диапазоном). При существующих значениях динамического диапазона линейности РЧ входа современных РП базовых (БС) и периферийных (ПС) станций систем 4G/5G/6G на уровне 60–75 дБ это неизбежно явится причиной весьма значительного увеличения опасности нелинейных помех радиоприему, в первую очередь интермодуляционных. Без повышения линейности радиотрактов РП БС и ПС и разработки адекватных моделей характеристик нелинейности их входных элементов (описывающих поведение РП при существенном превышении мощными сигналами входной ЭМО верхней границы линейного режима работы этих элементов), а также без эффективного управления сложностью ЭМО, создаваемой системами МС 5G/6G, обеспечить эффективное функционирование данных радиотрактов при полномасштабной реализации систем и услуг 5G/6G будет практически невозможно. В связи с этим актуальными являются исследования характеристик нелинейности и разработка адекватных моделей передаточных характеристик усилителей радиочастоты (УРЧ) РП в полосах частот 5G диапазонов УВЧ, СВЧ и КВЧ.

Цель настоящей работы – создание адекватных моделей передаточных характеристик УРЧ диапазона FR1 5G (410–7125 МГц), обеспечивающих возможность анализа поведения этих усилителей при большом динамическом диапазоне входных воздействий, на основе результатов экспериментальных исследований характеристик нелинейности таких УРЧ с использованием технологии двухчастотного зондирования (ДЧЗ) [3].

### Экспериментальные исследования характеристик нелинейности усилителей радиочастоты

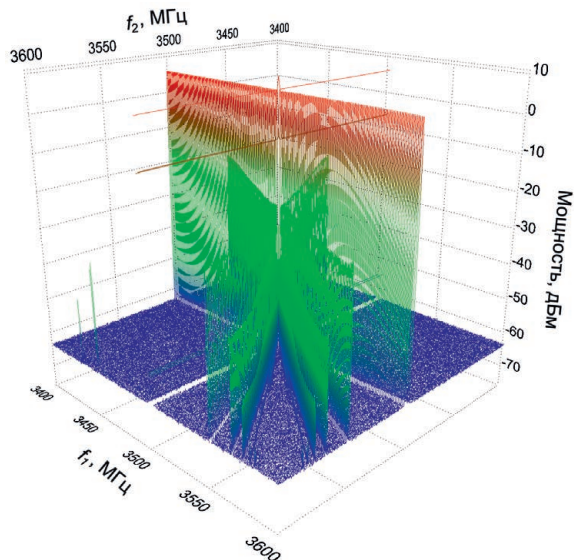
Проведены экспериментальные исследования нелинейных свойств УРЧ, аналогичных используемым в оборудовании МС 4G/5G диапазона FR1, – усилителей ZJL-6G+ и ZX60-6013E-S+ производства компании Mini-Circuits (США). Измерения характеристик нелинейности этих УРЧ выполнены на частотах полосы n7 (2500–2570 / 2620–2690 МГц), выделенной в Беларуси для систем МС 4G, и полосы n78 (3300–3800 МГц), которую планируется применять в республике для систем МС 5G. Структурная схема автоматизированной системы (АС) ДЧЗ, использованной при проведении измерений, приведена на рис. 1.



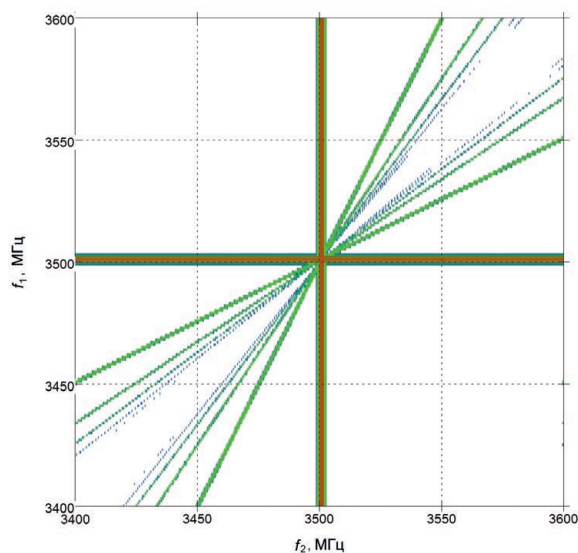
**Рис. 1.** Структурная схема автоматизированной системы двухчастотного зондирования при испытаниях усилителей радиочастоты: 1, 2, 3 – генераторы Agilent N5181A, E8257D, E4438C; анализатор спектра – Agilent N9020A

**Fig. 1.** Block diagram of the automated double-frequency test system used in the tests of radio-frequency amplifiers: 1, 2, 3 – generators Agilent N5181A, E8257D, E4438C; spectrum analyzer – Agilent N9020A

При проведении исследований в окрестности частот 2551 и 3501 МГц измерены следующие характеристики, отражающие нелинейные свойства рассматриваемых УРЧ: 3D двухчастотные характеристики (ДЧХ, в примере на рис. 2 амплитуды входных испытательных сигналов одинаковы и равны (–6) дБм), 2D двухчастотные диаграммы (ДЧД, в примере на рис. 3 минимальный отображаемый уровень отклика на выходе УРЧ равен (–61,5) дБм), односигнальные амплитудные характеристики (АХ-1), а также амплитудные характеристики (АХ-ИМ) и значения динамического диапазона (ДДИ) анализируемых УРЧ по двухсигнальной интермодуляции 3-, 5-, 7- и 9-го порядков в первой гармонической зоне (табл. 1).



**Рис. 2.** Двухчастотная характеристика усилителя радиочастоты ZX60-6013E-S+  
**Fig. 2.** Double-frequency characteristic of the ZX60-6013E-S+ radio-frequency amplifier



**Рис. 3.** Двухчастотная характеристика усилителя радиочастоты ZX60-6013E-S+ (рис. 2) в виде двухчастотной диаграммы  
**Fig. 3.** Double-frequency characteristic of the ZX60-6013E-S+ radio-frequency amplifier (Fig. 2) in the form of a double-frequency diagram

**Таблица 1.** Значения динамического диапазона по интермодуляции нечетных порядков для анализируемых усилителей радиочастоты

**Table 1.** The values of the dynamic range for intermodulation of odd orders for the analyzed radio-frequency amplifiers

Порядок / Order	Динамический диапазон, дБ, на разных частотах для усилителей / Dynamic range, dB, at different frequencies for amplifiers			
	ZX60-6013E-S+		ZJL-6G+	
	2551 МГц	3501 МГц	2551 МГц	3501 МГц
3	71,6	70,9	71,2	71,8
5	82,3	81,5	81,4	82,0
7	85,9	84,8	84,7	85,1
9	87,1	86,2	86,5	86,5

АХ-1 и АХ-ИМ УРЧ измерены в большом динамическом диапазоне уровней входных сигналов (от приведенного уровня собственных шумов до уровня насыщения), что обеспечивает возможность синтеза математических моделей нелинейности, пригодных для одновременного анализа нелинейных явлений всех основных видов, возникающих в УРЧ: интермодуляции, блокирования, перекрестных искажений. Корректность результатов измерений обеспечена высокой линейностью используемого измерительного оборудования и подтверждена соответствием между измеренными значениями основных числовых характеристик УРЧ (коэффициента усиления, точки 1-дБ компрессии) и их номинальными значениями, приведенными в спецификациях производителя.

### Синтез моделей нелинейности усилителей радиочастоты по результатам испытаний

На основе измеренных АХ-1 и значений ДДИ нечетных порядков (табл. 1) выполнен синтез полиномиальных моделей нелинейности УРЧ ZX60-6013E-S+ и ZJL-6G+ на частотах 4G и 5G по методикам [4]. Результаты синтеза представлены в табл. 2, 3 в виде коэффициентов полиномиальных моделей передаточных характеристик исследуемых УРЧ по мгновенному значению сигнала. В табл. 2 приведены коэффициенты при степени  $k$  классических моделей 9-го порядка  $C09rpnnnnH$ , полученных на основе малосигнального коэффициента усиления

и ДДИ 3-, 5-, 7- и 9-го порядков, в табл. 3 – коэффициенты при степени  $k$  комбинированных моделей, полученных на основе АХ-1 по полезному сигналу и ДДИ тех же порядков.

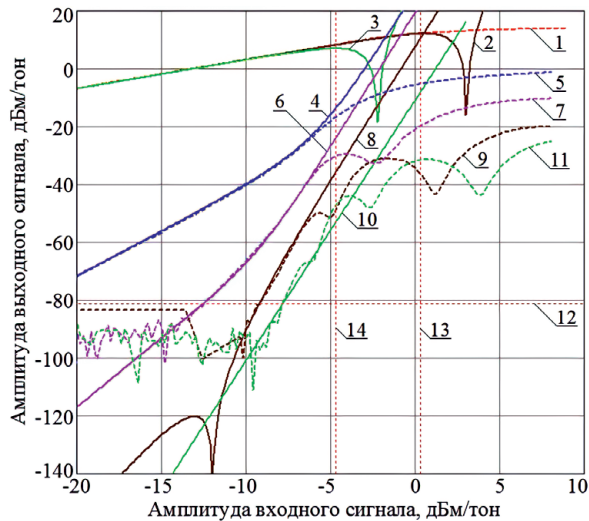
**Таблица 2.** Коэффициенты при степени  $k$  классических полиномиальных моделей C09pnnnnH  
**Table 2.** Coefficients of the  $k$ -th degree term of classical polynomial models C09pnnnnH

$k$	Коэффициент на разных частотах для усилителей / Coefficient at different frequencies for amplifiers			
	ZX60-6013E-S+		ZJL-6G+	
	2551 МГц	3501 МГц	2551 МГц	3501 МГц
1	5,01187233627272E+00	4,46683592150963E+00	4,67735141287198E+00	4,41570447353312E+00
3	-3,79115739525804E+00	-3,41875895026638E+00	-3,53813178804219E+00	-2,41065362321554E+00
5	-2,91186662445994E+01	-2,41015325335133E+01	-2,56237392271981E+01	-1,74863305413972E+01
7	3,98147207773823E+02	3,00164254336830E+02	1,59417667531407E+02	2,17449779770705E+02
9	-6,49934244508732E+03	-5,85961956190790E+03	-6,49934244508734E+03	-3,87141225236983E+03

**Таблица 3.** Коэффициенты при степени  $k$  комбинированных полиномиальных моделей  
**Table 3.** Coefficients of the  $k$ -th degree term of combined polynomial models

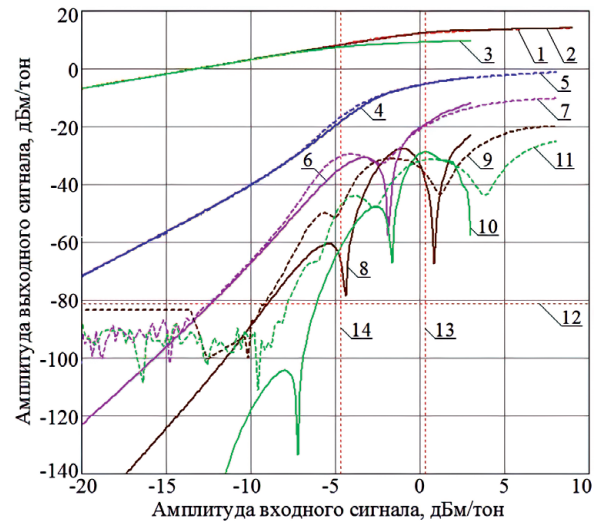
$k$	Коэффициент на разных частотах для усилителей / Coefficient at different frequencies for amplifiers			
	ZX60-6013E-S+		ZJL-6G+	
	2551 МГц, A37C09pnnnnH	3501 МГц, A27C07pnnnH	2551 МГц, A27C05pnnH	3501 МГц, A27C09pnnnnH
1	5,01187233627272E+00	4,46683592150963E+00	4,67735141287198E+00	4,41570447353312E+00
3	-3,79115739525804E+00	-3,44609013850997E+00	-3,53814123356727E+00	-2,41065362321554E+00
5	-2,91186662445994E+01	-9,70028140264253E+00	-2,53582910793778E+01	-1,74863305413972E+01
7	3,98147207773823E+02	-2,70465533836469E+02	7,05992100234347E+02	2,17449779770705E+02
9	-6,49934244508732E+03	4,58787524879355E+03	-5,48724517538845E+04	-3,87141225236983E+03
11	1,01480030648706E+05	-1,21172658596110E+05	8,84405634294431E+05	-5,61302923440314E+04
13	-7,75265511468785E+06	1,42210112573335E+06	-6,84016625357666E+06	1,18032587231114E+06
15	1,71406007469750E+08	-8,52923908140936E+06	3,12212580730648E+07	-8,24969126534329E+06
17	-1,87031429832840E+09	3,00968498916697E+07	-9,11981992595364E+07	3,12228105659215E+07
19	1,24549865886867E+10	-6,65953658263093E+07	1,75737016912818E+08	-7,19951931445232E+07
21	-5,56627201956479E+10	9,38547224449889E+07	-2,22855400361206E+08	1,04348024983096E+08
23	1,75172335386893E+11	-8,20192144456022E+07	1,79182893656428E+08	-9,31063883242535E+07
25	-3,97447720477309E+11	4,05857091359126E+07	-8,28792772064902E+07	4,68323085663531E+07
27	6,54730911301783E+11	-8,70302968072780E+06	1,68075326139024E+07	-1,01779297720287E+07
29	-7,77165806704896E+11	-	-	-
31	6,48378065905609E+11	-	-	-
33	-3,61006508824642E+11	-	-	-
35	1,20491966249457E+11	-	-	-
37	-1,82393438286767E+10	-	-	-

Проверка корректности и анализ качества синтезированных моделей нелинейности УРЧ выполнены путем сравнения характеристик (АХ-1 и АХ-ИМ 3-, 5-, 7- и 9-го порядков) моделей с измеренными характеристиками УРЧ. В качестве примеров на рис. 4–7 показаны графики амплитудных характеристик различных моделей УРЧ ZX60-6013E-S+ и результаты измерений в окрестности частоты 3501 МГц. Обозначения линий на рис. 4–7: 1 – измеренная АХ-1 УРЧ; 2, 3 – одно- и двухсигнальная АХ-1 модели УРЧ соответственно; 4, 5 – равносигнальные АХ-ИМ 3-го порядка – модель и измерения соответственно; 6, 7 – равносигнальные АХ-ИМ 5-го порядка – модель и измерения соответственно; 8, 9 – равносигнальные АХ-ИМ 7-го порядка – модель и измерения соответственно; 10, 11 – равносигнальные АХ-ИМ 9-го порядка – модель и измерения соответственно; 12 – уровень восприимчивости к интермодуляции на выходе УРЧ; 13 – нижняя граница области блокирования для односигнальных амплитудных характеристик (точка децибельной компрессии односигнальной АХ-1); 14 – нижняя граница области блокирования для двухсигнальных амплитудных характеристик (точка децибельной компрессии двухсигнальной АХ-1).



**Рис. 4.** Амплитудные характеристики усилителя радиочастоты ZX60-6013E-S+ и классической модели C09pnnnnH его нелинейности в окрестности частоты 3501 МГц

**Fig. 4.** Amplitude characteristics of the radio-frequency amplifier ZX60-6013E-S+ and the classical model C09pnnnnH of its nonlinearity in the vicinity of 3501 MHz



**Рис. 5.** Амплитудные характеристики усилителя радиочастоты ZX60-6013E-S+ и комбинированной модели A27C07pnnnH его нелинейности в окрестности частоты 3501 МГц

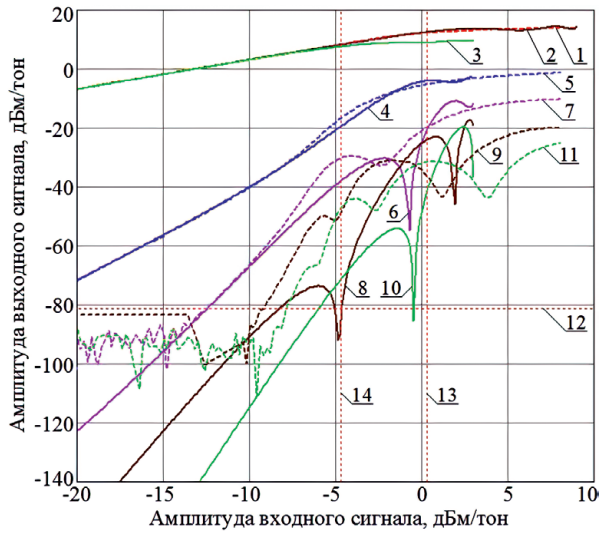
**Fig. 5.** Amplitude characteristics of the radio-frequency amplifier ZX60-6013E-S+ and the combined model A27C07pnnnH of its nonlinearity in the vicinity of 3501 MHz

Как следует из приведенных на рис. 4 и 5 результатов сравнения, в данной ситуации классическая модель 9-го порядка C09pnnnnH удовлетворительно аппроксимирует АХ-1 и АХ-ИМ 3-, 5-, 7- и 9-го порядков в режиме малой нелинейности (в котором уровень входного сигнала не превышает нижней границы области блокирования), а комбинированная модель 27-го порядка A27C07pnnnH адекватно воспроизводит уровни АХ-1 и АХ-ИМ 3-го и 5-го порядков в области не только малой, но и существенной нелинейности.

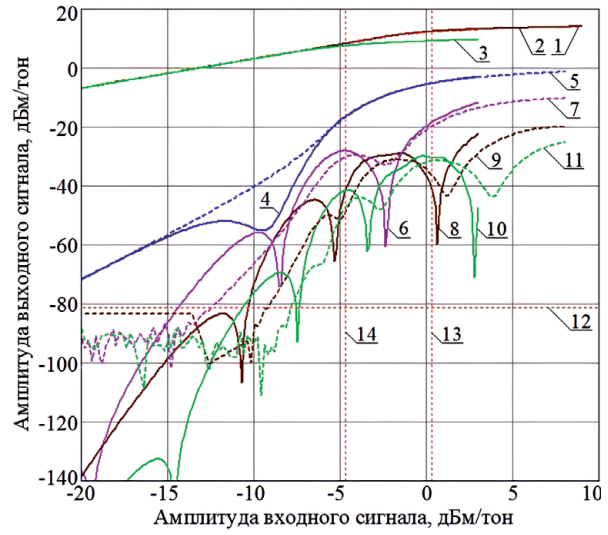
Установлено, что существует оптимальный порядок комбинированной полиномиальной модели. Например, A27C07pnnnH (рис. 5) получена в результате оптимизации полного порядка модели и порядка встроенной классической модели. Если при фиксированном порядке встроенной классической модели (в данном случае 7-м) уменьшать полный порядок модели менее оптимального (в данном случае 27-го), то аппроксимация амплитудных характеристик усилителя моделью ухудшается, особенно в области ограничения и колена (перехода от области малой нелинейности к области ограничения), из-за нехватки степеней свободы полинома (на рис. 6 в качестве примера приведена модель 13-го порядка A13C07pnnnH). Если же полный порядок модели увеличивать более оптимального, то ухудшается аппроксимация моделью амплитудных характеристик усилителя по интермодуляции в области малой нелинейности, поскольку полиномиальная модель начинает воспроизводить погрешности измерения АХ-1 (на рис. 7 в качестве примера приведена модель 39-го порядка A39C07pnnnH).

Для оценки частотной зависимости нелинейных свойств исследуемых УРЧ и моделей их нелинейности на рис. 8, 9 показаны результаты измерений и моделирования характеристик УРЧ ZX60-6013E-S+, аналогичные приведенным на рис. 4, 5, но для центральной частоты 2551 МГц. Их анализ свидетельствует об относительно малой частотной зависимости размеров линейной области одно- и двухсигнальной АХ-1 и о более существенной (и усиливающейся с ростом порядка интермодуляции) зависимости формы АХ-ИМ от частоты.

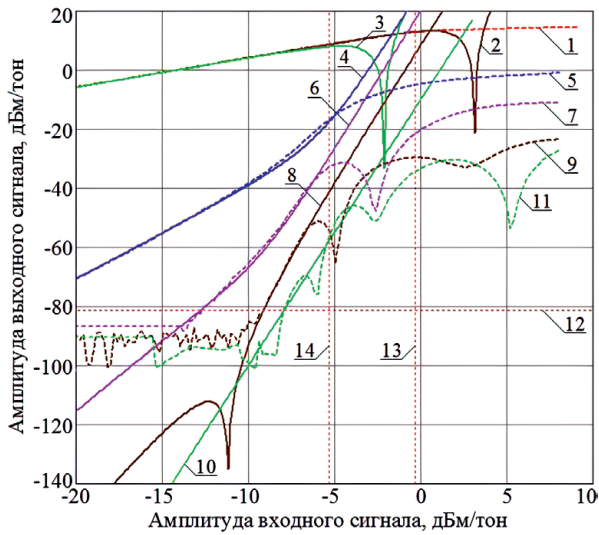
Синтезированные комбинированные полиномиальные модели (описывающие как область малой нелинейности, так и область насыщения) пригодны для одновременного анализа нелинейных явлений всех основных видов, возникающих в УРЧ: интермодуляции, блокирования, перекрестных искажений. Это полезное свойство обеспечивает возможность моделирования поведения рассмотренных УРЧ в электромагнитной обстановке различной сложности, создаваемой системами МС 4G/5G/6G с разной пространственной плотностью источников РЧ ЭМП.



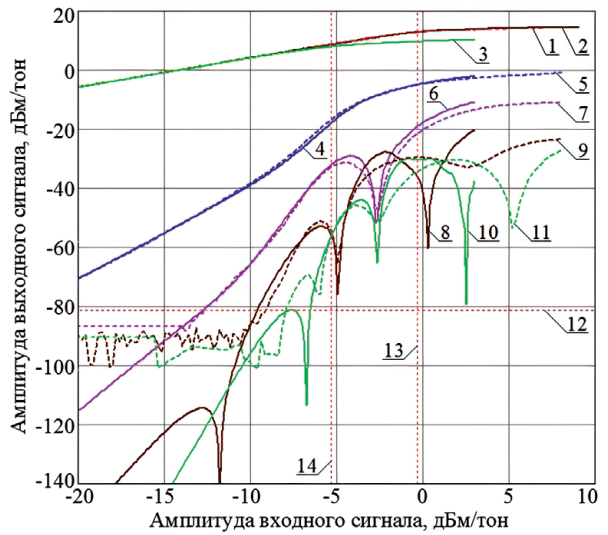
**Рис. 6.** Амплитудные характеристики усилителя радиочастоты ZX60-6013E-S+ и комбинированной модели A13C07pnnnH его нелинейности в окрестности частоты 3501 МГц  
**Fig. 6.** Amplitude characteristics of the radio-frequency amplifier ZX60-6013E-S+ and the combined model A13C07pnnnH of its nonlinearity in the vicinity of 3501 MHz



**Рис. 7.** Амплитудные характеристики усилителя радиочастоты ZX60-6013E-S+ и комбинированной модели A39C07pnnnH его нелинейности в окрестности частоты 3501 МГц  
**Fig. 7.** Amplitude characteristics of the radio-frequency amplifier ZX60-6013E-S+ and the combined model A39C07pnnnH of its nonlinearity in the vicinity of 3501 MHz



**Рис. 8.** Амплитудные характеристики усилителя радиочастоты ZX60-6013E-S+ и классической модели C09pnnnnH его нелинейности в окрестности частоты 2551 МГц  
**Fig. 8.** Amplitude characteristics of the radio-frequency amplifier ZX60-6013E-S+ and the classical model C09pnnnnH of its nonlinearity in the vicinity of 2551 MHz



**Рис. 9.** Амплитудные характеристики усилителя радиочастоты ZX60-6013E-S+ и комбинированной модели A37C09pnnnnH его нелинейности в окрестности частоты 2551 МГц  
**Fig. 9.** Amplitude characteristics of the radio-frequency amplifier ZX60-6013E-S+ and the combined model A37C09pnnnnH of its nonlinearity in the vicinity of 2551 MHz

## Заключение

1. В статье синтезированы полиномиальные модели передаточных характеристик усилителей радиочастоты, пригодные для использования в широком динамическом диапазоне входных воздействий при одновременном моделировании нелинейных эффектов всех видов, представляющих опасность для радиоприема в сложной электромагнитной обстановке в полосах частот мобильной связи, – как «тонких» (интермодуляция), так и «грубых» эффектов (блокирование, перекрестные искажения).

2. В связи с отсутствием в научной литературе параметров полиномиальных моделей высоких порядков, пригодных для описания нелинейности современных маломощных усилителей радиочастоты диапазона FR1 в большом динамическом диапазоне входных воздействий, данные табл. 2 и 3 могут использоваться в качестве справочных. Это обеспечивает возможность исследований, эффективного моделирования и количественного анализа нелинейных процессов и радиопомех, возникающих в оборудовании и радиосетях мобильной связи 4G/5G/6G при работе в сложной электромагнитной обстановке, с использованием технологии [5] дискретного нелинейного анализа поведения радиооборудования, которая при фиксированном порядке полиномиальных моделей передаточных характеристик инвариантна к сложности электромагнитной обстановки.

## Список литературы / References

1. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X., et al. (2019) 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine*. 14 (3), 28–41.
2. Mordachev V. I. (2009) *System Ecology of Cellular Communications*. Belarus State University Publishers Publ. (in Russian).
3. Mordachev V. I. (2000) Automated Double-Frequency Testing Technique for Mapping Receiver Interference Responses. *IEEE Trans. on EMC*. 42 (2), 213–225.
4. Sinkevich E. V. (2015) Composite Model of Radio-Frequency Path Nonlinearity for Discrete Analysis of Electromagnetic Compatibility. *Doklady BGUIR*. (3), 36–42 (in Russian).
5. Mordachev V. I., Sinkevich E. V. (2008) “EMC-Analyzer” Expert System: Improvement of IEMCAP Models. *XIX Int. Wroclaw Symp. on EMC*. 423–428.

## Вклад авторов

Мордачев В. И. выполнил постановку задачи, участвовал в обсуждении методик синтеза моделей и полученных результатов исследований, а также в подготовке рукописи статьи.

Синькевич Е. В. выполнил обоснование и экспериментальную проверку методик измерений и синтеза моделей нелинейности, принял участие в обсуждении результатов.

Фаю Ван участвовал в обсуждении методик измерений и полученных результатов.

Ционенко Д. А. выполнил проверку и оформление результатов синтеза моделей.

Шакинко И. В. участвовал в обсуждении методик измерений и проверки моделей.

Дубовик А. А. принял участие в измерениях характеристик нелинейности усилителей радиочастоты.

## Authors' contribution

Mordachev V. I. stated the research problem, participated in the discussion of models synthesis techniques and obtained results, in preparation of the article manuscript.

Sinkevich E. V. performed the substantiation and validation of the techniques of measurements and nonlinearity model synthesis, took part in the discussion of the obtained results.

Fayu Wan participated in the discussion of measurement techniques and the obtained results.

Tsyankenka D. A. performed the verification and the presentation of the model synthesis results.

Shakinka I. V. participated in the discussion of measurements and model models verification.

Dubovik A. A. took part in the measurements of the nonlinearity characteristics of the radio-frequency amplifiers.



### Сведения об авторах

**Мордачев В. И.**, канд. техн. наук, доц., зав. науч.-исслед. лаб. электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств НИЧ (НИЛ «ЭМС РЭС» НИЧ), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

**Синькевич Е. В.**, зам. зав. НИЛ «ЭМС РЭС» НИЧ, БГУИР

**Фаю Ван**, д-р филос. Нанкинского университета информационных наук и технологий

**Ционенко Д. А.**, канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр. НИЛ «ЭМС РЭС» НИЧ, БГУИР

**Шакинко И. В.**, науч. сотр. НИЛ «ЭМС РЭС» НИЧ, БГУИР

**Дубовик А. А.**, инж. НИЛ «ЭМС РЭС» НИЧ, БГУИР

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-84-38  
E-mail: mordachev@bsuir.by  
Мордачев Владимир Иванович

### Information about the authors

**Mordachev V. I.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the EMC R&D Laboratory, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

**Sinkevich E. V.**, Deputy Head of the EMC R&D Laboratory, BSUIR

**Fayu Wan**, PhD, Professor, Nanjing University of Information Science and Technology

**Tsyanenka D. A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Senior Researcher at the EMC R&D Laboratory, BSUIR

**Shakinka I. V.**, Researcher at the EMC R&D Laboratory, BSUIR

**Dubovik A. A.**, Engineer at the EMC R&D Laboratory, BSUIR

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-84-38  
E-mail: mordachev@bsuir.by  
Mordachev Vladimir Ivanovich