

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОНОПОЛЬНОЙ АНТЕННЫ ДИАПАЗОНА ДЕКАМЕТРОВЫХ ВОЛН

¹Исаев В.О., ²Бойкачев П.В., ³Дубовик И.А.

¹УО «ВА РБ», г. Минск, Республика Беларусь, ystasmoz@gmail.com

²УО «ВА РБ», г. Минск, Республика Беларусь, pashapash.boi@mail.ru

³УО «ВА РБ», г. Минск, Республика Беларусь, duba-77@mail.ru

В настоящее время отмечается увеличение количества разрабатываемых широкополосных радиоэлектронных систем (РЭС) различного назначения (космическая, спутниковая, персональная и сотовая связь, телекоммуникация, гигабитные системы передачи данных и т.д.).

Радиоэлектронное средство, как правило, бывает весьма сложным техническим объектом, включающим большое число составных частей с многообразными связями между ними. Описание такие объектов в процессе их создания и использования должно быть согласовано с возможностями их восприятия человеком. Одним из таких описаний являются эквиваленты радиоэлектронных устройств (РЭУ), входящих в состав РЭС (усилители, частотные фильтры, антенные устройства (АУ) и др.). Данные эквиваленты дают возможность обеспечить проверку принимаемых технических решений на этапах эскизного и технического проектирования при выполнении опытно-конструкторских работ по созданию и улучшению современных РЭС.

Существующие эквиваленты РЭУ, как правило, удовлетворительно воспроизводят параметры реальных устройств в относительно узком диапазоне частот [1]. Их использование в тракте, работающего в широком диапазоне частот, может привести к повышенному КСВ, снижению точности измерения мощности передатчика и даже к выходу из строя транзисторов усилителя мощности. Из-за сложности анализа природы возникновения таких деформаций их часто считают случайными и результат их влияния оценивают для семейства уже готовых РЭУ [2].

В связи с этим имеет место моделирование РЭУ по измеренным реактансным либо рефлектансным параметрам. Моделирование преследует две цели: первая заключается в необходимости создания эквивалента антенны, необходимого для функционирования передающего устройства без излучения в эфир, другой целью моделирования является определение функции входного сопротивления для решения задачи согласования. В обоих случаях важным представляется точность соответствия модели параметрам реальной антенны.

В качестве примера предлагается рассмотреть монополярную антенну «Штырь 4 м» (АШ-4), установленную на кузове К-6-131 автомобиля ЗИЛ-131, работающей в диапазоне 1,5...30 МГц. В таблице 1 представлены результаты измерений параметров сопротивления антенны в виде действительной и мнимой составляющих. Измерения проводились с использованием векторного анализатора цепей ZNB4.

Таблица 1 - Результаты измерений сопротивления монополярной антенны АШ-4.

f , МГц	Re, Ом	Im, Ом	f , МГц	Re, Ом	Im, Ом	f , МГц	Re, Ом	Im, Ом
1,5	3,65	-764	9	3,8	-99	20	64	-108
2	2,02	-571	10	6,2	-79	21	44	-98
2,5	1,65	-454	11	12,473	-61	22	40	-92
3	1,6	-376	12	21	-49	23	24	-91
3,5	1,89	-320	13	26	-47	24	16	-78
4	1,9	-277	14	27	-31	25	14	-68
4,5	2,042	-244	15	34	-8	26	12	-63
5	3,089	-215	16	62	18	27	11	-57
6	1,088	-176	17	148	9	28	9,8	-51

7	1,857	-143	18	195	-103	29	9,9	-42
8	3,073	-121	19	96	-117	30	10	-41

Для этой антенны предусмотрен трехдиапазонный усредненный эквивалент входного сопротивления ЭАШ-4м [3], который используется для измерения выходной мощности, отдаваемой передатчиком радиостанции Р-134. Схемы эквивалентов [3] в диапазонах 1,5...6; 6...18 и 18...30 МГц приведены на рисунке 1. Для диапазона 1,5...6 МГц элементы схемы (рисунок 1, а) имеют значения $C_1 = 68$ пФ, $C_2 = 1720$ пФ, для диапазона 6...18 МГц $C_1 = 112$ пФ, $C_2 = 290$ пФ, для диапазона 18...30 МГц элементы схемы (рисунок 1, б) равны $C_1 = 33$ пФ, $L_1 = 1$ мкГн. Резистор ($R = 75$ Ом) служит для измерения напряжения с пересчетом в мощность, отдаваемую передатчиком в усредненный эквивалент антенны ЭАШ-4м.

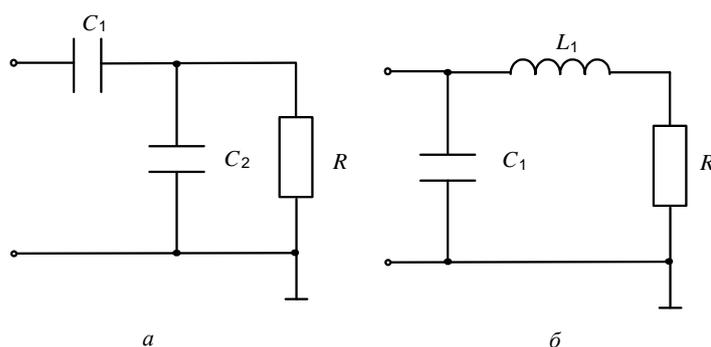


Рисунок 1 – Схемы эквивалентов антенны АШ-4

Для оценки соответствия эквивалентов параметрам реальной антенны на рисунке 2 представлены частотные зависимости действительных и мнимых составляющих импеданса согласно таблице 1 (кривые 1 и 2 соответственно) и аналогичные параметры эквивалентов (кривые 3 и 4 соответственно).

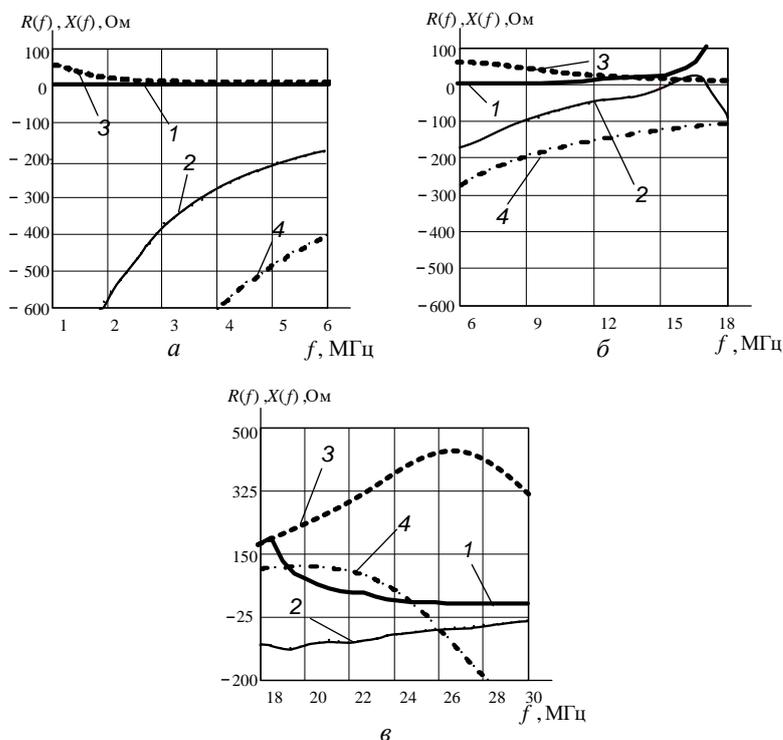


Рисунок 2 – Импедансные характеристики эквивалентов антенны АШ-4 в диапазонах 1,5...6 МГц (а); 6...18 МГц (б); 18...30 МГц (в)

Анализ приведенных зависимостей показывает, что в диапазонах 1,5...6 МГц и 6...18 МГц приемлемое приближение к параметрам реальной антенны имеют только действительные составляющие сопротивлений эквивалентов. В диапазоне 18...30 МГц соответствие эквивалента реальной антенне трудно признать удовлетворительным, поэтому объективно существует необходимость в совершенствовании модели входного сопротивления антенны во всем рабочем диапазоне частот для повышения ее адекватности сопротивлению реальной антенны единым эквивалентом.

Измеренные характеристики РТУ могут содержать случайные составляющие самой различной природы (шумы, помехи, дестабилизирующие факторы и ошибки измерений), а также имеют сложный вид и представляются в виде таблиц или графиков. Исходя из этого, для анализа и расчета эквивалентных цепей предлагается использовать математические модели, представляющие из себя аналитическое представление характеристик, т.е. представление в виде достаточно простых физически реализуемых функций [4].

Такой подход основан на использовании методов аппроксимации и подробно рассмотрен в работах [5, 6]. Суть моделирования сводится к тому, что передаточные и входные функции РТУ, исходя из условий физической реализуемости, являются дробно-рациональными функциями от комплексной частоты (s) вида:

$$f(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2(s)^2 + \dots + a_k(s)^k}{b_0 + b_1s + b_2(s)^2 + \dots + b_q(s)^q}, \quad (1)$$

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 [7].

С помощью математического преобразования, выражение (1) можно представить в виде четной $Ev f(s)$ и нечетной $Od f(s)$ части от $f(s)$:

$$Ev f(s) = \frac{m_1m_2 - n_1n_2}{m_2^2 - n_2^2}; \quad (2)$$

$$Od f(s) = \frac{n_1m_2 - m_1n_2}{m_2^2 - n_2^2}; \quad (3)$$

где

$m_1 = a_0 + a_2s^2 + \dots + a_{2k}s^{2k}$ - четная часть числителя функции $f(s)$;

$m_2 = b_0 + b_2s^2 + \dots + b_{2q}s^{2q}$ - четная часть знаменателя функции $f(s)$;

$n_1 = a_1s + \dots + a_{(2k-1)}s^{(2k-1)}$ - нечетная часть числителя функции $f(s)$;

$n_2 = b_1s + \dots + b_{(2q-1)}s^{(2q-1)}$ - нечетная часть знаменателя функции $f(s)$.

При $s = i\omega$ имеем:

$$Ev f(s)|_{s=i\omega} = \text{Re } f(i\omega);$$

$$Od f(s)|_{s=i\omega} = i \text{Im } f(i\omega).$$

Выражения (2) и (3) предлагается использовать в качестве аппроксимирующих функций $\text{Re } f(s)$ и $\text{Im } f(s)$ импедансных характеристик антенны (таблица 1) и сформировать аналитическую математическую модель (АММ) нагрузки с высокой степенью адекватности.

Используя подход, изложенный выше, была получена дробно-рациональная функция, аппроксимирующая измеренные значения импеданса антенны (таблица 1), а также, согласно критерия Гурвица [8, С. 66-68], является устойчивой.

$$Z_{\text{вх}}(s) = \frac{1773 + 128,664s + 10,984s^2 + 0,521s^3 + 0,073s^4}{0,02 + 1,541s + 0,115s^2 + 0,00571s^3 + 0,0003275s^4}.$$

Результат аппроксимации для измеренных значений импеданса антенны (таблица 1) представлены в виде частотных зависимостей активного и реактивного сопротивлений модели (кривые 1 и 2 соответственно) и реальной антенны (кривые 3 и 4 соответственно) приведены на рисунке 3.

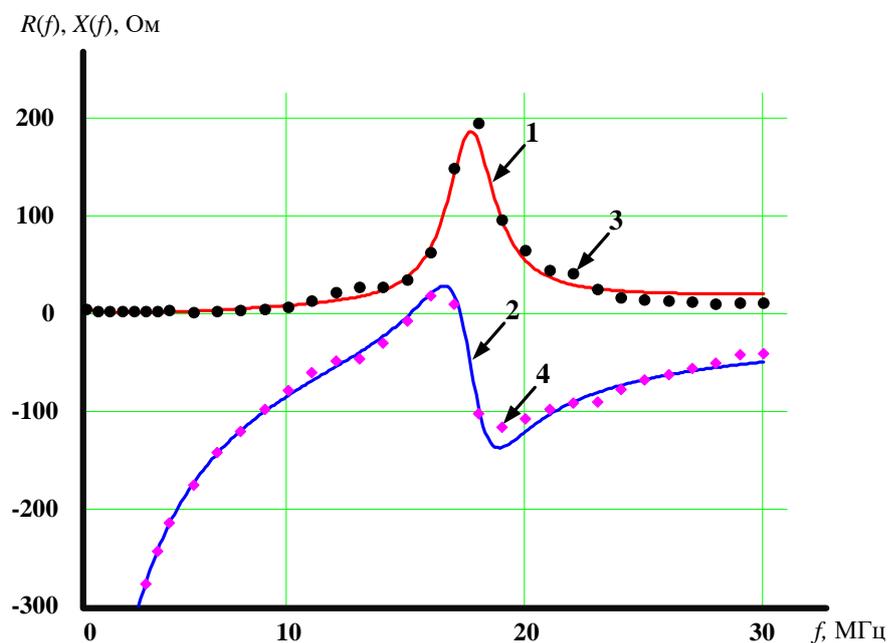


Рисунок 3 – Частотные зависимости активного и реактивного сопротивления модели и реальной антенны

Представленные результаты получены при абсолютной погрешности аппроксимации $\Delta \text{Re}Z_{\text{вх}}(s) = 5.15 \text{ Ом}$ и $\Delta \text{Im}Z_{\text{вх}}(s) = 4.6 \text{ Ом}$, что соответствует относительной погрешности не более 10%, что позволяет говорить о высокой степени адекватности полученной АММ.

Таким образом, полученные результаты моделирования могут использоваться для составления эквивалентов сопротивления антенны, как во всем частотном диапазоне, так и по поддиапазнам. Данные модели дают возможность использовать для согласования антенн аппарат современной теории широкополосного согласования [9, 10]. Также следует отметить, что разработка и изготовление эквивалентов антенн по результатам моделирования (составления эквивалентов сопротивления антенны как во всем частотном диапазоне, так и по поддиапазнам) может обеспечить проверку принимаемых технических решений на этапах эскизного и технического проектирования при выполнении опытно-конструкторских работ по созданию усилителей мощности, антенных согласующих устройств современных радиостанций, использующих помехозащищенный режим программной перестройки рабочей частоты.

Список литературы:

1. П.В.Бойкачев, Е.Л.Крейдик, Г.А.Филиппович, Моделирование сопротивления короткой монопольной антенны диапазона декаметровых волн // Сб. научн. ст. УО «Военной академии Республики Беларусь». – 2013. – №3(40). – С. 69–74.
2. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства / Г.Н. Кочержевский. — М.: Связь, 1972. — 472 с.
3. Радиостанция Р-134: инструкция по техническому обслуживанию ШИ 1.101.024 ИО. – 39 с.
4. Ланнэ, А.А. Оптимальный синтез линейных электрических цепей / А.А. Ланнэ. – М.: Связь, 1969. – 294 с.
5. Исаев, В.О., Дубовик, И.А., Бойкачев, П.В., Сутько, А.А., Математическая модель радиотехнических устройств / В. О. Исаев, И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев, А.А. Сутько // П

Международная Научно-Практическая Конференция «Endless Light in Science», г. Нур-Султан, Казахстан, 2020. – С.27-33.

6. Исаев, В.О., Бойкачев, П.В., Способ аппроксимации иммитансных характеристик радиотехнических устройств / В. О. Исаев, П. В. Бойкачев // XIII Машеровские чтения: материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Витебск, 18 октября 2019 г. – Витебск: ВГУ имени П.М.Машерова, 2019. - С. 18-20.

7. Карни, Ш., Теория цепей. Анализ и синтез. – М. «Связь», 1973. – 269с.

8. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика: Учеб. для вузов по специальности «Радиотехника». – М.: Высш. шк., 1990. – 335 с.

9. 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]. URL: <http://rep.bntu.by/handle/data/49920> (дата обращения: 12.11.2020).

10. Васильев, А.Д. Структурно-параметрический синтез четырехполюсников при широкополосном согласовании и моделировании на основе аппарата Т-матриц: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / А. Д. Васильев. – Минск, 2010. – 121 л.