

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.О. Исаев, П.В. Бойкачев

Военная академия Республики Беларусь, Минск

ANALYTICAL MATHEMATICAL MODELING OF INPUT CHARACTERISTICS OF RADIO ENGINEERING SYSTEMS

V.O. Isaev, P.V. Boykachev

Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk

Представлены результаты проведения обзора и анализа способов представления входных характеристик радиотехнических систем. Представлены результаты работы способа нахождения адекватных математических моделей радиотехнических устройств в аналитическом виде.

Ключевые слова: аппроксимация, частотные характеристики, математические модели радиотехнических систем, широкополосное согласование, радиотехника.

The results of the review and analysis of ways to represent the input characteristics of radio engineering systems are considered. The results of the work of the method for finding adequate mathematical models of radio engineering devices in an analytical form are presented.

Keywords: approximation, frequency characteristics, mathematical models of radio engineering systems, broadband matching, radio engineering.

Введение

Значительный прогресс в развитии радиотехнических систем (РТС) связан с использованием широкополосных и сверхширокополосных сигналов. Для эффективного применения таких сигналов к трактам РТС предъявляются особые требования, такие как минимальные искажения амплитудного и фазового спектра данных сигналов. Важной составляющей обеспечения указанных требований является решение задачи оптимального синтеза устройств фильтрации и согласования в приеме-передающих трактах РТС. Эта задача заключается в поиске структуры и номиналов элементов реактивной цепи, обеспечивающих необходимую форму частотной характеристики в заданном диапазоне частот при комплексных сопротивлениях генератора и нагрузки. Решение подобных задач имеет большую практическую значимость, так как обеспечивает оптимальные параметры приема-передающих трактов, работающих в широком диапазоне частот.

Современные методы широкополосного согласования характеризуются значительными возможностями по разработке радиотехнических устройств (РТУ) различного назначения с высокими техническими характеристиками [1]. Независимо от используемых методов первый этап синтеза согласующих цепей заключается в исследовании и задании исходных свойств согласуемой нагрузки. Как правило, входные характеристики согласуемой нагрузки представлены в виде дискретных точек реальной $\operatorname{Re} Z(\omega)$ и

мнимой $\operatorname{Im} Z(\omega)$ составляющих функции, описывающей рассматриваемый параметр комплексного сопротивления – $Z(\omega)$ [2]. Такое представление не всегда является достаточно информативным и не применимо для использования во многих современных методах синтеза широкополосных согласующих и частотно-избирательных устройств, требующих эквивалентные схемы или аналитические представления $Z(\omega)$ согласуемых нагрузок. По этой причине проблема выбора способа представления нагрузок достаточно давно привлекает внимание исследователей и разработчиков радиоаппаратуры [10]–[12].

Таким образом, возникает интерес в реализации современной методики представления согласуемых нагрузок, эффективной в решении задачи синтеза радиотехнических устройств с оптимальными частотными характеристиками.

1 Представление импедансных характеристик РТУ в решении инженерно-технических задач

Часто для решения задач синтеза широкополосных согласующих цепей используются аналитические методы [1], [3]–[7], в которых согласуемая нагрузка представляется в виде эквивалентной схемы, содержащей в своей структуре фиксированные параметры значений элементов в сосредоточенном элементе базисе. С помощью эквивалентной схемы можно представить входное

сопротивление большинства комплексных нагрузок (антенн, входных сопротивлений транзистора, преобразователей, усилителей и др.) в рабочей полосе частот. Например, в [8] предложено классифицировать согласуемые нагрузки на основе анализа частотной зависимости активной части входного сопротивления или проводимости. Данная классификация делится на два типа. К согласуемым нагрузкам первого типа относят эквивалентные схемы, у которых активная часть сопротивления или проводимости можно считать постоянной в рабочей полосе частот. В качестве эквивалентных схем первого типа используются согласуемые нагрузки, содержащие в своей структуре последовательные или параллельные RLC -контуры, частным случаем которых являются эквивалентные схемы, содержащие в своей структуре один реактивный и один пассивный элемент (рисунок 1.1, а).

К согласуемым нагрузкам второго типа относят эквивалентные схемы, у которых в рабочей полосе частот происходит изменение активной части входного сопротивления или проводимости. На рисунке 1.1, б, представлены примеры эквивалентных схем согласуемых нагрузок второго типа, содержащих два произвольно включенных реактивных элемента и одного пассивного элемента.

Для расчета реактивных элементов согласуемых нагрузок первого типа (рисунок 1.1, а) используется условие совпадения реактивных сопротивлений эквивалента и заданной согласуемой нагрузки (в частности, антенны) на двух частотах [9]. При этом активное сопротивление эквивалента согласуемой нагрузки берется равной вещественной части комплексного сопротивления нагрузки. Если последнее изменяется с частотой, то активное сопротивление выбирают равным $R_H = \sqrt{R_{H\max} R_{H\min}}$, где $R_{H\max}$ и $R_{H\min}$ –

максимальное и минимальное значение вещественной части комплексного сопротивления согласуемой нагрузки.

Эквиваленты второго типа (рисунок 1.1, б) упрощенно рассчитываются по уравнениям, соответствующим равенству активных частей входного сопротивления нагрузки и эквивалента на двух частотах, а также – равенству разностей реактивных частей на этих же частотах и представлены в [8], [9].

Однако на практике в случае сложной зависимости входного сопротивления расчет схем согласуемых нагрузок, содержащих более двух реактивных элементов, приводит к трудностям вычислительного процесса, так как расчетные выражения в [8], [9] преобразуются в систему нелинейных уравнений. Поэтому в прикладном плане обычно решаются задачи согласования нагрузок, содержащих не более двух реактивных элементов, для расчета которых используются результаты измерений на двух частотах. Это зачастую приводит к низкой точности воспроизведения целевых функций, описывающих реальные нагрузки [11].

Некоторые из этих трудностей стало возможным обойти с появлением работ [10]–[12]. Так, авторами [10], [11] предложен подход, позволивший получить шестизлементную эквивалентную схему входного сопротивления транзистора ATF-34143 [10] и антенного устройства КВ диапазона АШ-4 [11] в виде нагрузки дарлингтоновского типа, содержащую во входной цепи последовательно включенный резистор R_H (рисунок 1.2). На рисунке 1.3 представлены зависимости действительной и мнимой составляющих входного сопротивления рассчитанной эквивалентной схемы заданного транзистора [10] (рисунок 1.3, а) и антенного устройства КВ диапазона АШ-4 [11] (рисунок 1.3, б).

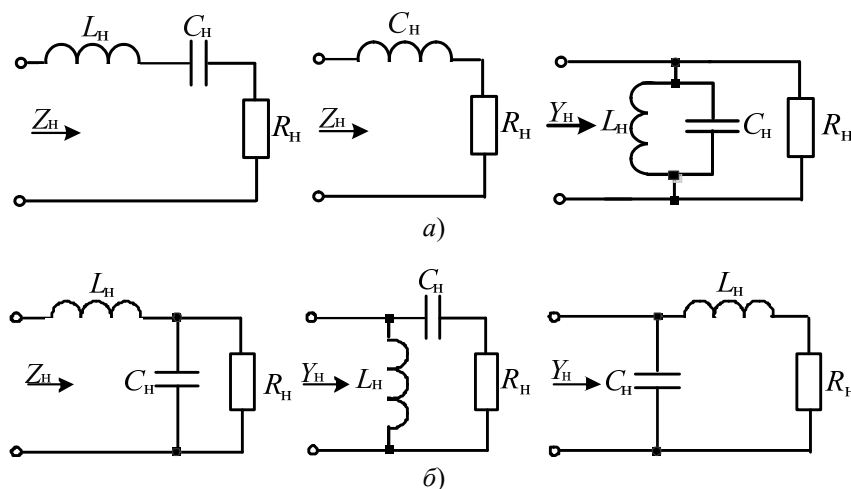


Рисунок 1.1 – Примеры эквивалентных схем согласуемых нагрузок первого (а) и второго типа (б)

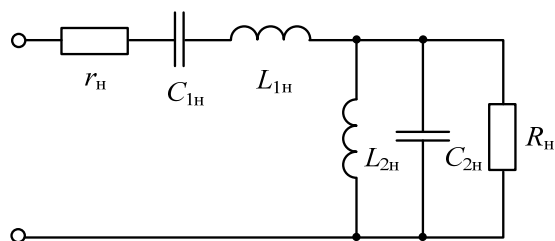


Рисунок 1.2 – Модель входного сопротивления транзистора ATF-34143 и антенны АШ-4

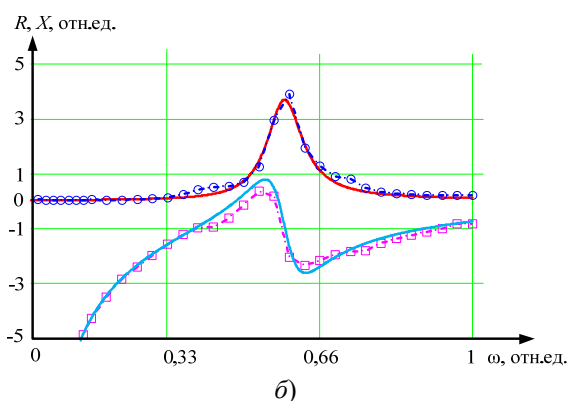
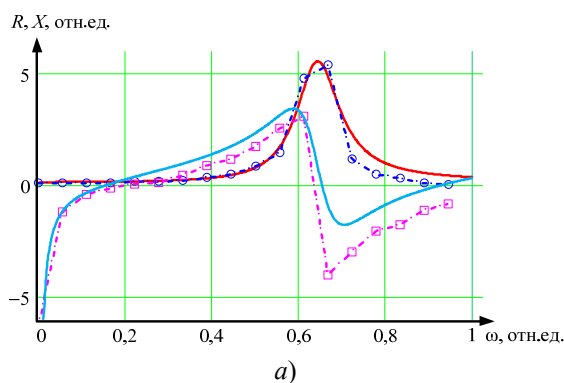


Рисунок 1.3 – Функции входного сопротивления транзистора ATF-34143 (а) и антенны АШ-4 (б) (символы), и их моделей из [10], [11] (сплошная линия)

Недостатком предложенных подходов является то, что на начальном этапе требуется внимательно анализировать исходные данные и угадывать структуру эквивалентной схемы, которая, в представленных подходах, служит моделью биполярных транзисторов, туннельных диодов, кварцев и штыревых антенн [8].

Для обеспечения большего числа элементарных каскадов в эквивалентной схеме согласуемой нагрузки в [12] предложен альтернативный подход моделирования на основе аппарата T -матриц. В качестве исходных данных при моделировании нагрузок являются параметры волновой матрицы передачи моделируемого четырехполюсника, заданной аналитически $T(\omega)$ или дискретно $T(\omega_j)$ в рабочей полосе частот. Эквивалентная схема согласуемой нагрузки представляется в виде четырехполюсника с лестничной структурой, состоящей из чередующихся элементарных Z - и Y -каскадов (рисунок 1.4).

В качестве примера в [12] рассчитан эквивалент антенны типа ВГД (вибратор горизонтальный диапазонный) в диапазоне частот от 6 до 27 МГц [13]. С использованием методики, представленной выше, получен эквивалент антенны типа ВГД (рисунок 1.5) и ее частотные характеристики входного сопротивления (рисунок 1.6).

Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод о том, что изложенные выше подходы позволяют рассчитать модели нагрузок не всегда с достаточной точностью и/или применимы только для типовых нагрузок, основные эквиваленты которых представлены в [9].

Основная проблема решения инженерно-технических задач заключается в том, что характеристики современных РТУ, которые обычно определяют с помощью экспериментальных исследований, имеют сложный вид и содержат случайные составляющие самой различной природы, обусловленные как статистической природой изучаемых процессов, так и внешними факторами процессов измерений и преобразования данных (шумы, помехи, дестабилизирующие факторы и ошибки измерений).

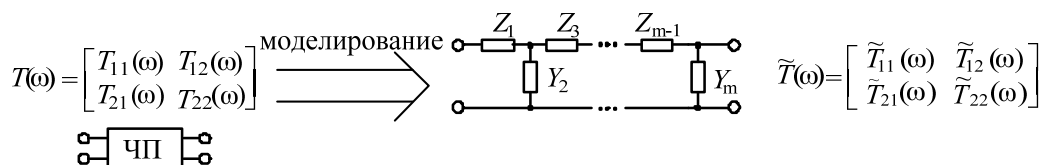


Рисунок 1.4 – Процесс моделирования схемы эквивалентной нагрузки

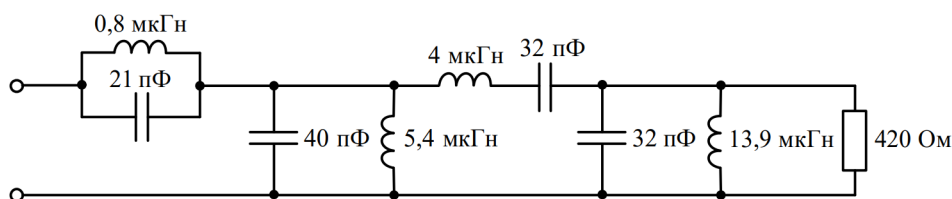


Рисунок 1.5 – Рассчитанный эквивалент антенны ВГД

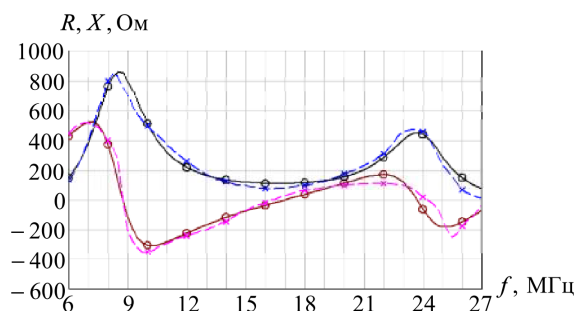


Рисунок 1.6 – Функции входного сопротивления антенны ВГД (штриховая линия) и ее рассчитанного эквивалента (сплошная линия)

В качестве примера рассмотрим входное сопротивление антенного устройства (АУ) AD-25/CW-3512 (рисунок 1.7), представляющего собой сгибаемый ленточный излучатель, работающий в диапазоне частот от 30 до 512 МГц [14]. Данное АУ применяется на портативной радиостанции Р-181, а его частотная зависимость изменения активной и реактивной части импеданса представлена на рисунке 1.8.

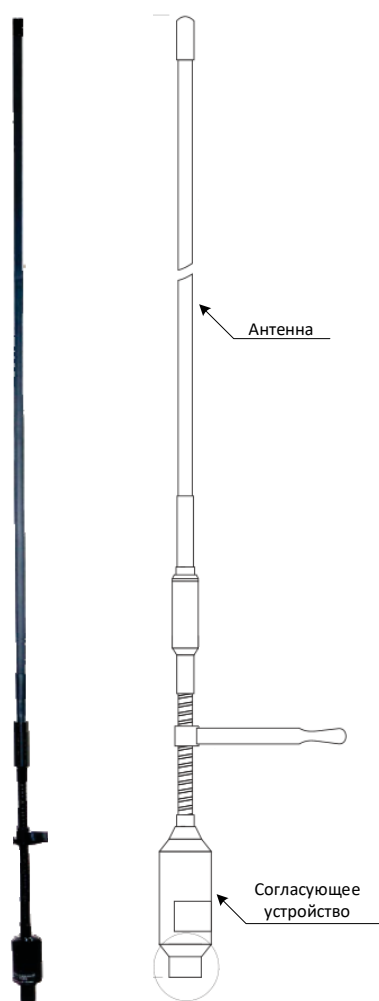


Рисунок 1.7 – Внешний вид АУ AD-25/CW-3512

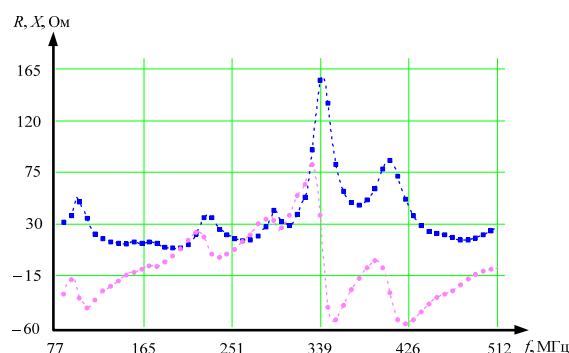


Рисунок 1.8 – Функции входного сопротивления АУ AD-25/CW-3512

Из представленных характеристик следует, что входное сопротивление АУ AD-25/CW-3512 сильно зависит от частоты (имеет резко изменяющийся характер). Это приводит к тому, что представленные выше методики либо не позволяют рассчитать схемный эквивалент согласуемой нагрузки, либо расчет становится достаточно сложным, занимает продолжительное время, требует специальной подготовки разработчика, а сам результат может получиться неудовлетворительным [12]. Данные обстоятельства приводят к тому, что для решения инженерно-технических задач все чаще обращаются к прогрессивному и весьма экономичному способу исследования и проектирования РТС и РТУ – математическому моделированию на ЭВМ, это позволяет рассматривать входное сопротивление нагрузки в виде простых математических моделей с высокой степенью адекватности и не рассчитывать его в виде схемных эквивалентов.

2 Математическая модель нагрузки, адекватная ее физической сущности

Успешное решение инженерных задач методами математического моделирования на ЭВМ в значительной степени зависит от состоятельности используемых математических моделей: от их способности давать новую информацию о системе в процессе исследования ее модели и от возможности реализации ее на ЭВМ. Выбор того или иного метода математического моделирования и построение математической модели радиосистемы, отвечающей поставленной инженерной задаче, не может быть формализован и требует от разработчика творческого подхода и достаточно глубоких знаний в области теории математического моделирования радиосистем. Как показывает практика, выбор адекватной математической модели, позволяющей достаточно быстро и эффективно решить поставленную инженерную задачу на ЭВМ, обычно представляет наибольшие трудности и еще недостаточно освещен как в отечественной, так и в зарубежной литературе. Поэтому развитие теории построения

математических моделей радиотехнических устройств и систем, реализуемых на ЭВМ, имеет важное практическое значение.

Одним из подходов моделирования РТУ, входящих в состав РТС (усилители, частотные фильтры, антенные устройства (АУ) и др.), является аналитическое математическое моделирование, построенное на основе результатов экспериментальных данных. Такая математическая модель строится на основе всестороннего анализа поведения системы и широкого использования результатов проведенных ранее статистических исследований. Она должна быть достаточно полной, чтобы адекватно описывать систему, но также и достаточно простой, чтобы получающиеся модели можно было реализовать на вычислительных машинах в виде физически реализуемых функций [15].

Так в [16] изложен способ расчета математических моделей входного импеданса нагрузки, основанный на использовании статистической обработки и методов аппроксимации, алгоритм которого представлен на рисунке 2.1.

Суть предложенного способа заключается в том, что входные и передаточные функции РТУ, исходя из условий физической реализуемости, являются дробно-рациональными функциями от комплексной частоты (s) вида:

$$f(s) = \frac{a_0 + a_1 s + a_2 (s)^2 + \dots + a_k (s)^k}{b_0 + b_1 s + b_2 (s)^2 + \dots + b_q (s)^q}, \quad (2.1)$$

где все коэффициенты при s должны быть вещественными и неотрицательными, а высшие степени полинома числителя (k) и знаменателя (q), так же, как и их низшие степени, не могут отличаться более чем на 1 [17].

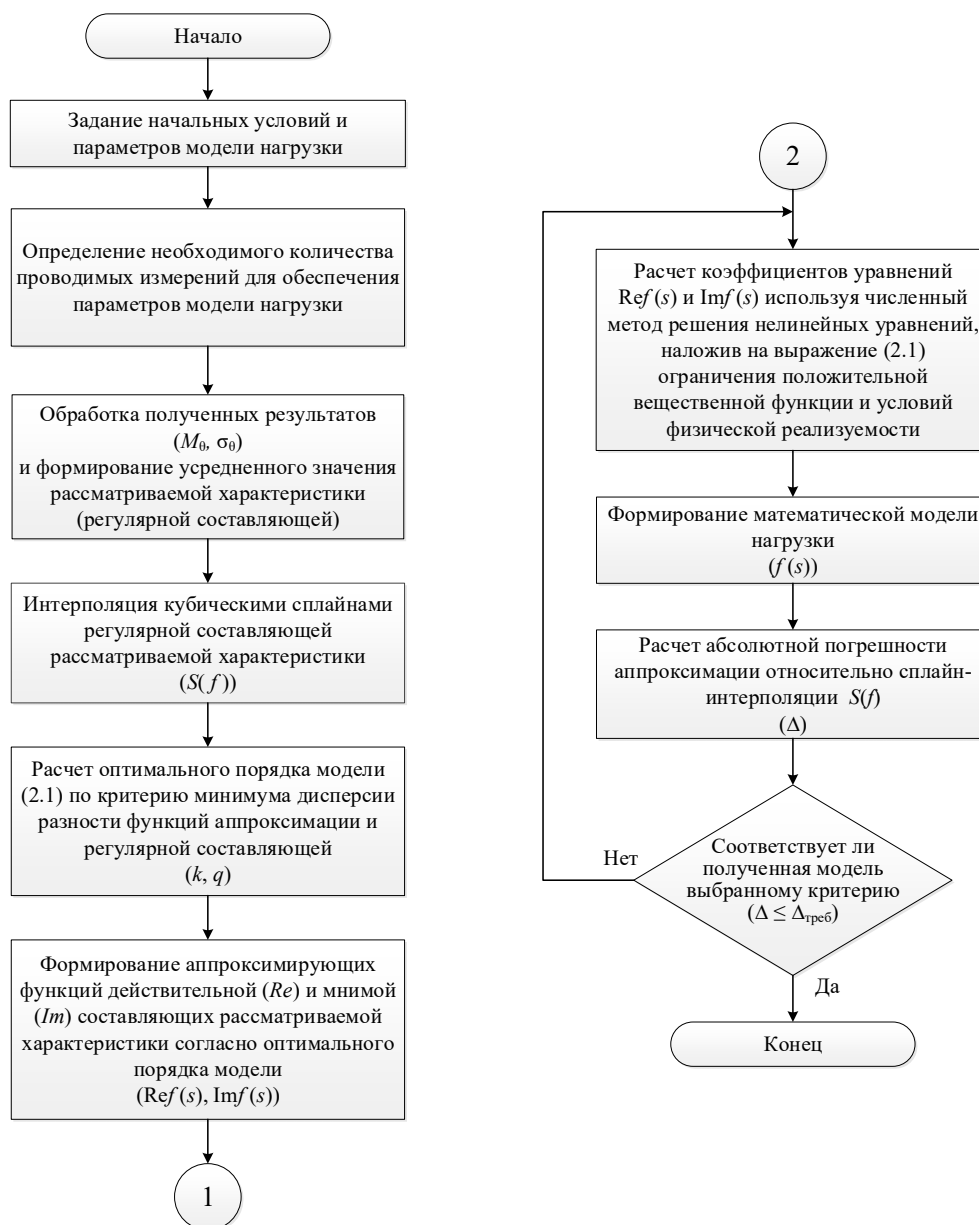


Рисунок 2.1 – Алгоритм реализации адекватных математических моделей

В качестве примера исследуем возможность аппроксимации частотной характеристики АУ AD-25/CW-3512 с использованием алгоритма, представленного на рисунке 2.1. Для нахождения наиболее оптимальных коэффициентов аппроксимирующих функций, описывающих реальную и мнимую часть входного сопротивления АУ AD-25/CW-3512, необходимо использовать методы нелинейных оптимизированных процедур с использованием ЭВМ. Предлагается для расчета аппроксимирующей функции, описывающей реальную и мнимую составляющую входного сопротивления импеданса АУ, использовать метод оптимизации Левенберга – Марквардта [18], [19]. Полученная АММ, описывающая реальную и мнимую составляющие входного сопротивления АУ AD-25/CW-3512, имеет вид (2.1), коэффициенты которой представлены в таблице 2.1.

Частотные характеристики аппроксимирующей функции входного сопротивления АУ AD-25/CW-3512 представлены на рисунке 2.2.

На рисунке 2.2 наглядно видно, что рассчитанная АММ входного сопротивления АУ AD-25/CW-3512 обеспечивает требуемую абсолютную погрешность аппроксимации к характеристикам входного сопротивления и составляет менее 10%.

Для сравнения представленных в работе алгоритмов на рисунке 2.3 представлены результаты моделирования входного сопротивления антенны ВГД способом, представленном на рисунке 2.1 и предложенном в [12]. При этом рассчитанная АММ входного сопротивления антенны ВГД имеет шестой порядок и имеет вид

$$Z_{ВГД}(s) = (1,845 \cdot 10^6 + 3,182 \cdot 10^6(s) + 2,506 \cdot 10^5(s)^2 + 1,792 \cdot 10^4(s)^3 + 1,069 \cdot 10^3(s)^4 + 18,554(s)^5 + 0,989(s)^6) / (7,765 \cdot 10^4 + 6,088 \cdot 10^3(s) + 1,526 \cdot 10^3(s)^2 + 57,414(s)^3 + 4,448(s)^4 + 0,075(s)^5 + 0,003(s)^6).$$

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что рассчитанная АММ аппроксимирует входное сопротивление антенны ВГД по отношению к модели, представленной в [12] на 18% точнее для реальной составляющей входного сопротивления и на 17% - мнимой составляющей соответственно. Также необходимо отметить, что полученная АММ имеет шестой порядок, в свою очередь функция входного сопротивления модели антенны ВГД, представленной в [12], имеет 8 порядок.

Таблица 2.1 – Коэффициенты дробно-рациональной функции, аппроксимирующей импедансные характеристики АУ AD-25/CW-3512

Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение
a_0	$1,792 \cdot 10^{-4}$	a_{10}	443,957	b_5	0,267
a_1	0,032	a_{11}	536,812	b_6	2,476
a_2	0,119	a_{12}	439,399	b_7	1,851
a_3	1,701	a_{13}	248,709	b_8	10,838
a_4	4,173	a_{14}	153,796	b_9	5,74
a_5	24,51	b_0	$6,059 \cdot 10^{-5}$	b_{10}	23,01
a_6	44,376	b_1	$1,706 \cdot 10^{-4}$	b_{11}	8,059
a_7	147,751	b_2	$7,996 \cdot 10^{-3}$	b_{12}	22,854
a_8	203,863	b_3	0,014	b_{13}	4,131
a_9	417,306	b_4	0,249	b_{14}	8,304

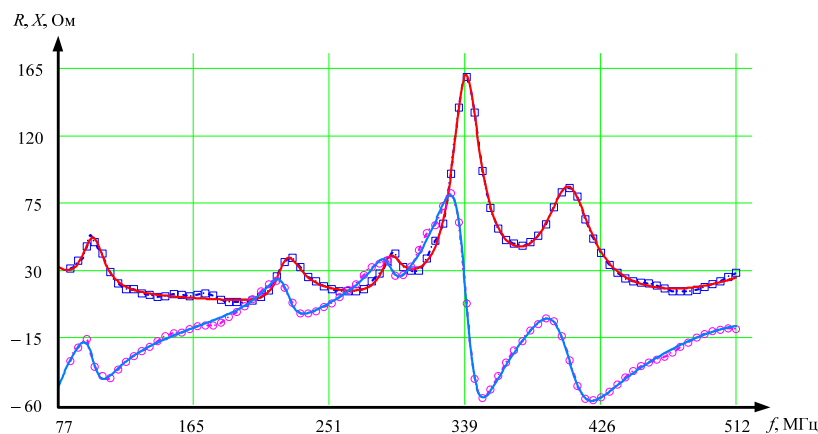


Рисунок 2.2 – Функции входного сопротивления АУ AD-25/CW-3512 (символы) и его рассчитанной АММ (сплошные линии) в рабочей полосе частот

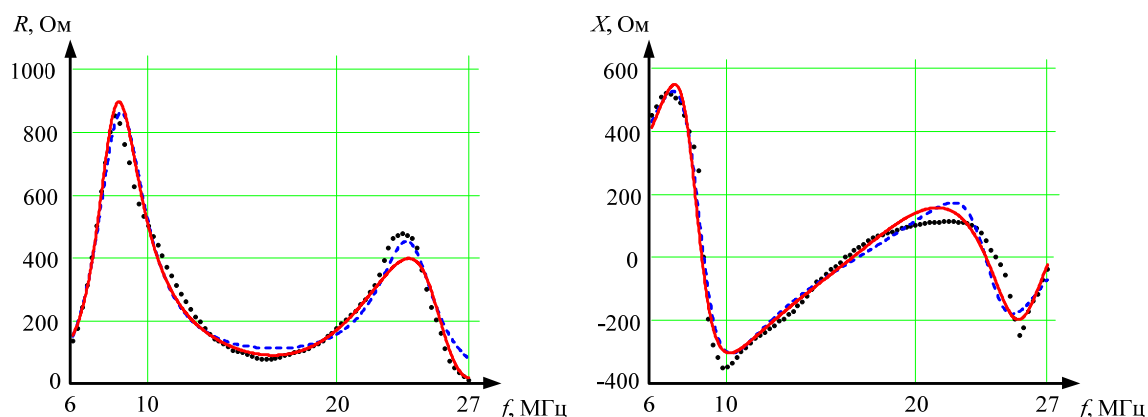


Рисунок 2.3 – Функции входного сопротивления антенны ВГД (точки), ее рассчитанного эквивалента [12] (пунктирная линия) и рассчитанной АММ (сплошная линия)

Заключение

В процессе разработки и испытаний радиоэлектронной аппаратуры часто возникают задачи нахождения эквивалентных схем и синтеза широкополосных согласующих цепей для сложных нагрузок. К сожалению, лишь немногие из этих задач могут быть решены точными аналитическими методами. Однако даже в случае удачи разработчик не может быть уверен в высоком качестве полученных технических решений. Причина этого заключается в том, что аналитические методы дают достоверные результаты лишь при точном соответствии эквивалентной схемы и реальной нагрузки. Это соответствие – скорее исключение, чем правило, когда речь идет о современных РТС, работающих в условиях высокой априорной неопределенности относительно статистики входных радиосигналов и помех, условий их распространения.

В этих условиях единственный выход для разработчика – проведение математического моделирования рассматриваемой нагрузки и представления ее в виде адекватной математической модели. Такое представление является экономически выгодным способом проверить качество функционирования радиоэлектронной аппаратуры на этапе ее проектирования и отладки.

Так, для анализа и расчета эквивалентных цепей предложено использовать математические модели, представляющие собой аналитическое выражение, описывающее входные характеристики в виде достаточно простых физически реализуемых дробно-рациональных функций вида (2.1). Данный подход позволяет аппроксимировать входные характеристики РТУ с учетом их статистической обработки и рассматривать численно заданные характеристики в виде АММ с высокой степенью адекватности (доверительной вероятностью не менее 0,9 и относительной погрешностью не более 10%).

ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппович, Г.А. Широкополосное согласование сопротивлений / Г.А. Филиппович. – Минск: ВА РБ, 2004. – 175 с.
2. Каганов, В.И. Системы автоматического регулирования в радиопередатчиках / В.И. Каганов. – М.: Связь, 1969. – 256 с.
3. Боде, Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью / Г. Боде. – М.: Изд. иностр. литературы, 1948. – 641 с.
4. Фано, Р.М. Теоретические ограничения полосы согласования произвольных импедансов / Р.М. Фано. – М.: Сов. радио, 1965. – 70 с.
5. Youla, D.C. A new theory of broad-band matching / D.C. Youla. – IEEE Trans. Circuit Theory. – 1964. – Vol. CT, № 1. – P. 30–50.
6. Чавка, Г.Г. Широкополосное согласование радиопередатчика с антенной / Г.Г. Чавка // Электросвязь. – 1974. – № 12. – С. 46–53.
7. Свириденко, А.А. Методика широкополосного согласования нагрузок с сосредоточенными параметрами на основе обобщенной матрицы рассеяния / А.А. Свириденко, М.А. Янцевич // Информационные технологии в образовании, науке и производстве: VI Международная научно-техническая интернет-конференция, 17–18 ноября 2018 г. [Электронный ресурс]. – [Б. и.], 2018. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/49920>. – Дата доступа: 12.02.2021.
8. Проектирование радиопередающих устройств с применением ЭВМ: учеб. пособие для вузов / О.В. Алексеев [и др.]; под. ред. О.В. Алексеева. – М.: Радио и связь, 1987. – 392 с.
9. Бабков, В.Ю. Основы построения устройств согласования антенн / В.Ю. Бабков, Ю.К. Муравьев. – ВАС, 1980. – 240 с.
10. Филиппович, Г.А. Моделирование сопротивлений по измеренным S-параметрам / Г.А. Филиппович, В.Ф. Белевич // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – 2007. – № 1. – С. 34–38.

11. Бойкачев, П.В. Моделирование сопротивления короткой монопольной антенны диапазона дециметровых волн / П.В. Бойкачев, Е.Л. Крейдик, Г.А. Филиппович // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – 2013. – № 3 (40). – С. 69–74.
12. Васильев, А.Д. Структурно-параметрический синтез четырехполосников при широкополосном согласовании и моделировании на основе аппарата Т-матриц: дис. канд. техн. наук: 05.12.04 / А.Д. Васильев. – Минск, 2010. – 121 л.
13. Чавка, Г.Г. Диапазонные эквиваленты антенн / Г.Г. Чавка, П.И. Хибенков // Радиотехника. – 1980. – № 9. – С. 82–84.
14. *Trival antene. Datasheet AD-25/CW-3512*. – Slovenia, 2020. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.trival-antennas-masts.com/sites/default/files/brochures/AD-25-CW-3512%20ANG.pdf>. – Дата доступа: 21.05.2021.
15. Ланнэ, А.А. Оптимальный синтез линейных электрических цепей / А.А. Ланнэ. – М.: Связь, 1969. – 294 с.
16. Исаев, В.О. Способ нахождения адекватных математических моделей радиотехнических устройств с нестабильным импедансом / В.О. Исаев, П.В. Бойкачев // Метрология и приборостроение. – 2021. – № 1 (92). – С. 9–16.
17. Карни, Ш. Теория цепей. Анализ и синтез / Ш. Карни. – М.: Связь, 1973. – 269 с.
18. Levenberg, K. A method for the solution of certain problems in least squares / K. Levenberg // Quart. Appl. Math. – 1944. – № 2. – P. 164–168.
19. Marquardt, D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters / D. Marquardt // SIAM J. Appl. Math. – 1963. – № 11. – P. 431–441.

Поступила в редакцию 30.05.2021.