



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-53-60>

УДК 621.391.82

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ СМЕСИТЕЛЕЙ ДИАПАЗОНА FR1 ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Е. В. СИНЬКЕВИЧ¹, В. И. МОРДАЧЕВ¹, ФАЮ ВАН², Д. А. ЦИОНЕНКО¹,
И. В. ШАКИНКО¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

²Нанкинский университет информационных наук и технологий
(Нанкин, Китайская Народная Республика)

Аннотация. С применением технологии двухчастотного зондирования выполнен экспериментальный анализ нелинейных свойств маломощных радиочастотных смесителей на частотах полосы n7, выделенной в Беларуси для систем мобильной связи 4G, и полосы n78, которую планируется использовать в республике для систем мобильной связи 5G. На основе результатов измерений двухчастотных характеристик смесителей, их односигнальных амплитудных характеристик, а также двухсигнальных амплитудных характеристик и динамического диапазона по интермодуляции 3-, 5-, 7- и 9-го порядков в гармонической зоне полезного сигнала синтезированы полиномиальные модели высоких порядков, описывающие передаточные характеристики исследуемых смесителей и предназначенные для анализа влияния радиочастотных электромагнитных помех на радиотракты методом дискретного нелинейного моделирования при большом динамическом диапазоне входных воздействий. Полученные модели обеспечивают высокую адекватность и вычислительную эффективность количественного анализа нелинейных процессов и радиопомех, возникающих в приемном оборудовании радиосетей 4G/5G/6G в сложной электромагнитной обстановке.

Ключевые слова: мобильная связь 4G/5G, FR1, электромагнитная обстановка, смеситель, нелинейность, интермодуляция, блокирование, динамический диапазон, полиномиальная модель.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Экспериментальные исследования и разработка моделей нелинейности смесителей диапазона FR1 для анализа электромагнитной совместимости / Е. В. Синькевич [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 53–60. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-53-60>.

EXPERIMENTAL RESEARCH AND DEVELOPMENT OF NONLINEARITY MODELS FOR FR1 RANGE MIXERS FOR ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY ANALYSIS

EUGENE V. SINKEVICH¹, VLADIMIR I. MORDACHEV¹, FAYU WAN²,
DZMITRY A. TSYANENKA¹, IVAN V. SHAKINKA¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

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

Abstract. By using the technology of double-frequency testing, an experimental analysis of nonlinear properties of low-power radio-frequency mixers is performed at frequencies of the n7 band allocated in Belarus for 4G mobile communication systems and the n78 band that is planned to be used in Belarus for 5G mobile communications. Based on the results of the measurements of mixer characteristics (the double-frequency characteristics,

single-tone amplitude characteristics, as well as two-tone amplitude characteristics and dynamic ranges for 3rd-, 5th-, 7th-, and 9th-order intermodulation) in the harmonic zone of the useful signal, high-order polynomial models describing the transfer characteristics of the considered mixers are synthesized. These models are intended to analyze the effect of radio-frequency electromagnetic interference on radio links behavior in case of a large dynamic range of input signals by using the discrete nonlinear modeling technique. The obtained models provide high adequacy and computational efficiency of quantitative analysis of nonlinear processes and radio interference occurring in receivers of 4G/5G/6G radio networks in a complex electromagnetic environment.

Keywords: mobile communications 4G/5G, FR1, electromagnetic environment, mixer, nonlinearity, intermodulation, blocking, dynamic range, polynomial model.

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

For citation. Sinkevich E. V., Mordachev V. I., Fayu Wan, Tsyantenka D. A., Shakinka I. V. (2025) Experimental Research and Development of Nonlinearity Models for FR1 Range Mixers for Electromagnetic Compatibility Analysis. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 53–60. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-53-60> (in Russian).

Введение

Постоянное усложнение электромагнитной обстановки (ЭМО) в полосах частот мобильной (сотовой) связи (МС), сопровождающееся увеличением числа и динамического диапазона сигналов на входе радиоприемников базового и абонентского оборудования МС, приводит к росту опасности нелинейных помех радиоприему, таких как интермодуляция, блокирование, перекрестные искажения, преобразование шумов гетеродинов и др. Эти помехи создаются при воздействии мощных внеполосных сигналов на входную нелинейность радиоприемников, определяемую нелинейностью его входных элементов – усилителей радиочастоты (УРЧ) и смесителей, что обуславливает актуальность детальных исследований нелинейности этих элементов в интересах построения адекватных математических моделей, описывающих их передаточные характеристики (ПХ) в широком динамическом диапазоне входных воздействий.

В [1] такие исследования применительно к УРЧ, функционирующим в полосах n7 и n78 нижнего диапазона частот FR1 (0,410–7,125 ГГц) мобильной связи 4G/5G, позволили синтезировать полиномиальные модели ПХ УРЧ до 37 порядка, пригодные для использования в широком динамическом диапазоне входных воздействий с целью одновременного моделирования нелинейных эффектов всех видов, представляющих опасность для радиоприема в сложной ЭМО, создаваемой в полосах частот МС: как «тонких» эффектов (интермодуляция), так и «грубых» (блокирование, перекрестные искажения). Данные модели предназначены для использования в качестве типовых (справочных), обеспечивающих возможность исследований, эффективного моделирования и количественного анализа нелинейных процессов и радиопомех в радиосетях МС 4G/5G/6G в сложной ЭМО с использованием технологии [2, 3] дискретного нелинейного анализа поведения радиооборудования при большом динамическом диапазоне входных воздействий, которая при фиксированном порядке полиномиальных моделей передаточных характеристик инвариантна к сложности ЭМО. Однако эти модели не обеспечивают объективности анализа нелинейных помех функционированию широкого класса радиоприемных трактов МС, для которого входная нелинейность тракта в значительной степени определяется нелинейностью первого смесителя в силу слабой частотной избирательности УРЧ.

Цель исследований – разработка адекватных моделей ПХ смесителей диапазона FR1 4G/5G для гармонической зоны полезного сигнала, обеспечивающих возможность количественного анализа их поведения при большом динамическом диапазоне входных воздействий, на основе экспериментальных исследований характеристик нелинейности данных смесителей методом двухчастотного зондирования (ДЧЗ) [4].

Экспериментальные исследования характеристик нелинейности смесителей

Проведены экспериментальные исследования нелинейных свойств маломощных смесителей производства компании Mini-Circuits (США) на частотах полосы n7 (2500–2570 / 2620–2690 МГц), которая выделена в Беларуси для систем МС 4G, и полосы n78 (3300–3800 МГц), которую планируется использовать в республике для систем МС 5G. Структурная схема автоматизированной системы (АС) ДЧЗ, использованной при проведении измерений, приведена на рис. 1.

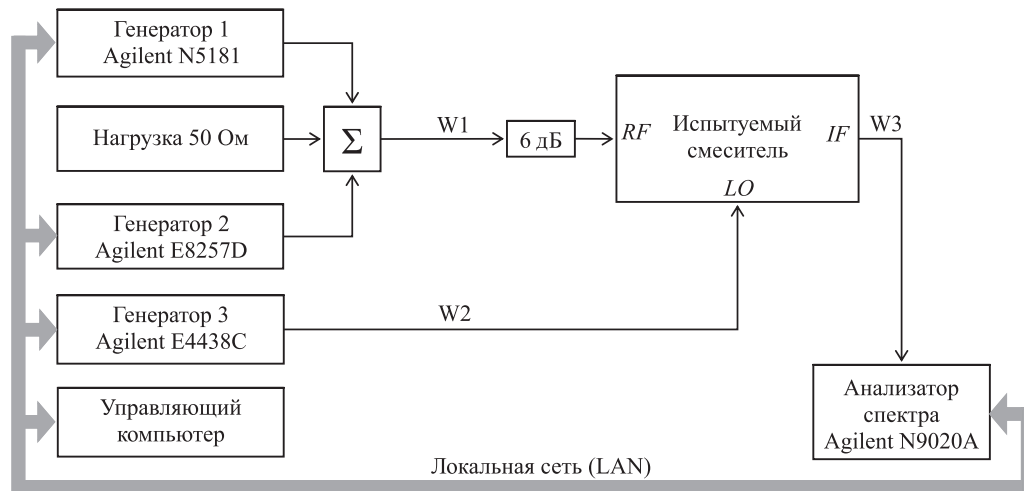


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы двухчастотного зондирования при измерении характеристик смесителя

Fig. 1. Block diagram of the automatic double-frequency test system used in the tests of mixer

При проведении исследований измерены следующие характеристики, отражающие нелинейные свойства радиочастотных смесителей: односигнальная амплитудная характеристика (АХ) по полезному сигналу (АХ-1), двухчастотная характеристика (ДЧХ), АХ по двухсигнальной интермодуляции (АХ-ИМ) 3-, 5-, 7- и 9-го порядков в гармонической зоне полезного сигнала. Амплитудные характеристики смесителей 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 радиочастотных смесителях: интермодуляции, блокирования, перекрестных искажений.

На рис. 2–5 приведены примеры результатов измерения характеристик нелинейности смесителя ZEM-4300+ в окрестности частоты полезного сигнала на входе RF , равной 2551 МГц (при частоте колебания гетеродина 3437 МГц, уровне колебания гетеродина 7 дБм и промежуточной частоте 886 МГц).

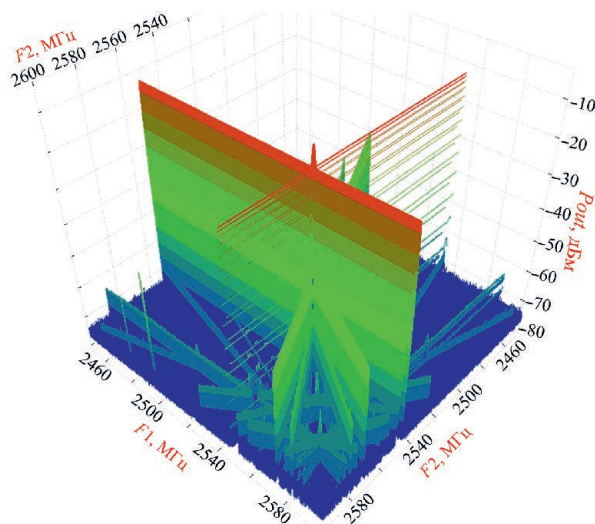


Рис. 2. Двухчастотная характеристика смесителя ZEM-4300+; амплитуды испытательных сигналов на входе RF одинаковы и равны (–6) дБм

Fig. 2. Double-frequency characteristic of ZEM-4300+ mixer; amplitudes of test signals at RF input are the same and equal to (–6) dBm

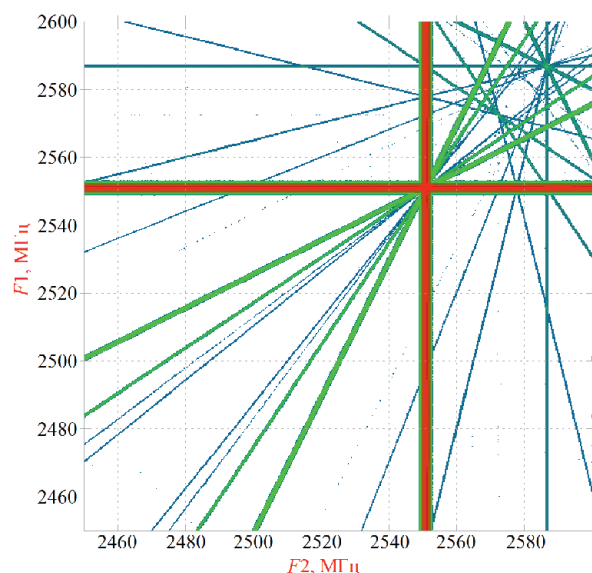


Рис. 3. Двухчастотная характеристика (ДЧХ) смесителя ZEM-4300+ в виде двухчастотной диаграммы – сечения ДЧХ по уровню (–71) дБм
Fig. 3. Double-frequency characteristic (DFC) of the ZEM-4300+ mixer in the form of a dual-frequency diagram – DFC cross-section at the level of (–71) dBm

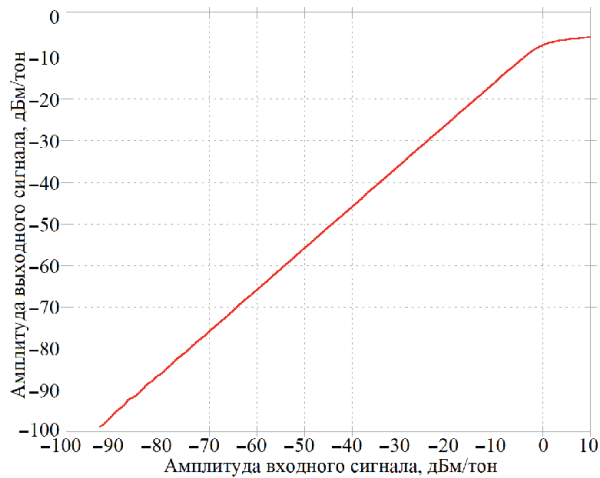


Рис. 4. Амплитудная характеристика AX-1 ZEM-4300+;

частота сигнала на входе $RF = 2551$ МГц

Fig. 4. Amplitude characteristic AX-1 of the ZEM-4300+; signal frequency at the RF input is 2551 MHz

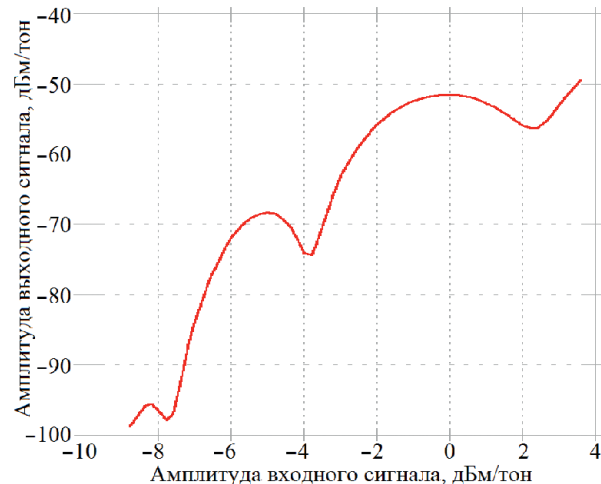


Рис. 5. Равносигнальная AX-ИМ-9 ZEM-4300+; частоты испытательных сигналов равны 2487,25 и 2500 МГц; частота продукта интермодуляции на выходе $IF = 886$ МГц

Fig. 5. Equal-signal AX-ИМ-9 of the ZEM-4300+; test signal frequencies are 2487.25 and 2500 MHz; intermodulation product frequency at the IF output is 886 MHz

Правильность выполненных измерений подтверждается соответствием между измеренными значениями основных числовых характеристик смесителей (потерь преобразования, уровня компрессии) и их номинальными значениями, приведенными в спецификациях производителя.

Синтез моделей нелинейности смесителей

На основе результатов испытаний маломощных смесителей методом ДЧЗ выполнен синтез полиномиальных моделей нелинейности данных смесителей по методикам, разработанным в [5]. Эти модели ориентированы на использование при анализе методом дискретного нелинейного моделирования [2, 3] влияния радиочастотных электромагнитных помех большого динамического диапазона на радиотракты, реализованные с использованием аналогичной элементной базы. В качестве исходных данных для синтеза использованы измеренные AX-1 и AX-ИМ 3-го, 5-го, 7-го и 9-го порядков в гармонической зоне полезного сигнала, а также значения динамического диапазона анализируемых смесителей по двухсигнальной интермодуляции (ДДИ) 3-го, 5-го, 7-го и 9-го порядков; каждое значение ДДИ вычислено на основе измеренной AX-ИМ соответствующего порядка и измеренной AX-1.

В качестве примера в табл. 1 и 2 приведены результаты синтеза полиномиальных моделей нелинейности смесителя ZEM-4300+ на частотах (2551 ± 180) МГц (для верхней настройки гетеродина 3437 МГц) и (3501 ± 18) МГц (для нижней настройки гетеродина 2615 МГц) при уровне основного колебания гетеродина 7 дБм и промежуточной частоте 886 МГц:

- классическая модель 9-го порядка $C09pnnnnH$ (табл. 1) получена на основе малосигнального коэффициента усиления и ДДИ 3-го, 5-го, 7-го и 9-го порядков;

- классическая модель 7-го порядка $C07pnnnnH$ (табл. 1) получена на основе малосигнального коэффициента усиления и ДДИ 3-го, 5-го и 7-го порядков (для смесителя ZEM-4300+ в окрестности частоты 3501 МГц интермодуляция 9-го порядка не наблюдалась, поскольку ее уровень ниже уровня шумов АС ДЧЗ);

- комбинированная модель 29-го порядка $A29C07pnnnnH$ (табл. 2) получена на основе AX-1 по полезному сигналу и ДДИ 3-го, 5-го и 7-го порядков;

- комбинированная модель 9-го порядка $A09C03pnnH$ (табл. 2) получена на основе AX-1 по полезному сигналу и ДДИ 3-го порядка.

Таблица 1. Коэффициенты классических полиномиальных моделей передаточной характеристики радиочастотного смесителя ZEM-4300+ по мгновенному значению сигнала на разных частотах
Table 1. Coefficients of the classical polynomial models of the transfer characteristic of the radiofrequency mixer ZEM-4300+ with respect to the instantaneous signal value at different frequencies

Степень k	Частота 2551 МГц, C09pnnnnH		Частота 3501 МГц, C07pnnnnH	
	ДДИ, дБ	Коэффициент полинома, B^{1-k}	ДДИ, дБ	Коэффициент полинома, B^{1-k}
1	–	0,5128613839913648	–	0,4518559443749223
3	67,1	–0,47732854666718033	64,3	–0,8679230736632407
5	77,2	–5,098983407209903	74,3	–7,451166144768661
7	79,5	128,8379109598531	80,0	–22,238829726105212
9	80,7	–2414,7346843165187	–	–

Таблица 2. Коэффициенты комбинированных полиномиальных моделей передаточной характеристики радиочастотного смесителя ZEM-4300+ по мгновенному значению сигнала на разных частотах
Table 2. Coefficients of the combined polynomial models of the transfer characteristic of the radiofrequency mixer ZEM-4300+ with respect to the instantaneous signal value at different frequencies

Степень k	Частота 2551 МГц, A29C07pnnnnH	Частота 3501 МГц, A09C03pnnH
	Коэффициент полинома, B^{1-k}	Коэффициент полинома, B^{1-k}
1	0,5128613839913648	0,4518559443749223
3	–0,48994672003815554	–0,8809245973434593
5	0,2752086528030535	0,9288212597121278
7	–80,74431037317753	–0,49625524277699173
9	–141,9736891223379	0,13223948954241788
11	10692,939962352659	–
13	–88039,59443965062	–
15	373876,57196827297	–
17	–988875,0842773796	–
19	1738394,8095183442	–
21	–2072571,1211467958	–
23	1660412,2125338174	–
25	–857053,1360728182	–
27	257680,56696512253	–
29	–34295,599341172136	–

Проверка корректности и анализ качества синтезированных моделей нелинейности смесителей выполнены путем сравнения характеристик (АХ-1 и АХ-ИМ 3-, 5-, 7- и 9-го порядков) моделей с измеренными характеристиками смесителя. В качестве примеров на рис. 6–9 показаны графики амплитудных характеристик различных моделей смесителя ZEM-4300+ и результаты измерений в окрестности частот 2551 МГц (рис. 6, 7) и 3501 МГц (рис. 8, 9). Обозначения кривых на рис. 6–9: 1 – измеренная АХ-1 смесителя; 2, 3 – одно- и двухсигнальная АХ-1 модели смесителя 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 смесителя; 13 – нижняя граница области блокирования для односигнальных АХ (точка децибелной компрессии односигнальной АХ-1); 14 – нижняя граница области блокирования для двухсигнальных АХ (точка децибелной компрессии двухсигнальной АХ-1).

Как следует из рис. 6, 7, для смесителя ZEM-4300+ в окрестности частоты 2551 МГц классическая модель C09pnnnnH удовлетворительно аппроксимирует АХ-1 и АХ-ИМ 3-го, 5-го, 7-го и 9-го порядков в режиме малой нелинейности (в котором уровень входного сигнала не превышает нижней границы области блокирования), а комбинированная модель A29C07pnnnnH адекватно воспроизводит уровни АХ-1 и АХ-ИМ 3-го порядка в области не только малой, но и существенной нелинейности.

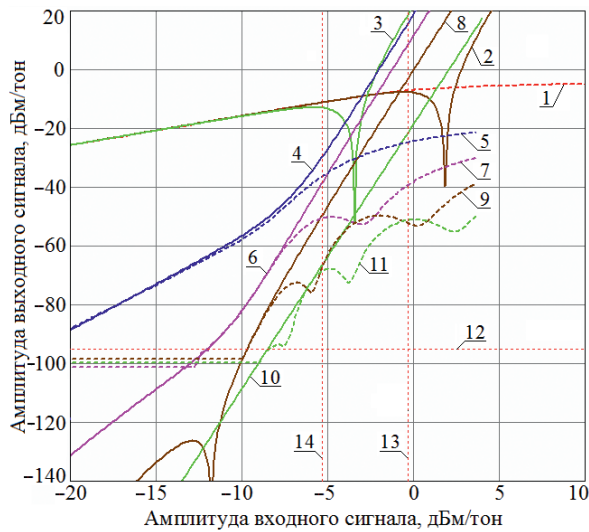


Рис. 6. Амплитудные характеристики смесителя ZEM-4300+ и классической модели C09pnnnnH в окрестности частоты 2551 МГц
Fig. 6. Amplitude characteristics of the ZEM-4300+ mixer and the classical model C09pnnnnH in the vicinity of 2551 MHz

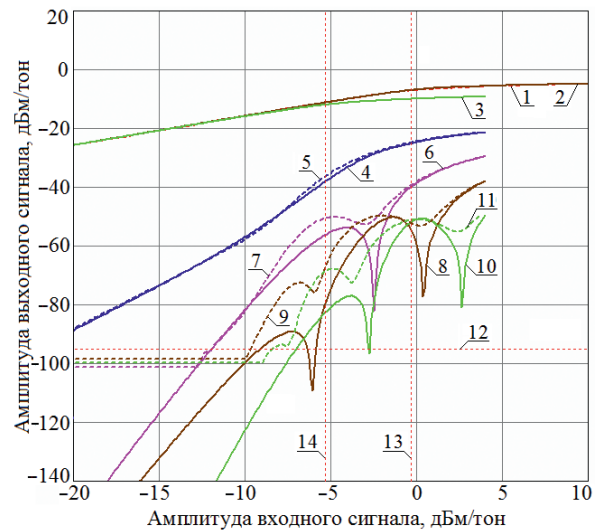


Рис. 7. Амплитудные характеристики смесителя ZEM-4300+ и комбинированной модели A29C07pnnnnH в окрестности частоты 2551 МГц
Fig. 7. Amplitude characteristics of the ZEM-4300+ mixer and the combined model A29C07pnnnnH in the vicinity of 2551 MHz

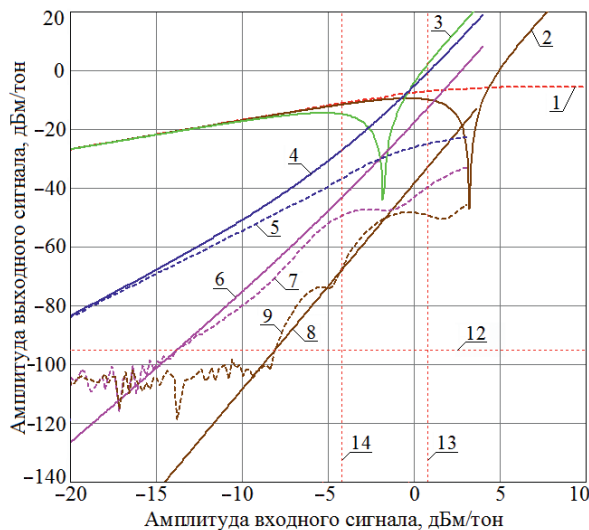


Рис. 8. Амплитудные характеристики смесителя ZEM-4300+ и классической модели C07pnnnnH в окрестности 3501 МГц
Fig. 8. Amplitude characteristics of the ZEM-4300+ mixer and the classical model C07pnnnnH in the vicinity of 3501 MHz

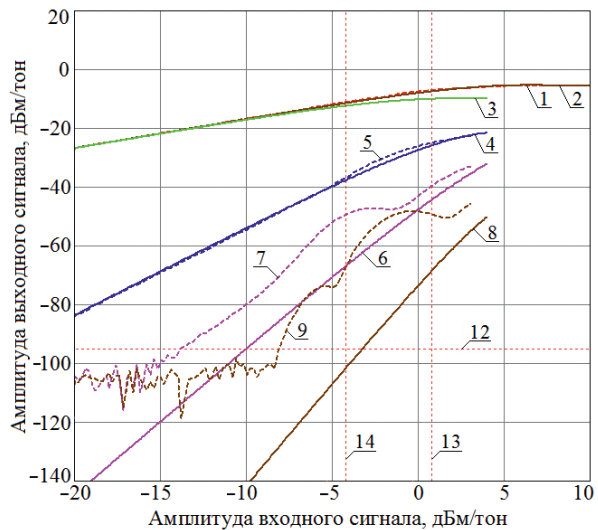


Рис. 9. Амплитудные характеристики смесителя ZEM-4300+ и комбинированной модели A09C03pnH в окрестности 3501 МГц
Fig. 9. Amplitude characteristics of the ZEM-4300+ mixer and the combined model A09C03pnH in the vicinity of 3501 MHz

Из рис. 8, 9 следует, что для ZEM-4300+ в окрестности частоты 3501 МГц классическая модель C07pnnnnH удовлетворительно аппроксимирует АХ-1 и АХ-ИМ 3-го, 5-го и 7-го порядков только в режиме малой нелинейности, а комбинированная модель A09C03pnH адекватно воспроизводит уровни АХ-1 и АХ-ИМ 3-го порядка в области не только малой, но и существенной нелинейности.

Наблюдаемые значительные различия в измеренных и расчетных АХ-ИМ смесителя ZEM-4300+ в окрестностях частот 2551 и 3501 МГц, находящихся в его рабочей полосе частот 300–4300 МГц, как и различия в порядках классических и особенно комбинированных моделей нелинейности данного смесителя, свидетельствуют о значительной зависимости ха-

характеристик нелинейности ZEM-4300+ от частоты и о необходимости учета этой зависимости при анализе электромагнитной совместимости оборудования, использующего подобные смесители. Одним из вариантов такого учета является применение различных моделей смесителя в разных полосах частот.

Как и для усилителей в [1], существует оптимальный порядок комбинированной полиномиальной модели радиочастотного смесителя. Если полный порядок комбинированной модели уменьшать ниже оптимального (29-го – для модели на рис. 7), то аппроксимация АХ смесителя моделью ухудшается, особенно в области ограничения и колена (перехода от области малой нелинейности к области ограничения), из-за нехватки степеней свободы полинома. Если же полный порядок модели увеличивать выше оптимального, то ухудшается аппроксимация моделью АХ смесителя по интермодуляции в области малой нелинейности, поскольку полиномиальная модель начинает воспроизводить погрешности измерения АХ-1.

Синтезированные комбинированные полиномиальные модели (описывающие как область малой нелинейности, так и область насыщения) пригодны для одновременного анализа нелинейных явлений всех основных видов, возникающих в радиочастотных смесителях: интермодуляционных и перекрестных помех основных типов, а также блокирования. Это полезное свойство обеспечит возможность выполнять моделирование поведения рассмотренных смесителей в ЭМО различной сложности, создаваемой системами МС 4G/5G/6G с разной пространственной плотностью источников радиочастотных электромагнитных полей.

Заключение

1. Синтезированы полиномиальные модели высоких порядков для описания передаточных характеристик радиочастотных смесителей, пригодные для использования в широком динамическом диапазоне входных воздействий с целью одновременного моделирования на поведенческом уровне нелинейных эффектов всех видов, представляющих опасность для радиоприема в сложной электромагнитной обстановке, создаваемой в полосах частот мобильной связи: как «тонких» (интермодуляция), так и «грубых» (блокирование, перекрестные искажения).

2. В связи с отсутствием в научной литературе параметров полиномиальных моделей высоких порядков для описания нелинейности современных маломощных смесителей диапазона FR1 данные табл. 1, 2 могут использоваться в качестве справочных, обеспечивая возможность исследований, эффективного моделирования и количественного анализа нелинейных процессов и радиопомех в оборудовании и радиосетях мобильной связи 4G/5G/6G в сложной электромагнитной обстановке с применением технологии [2, 3] дискретного нелинейного анализа поведения радиооборудования при большом динамическом диапазоне входных воздействий.

3. Разработанные модели описывают нелинейность смесителей только в рамках гармонической зоны полезного сигнала, и поэтому позволяют, наряду с блокированием, анализировать интермодуляционные и перекрестные помехи только ограниченного количества наиболее распространенных видов (в первую очередь тех видов, которые возникают за счет нелинейного взаимодействия сигналов нескольких десятков соседних каналов в пределах выделенной полосы частот мобильной связи, не ослабляемых входными фильтрами радиоприемного тракта). Возможное направление развития проведенного исследования – синтез моделей нелинейности смесителей в виде ряда Тейлора – Фурье [6], пригодных для описания всех гармонических зон и всех видов интермодуляционных и перекрестных помех.

4. Работа выполнена в рамках совместного научного проекта T22KITГ-018 (2022YFE0122700) при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Национальной программы ключевых исследований и разработок КНР.

Список литературы / References

1. Mordachev V. I., Sinkevich E. V., Fayu W., Tsyantenka 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. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-39-47> (in Russian).
2. Mordachev V. I. (1988) Express Analysis of Electromagnetic Compatibility of Radio Electronic Equipment with the Use of the Discrete Models of Interference and Fast Fourier Transform. *IX Int. Wroclaw Symp. on EMC*. 565–570.

3. Mordachev V. I., Sinkevich E. V. (2008) "EMC-Analyzer" Expert System: Improvement of IEMCAP Models. *19th International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Wroclaw, 11–13 June*. 423–428.
4. Mordachev V. I. (2000) Automated Double-Frequency Testing Technique for Mapping Receiver Interference Responses. *IEEE Trans. on EMC*. 42 (2), 213–225.
5. Sinkevich E. V. (2015) Composite Model of Radio-Frequency Path Nonlinearity for Discrete Analysis of Electromagnetic Compatibility. *Doklady BGUIR*. (3), 36–42 (in Russian).
6. Sinkevich E. (2020) Worst Case Model for Fast Analysis of Intermodulation Interference in Radio Receiver. *Int. Virtual Conf. "EMC Europe 2020"*. Rome, Italy.

Поступила 15.11.2024
Received: 15 November 2024

Принята в печать 28.01.2025
Accepted: 28 January 2025

Вклад авторов

Синькевич Е. В. выполнил обоснование и экспериментальную проверку методик испытаний и синтеза моделей нелинейности смесителей, принял участие в обсуждении результатов и подготовке рукописи статьи.

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

Фаю Ван принял участие в обсуждении методик измерений и синтеза, а также полученных результатов.

Ционенко Д. А. осуществил проверку и оформление результатов синтеза полиномиальных моделей нелинейности смесителей.

Шакинко И. В. выполнил синтез полиномиальных моделей по разработанной методике.

Authors' contribution

Sinkevich E. V. carried out the substantiation and experimental verification of the methods of testing and synthesizing models of nonlinearity of mixers, took part in the discussion of the results and preparation of the manuscript of the article.

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

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

Tsyankenka D. A. completed the verification and registration of the results of the synthesis of polynomial models of mixer nonlinearity.

Shakinka I. V. performed the synthesis of polynomial models using the developed methodology.

Сведения об авторах

Синькевич Е. В., зам. зав. науч.-исслед. лаб. «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» (Лаб. 1.7), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Мордачев В. И., канд. техн. наук, доц., зав. Лаб. 1.7, БГУИР

Фаю Ван, д-р филос., проф., Нанкинский университет информационных наук и технологий

Ционенко Д. А., канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр. Лаб. 1.7, БГУИР

Шакинко И. В., науч. сотр. Лаб. 1.7, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-89-94
E-mail: esinkevich@bsuir.by
Синькевич Евгений Васильевич

Information about the authors

Sinkevich E. V., Deputy Head of the R&D Laboratory "Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Equipment" (Lab 1.7), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Mordachev V. I., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Lab 1.7, BSUIR

Fayu Wan, Ph.D, Professor, Nanjing University of Information Science and Technology

Tsyankenka D. A., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Senior Researcher at the Lab 1.7, BSUIR

Shakinka I. V., Researcher at the Lab 1.7, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-89-94
E-mail: esinkevich@bsuir.by
Sinkevich Eugene Vasil'evich