

**В. Е. Пониматкин, А. А. Шпилевой, А. А. Горбачёв
В. А. Гоглев, Б. И. Каскевич**

СУДОВАЯ ЧАСТОТОНЕЗАВИСИМАЯ АНТЕННА ДИАПАЗОНА УКВ

Поступила в редакцию 12.04.2021 г.

Рецензия от 30.04.2021 г.

60

Статья посвящена вопросам разработки малогабаритных антенных систем для обеспечения устойчивой радиосвязи на морских судах в условиях сложной электромагнитной обстановки, когда в ограниченной области пространства палубы необходимо расположить большое число радиоэлектронных средств. Предлагаемые антенные конструкции обладают положительными массогабаритными свойствами, характеризуются высоким постоянством коэффициента усиления, способны работать в широком диапазоне частот, что предполагает возможность их активного использования в системах корабельной УКВ-радиосвязи на морских транспортных средствах различного назначения.

The article is devoted to the development of small-sized antenna systems to ensure stable radio communication on ships in a complex electromagnetic environment, when a large number of radio-electronic devices must be located in a limited area of the deck space. The proposed antenna structures have positive weight and size properties, are characterized by a high constant gain, and are capable of operating in a wide frequency range, which suggests the possibility of their active use in shipboard VHF radio communication systems on marine vehicles for various purposes.

Ключевые слова: судовая радиосвязь, малогабаритная антенная система, компланарные линии, взаимное сопротивление, плечо вибратора

Keywords: ship radio communication, small antenna system, coplanar lines, mutual resistance, vibrator shoulder

Вопросы разработки судовых малогабаритных антенных систем остаются актуальными практически для всех используемых диапазонов радиочастот. В значительной степени это связано с тем, что эффективность излучения антенны непосредственно зависит от соотношения между ее физическими размерами и длиной излучаемой волны. К наиболее используемым в целях судовой радиосвязи участкам частотного спектра ультракоротких волн (УКВ) относятся 100–400 МГц (для ближней радиосвязи); 400–800 МГц (для связи через низколетящие спутники Земли); 800–5000 МГц (для использования на судах сотовой связи различных стандартов); 5000–10 000 МГц (для связи через геостационарные спутники Земли) [1].



Рассмотрим особенности типовых антенных систем указанных диапазонов.

Для работы в диапазоне частот первого участка (100–400 МГц) применяются конструкции в виде цилиндрического симметричного вибратора, конического симметричного вибратора, дискоконусной антенны, симметричного шунтового вибратора Айзенберга [2].

Цилиндрический симметричный полуволновый вибратор с синфазными токами в плечах $I_A^I = I_A^II$, работающий в диапазоне 100–150 МГц и используемый для обеспечения судов ближней радиосвязью, состоит из двух проволочных цилиндров, закрепленных при помощи изолятора и соединенных через коническую форму с двухпроводной питающей линией. Недостатками такой конструкции являются ограниченный частотный диапазон, значительный вес и габариты антенны. При этом длина вибратора существенно влияет на его излучающие свойства [3]: частота настройки антенны ($f_{\text{НАС}} = f_0$) при работе в режиме собственной длины волны [4], непосредственно связанная с резонансной длиной волны λ_0 , определяет геометрический размер плеча вибратора ℓ : $4 \cdot \ell = \lambda_0$; $f_0 = C/\lambda_0$, где C – скорость света в вакууме ($3 \cdot 10^8$ м/с). Каждое плечо симметричного вибратора настроено на среднюю частоту диапазона $f = 125$ МГц. Соответственно, $\lambda_0 = 2,4$ м и длина каждого из плеч вибратора $\ell = \lambda_0/4 = 0,6$ м, что является наименьшим размером плеча, при котором еще возможен резонанс антенной системы как колебательного контура, что обеспечивает ей чисто активное входное сопротивление и облегчает согласование с фидером. Коэффициент перекрытия для такой системы равен 1,2. Максимум излучения симметричного вибратора лежит в плоскости, перпендикулярной к оси его плеч, а диаграмма направленности имеет вид восьмерки [4]. При уменьшении геометрических размеров вибраторов существенно возрастает емкостная составляющая их входного сопротивления, что не позволяет эффективно передавать энергию от фидера в антенну.

Биконический вибратор, работающий в диапазоне частот 100–400 МГц, состоит из двух плеч и двухпроводной линии, обеспечивающей подключение антенны к генератору. При этом коничность конструкции определяется углом θ , а длина плеча соответствует средней частоте рабочего диапазона $f_0 = 250$ МГц, $\ell = \lambda_0/4$; $\lambda_0 = C/f_0$. Своими направленными свойствами биконический вибратор в значительной степени аналогичен цилиндрическому симметричному вибратору.

Дискоконусная антенна работает в диапазоне частот 100–150 МГц и содержит в своей конструкции диск, изолятор и конус, соединенный с корпусом, который обеспечивает жесткость системы. Внутри корпуса располагается коаксиальный кабель питания. Антенна характеризуется ограниченным частотным диапазоном. Длина конуса ℓ определяется средней частотой ее настройки антенны $f_0 = 125$ МГц.



Симметричный шунтовой вибратор Айзенберга, рассчитанный на диапазон частот 100–400 МГц, состоит из проволочных плеч-вибраторов цилиндрической формы, соединенных между собой шунтами, которые центральной частью крепятся к опоре. Длина плеч ℓ определяется аналогичным образом ($\ell = \lambda_0/4$; $\lambda_0 = C/f_0$) исходя из средней частоты настройки $f_0 = 250$ МГц.

Двухзаходная логоспиральная коническая антенна, работающая в диапазоне 400–800 МГц для радиосвязи через низколетающие спутники Земли, содержит: первую логоспираль [4], соединенную с одной стороны с клеммой и заземленную с противоположной стороны, вторую логоспираль, подключенную аналогичным способом, и коническую поверхность для размещения спиралей. Угол конической поверхности равен 10° , что обеспечивает формирование диаграммы направленности в пределах 150° .

Симметричный шунтовой вибратор Айзенберга, работающий в диапазоне 800–5000 МГц и используемый для обеспечения сотовой радиосвязи на судне, содержит два плеча и шунт. Направленные свойства вибратора характеризуются максимумом излучения в плоскости, перпендикулярной к оси плеч вибратора, и диаграммой направленности в виде восьмерки.

С целью уменьшения или исключения влияния работы корабельной УКВ антенной системы на другие радиотехнические средства судна следует максимально сократить ее физические размеры, одновременно повысить КПД за счет сложения мощности излучения в пространстве от совместной работы нескольких излучателей и минимизировав массогабаритные характеристики для оптимального размещения в условиях верхней палубы.

Рассмотрим два варианта построения симметричных вибраторных антенн, отвечающих указанным требованиям благодаря конструктивным особенностям используемых в них компланарных линий. На рисунке 1 схематично представлена компланарная система [5], содержащая две линии, расположенные под углом α друг к другу: d – расстояние между концами линий; ℓ_1 – длина первой линии; ℓ_2 – длина второй линии. При протекании по такой конструкции тока из-за взаимного влияния линий возникает встречный ток. Взаимное сопротивление R_{12} системы [6] может быть рассчитано по следующей формуле:

$$R_{12} = 30(m\ell_1)(m\ell_2) \cdot \left\{ \cos^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\sin md}{md} + \frac{\cos^2 \frac{\alpha}{2} - 2}{(md)^2} \left(\frac{\sin md}{md} - \cos md \right) \right\},$$

где $m = 2\pi/\lambda$ – коэффициент распространения; λ – длина волны.

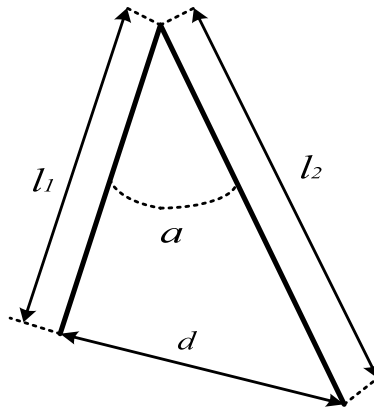


Рис. 1. Схематическое изображение компланарной антенной системы, состоящей из двух вибраторов, расположенных под углом α друг другу

На рисунке 2 представлены результаты расчетов величины взаимного сопротивления R_{12} системы из двух компланарных линий с параметрами $l_1 = l_2$, $\alpha = 10^\circ$ в диапазоне частот 100–10000 МГц при значениях длин 1, 1,5, 2, 2,5 и 3 см соответственно.

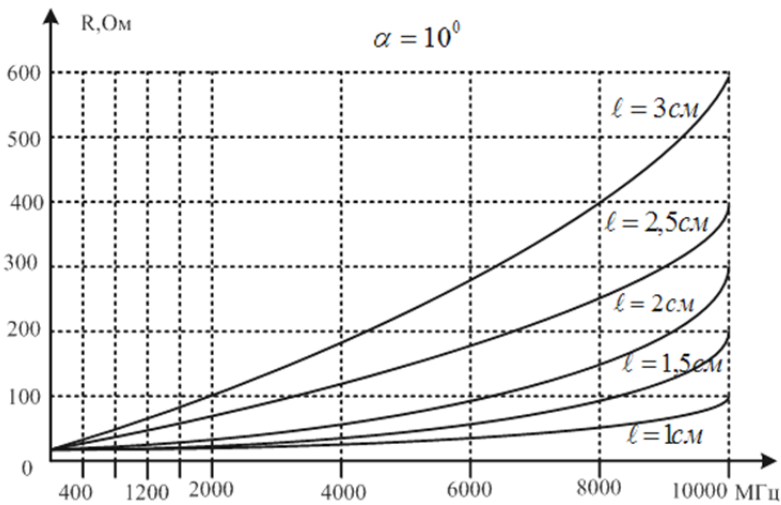


Рис. 2. Графики зависимостей взаимного сопротивления R_{12} от частоты для антенной системы из двух компланарных линий

На основе анализа графиков можно сделать выводы о том, что в диапазоне частот 100–2000 МГц целесообразно использовать вибраторы с геометрическими длинами 1–3 см, в диапазоне частот 2000–6000 МГц – вибраторы с длинами 1–2 см, в диапазоне частот 6000–10000 МГц – вибраторы с длинами 1–1,5 см.



Для реализации таких малогабаритных конструкций при условии обеспечения удовлетворительных параметров антенной системы предлагаются варианты, схематично представленные на рисунках 3 и 4.

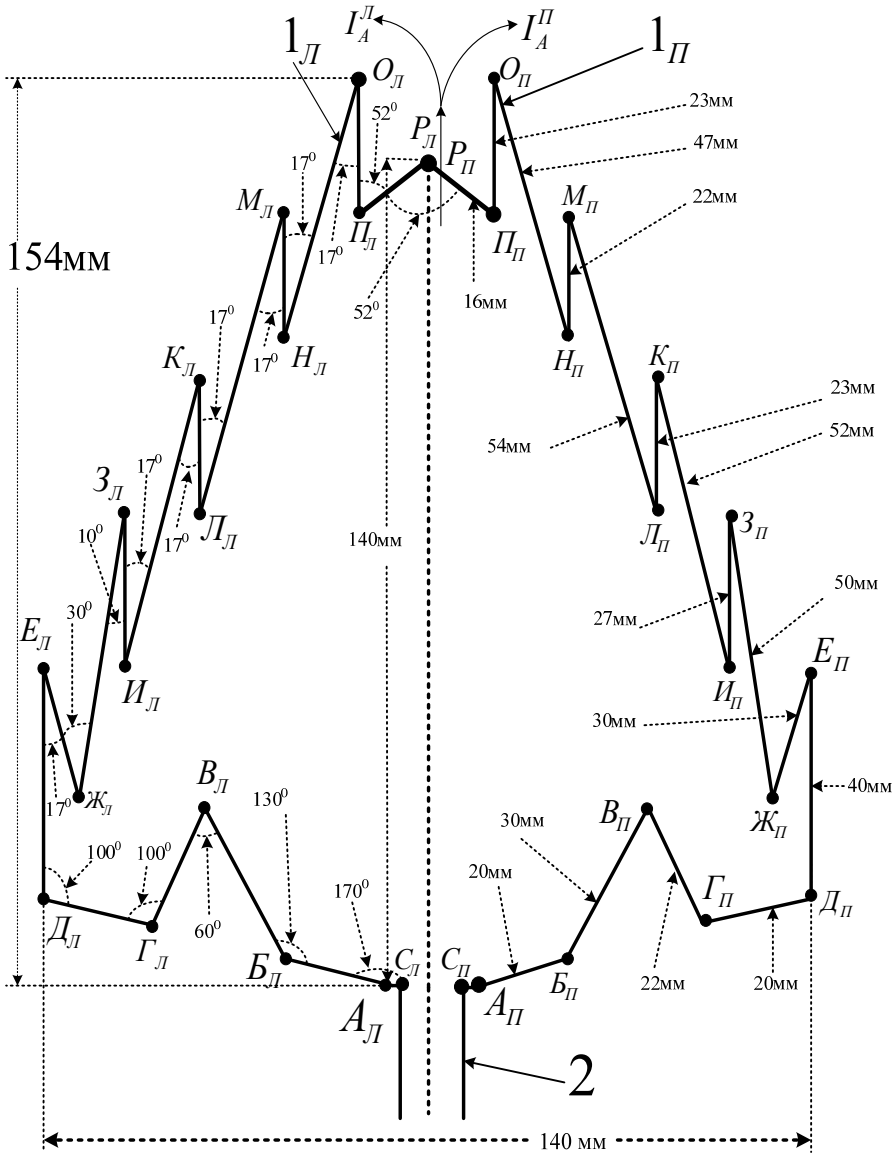


Рис. 3. Схема предлагаемой конструкции антенной системы

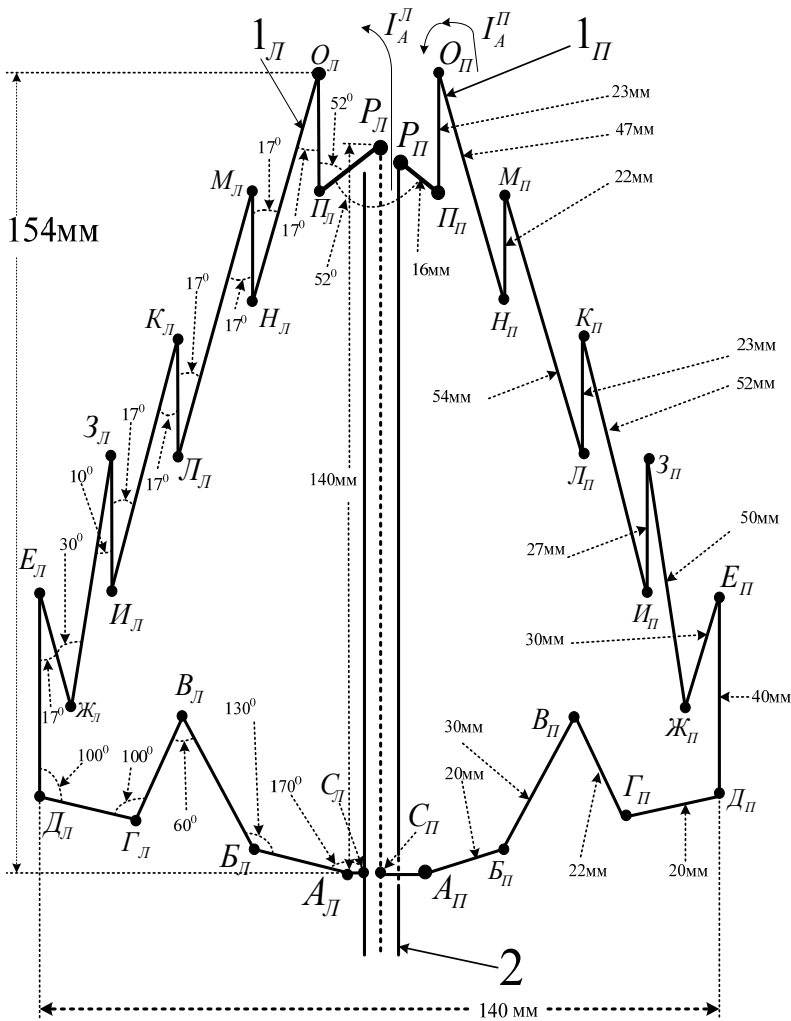


Рис. 4. Схема предлагаемой конструкции антенной системы с синфазными токами

Антенна, изображенная на рисунке 3, представляет собой конструкцию из симметрично расположенных вибраторов [7] общей высотой 154 мм и шириной 140 мм. Правое плечо 1_П и левое плечо 1_Л в верхней части соединены общей клеммой «P_П» – «P_Л» и подключены к центральной жиле коаксиального кабеля длиной 140 мм, обеспечивающего питание антенны 2. При этом достигается противофазность токов в плечах ($I_A^П \neq I_A^Л$), каждое из которых представляет собой последовательное соединение компланарных линий с различными параметрами как по углу α , так и по длине ℓ_1, ℓ_2 . Правое плечо симметричного вибратора содержит последовательное соединение компланарных линий. Первая компланарная линия представляется углом $\alpha=50^\circ$ между со-



единенными отрезками линий: первой — длиной 16 мм между клеммами «Р_П» — «П_П» и второй — длиной 23 мм между клеммами «П_П» — «О_П». Вторая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 17^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 23 мм между клеммами «П_П» — «О_П» и второй — длиной 47 мм между клеммами «О_П» — «Н_П». Третья компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 17^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 47 мм между клеммами «О_П» — «Н_П» и второй — длиной 22 мм между клеммами «Н_П» — «М_П». Четвертая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 17^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 22 мм между клеммами «Н_П» — «М_П» и второй — длиной 54 мм между клеммами «М_П» — «Л_П». Пятая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 17^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 54 мм между клеммами «М_П» — «Л_П» и второй — длиной 23 мм между клеммами «Л_П» — «К_П». Шестая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 17^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 23 мм между клеммами «Л_П» — «К_П» и второй — длиной 52 мм между клеммами «К_П» — «И_П». Седьмая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 17^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 52 мм между клеммами «К_П» — «И_П» и второй — длиной 27 мм между клеммами «И_П» — «З_П». Восьмая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 10^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 27 мм между клеммами «И_П» — «З_П» и второй — длиной 50 мм между клеммами «З_П» — «Ж_П». Девятая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 30^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 50 мм между клеммами «З_П» — «Ж_П» и второй — длиной 30 мм между клеммами «Ж_П» — «Е_П». Десятая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 17^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 30 мм между клеммами «Ж_П» — «Е_П» и второй — длиной 40 мм между клеммами «Е_П» — «Д_П».

Одиннадцатая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 100^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 40 мм между клеммами «Е_П» — «Д_П» и второй — длиной 20 мм между клеммами «Д_П» — «Г_П». Двенадцатая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 100^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 20 мм между клеммами «Д_П» — «Г_П» и второй — длиной 22 мм между клеммами «Г_П» — «В_П». Тринадцатая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 60^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 22 мм между клеммами «Г_П» — «В_П» и второй — длиной 30 мм между клеммами «В_П» — «Б_П». Четырнадцатая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 130^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 30 мм между клеммами «В_П» — «Б_П» и второй — длиной 20 мм между клеммами «Б_П» — «А_П». Клемма «А_П» соединена с клеммой «С_П» экранной оболочки коаксиального кабеля 2.



На рисунке 4 представлена следующая возможная схема антенной системы, содержащая симметрично расположенные вибраторы общей высотой 154 мм. Правое плечо $1_{\text{П}}$ клеммой «Р_П» соединено с экраном коаксиального кабеля, а левое плечо $1_{\text{Л}}$ в верхней части соединено клеммой «Р_Л» с центральной жилой коаксиального кабеля длиной 140 мм. При питании антенны 2 обеспечивается синфазность токов в плечах ($I_A^{\text{П}} = I_A^{\text{Л}}$). Каждое плечо представляет собой последовательное соединение компланарных линий с различными параметрами как по углу α , так и по длине линий ℓ_1, ℓ_2 . Первая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 50^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 16 мм между клеммами «Р_П» — «П_П» и второй — длиной 23 мм между клеммами «П_П» — «О_П». Вторая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 17^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 23 мм между клеммами «П_П» — «О_П» и второй — длиной 47 мм между клеммами «О_П» — «Н_П». Третья компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 17^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 47 мм между клеммами «О_П» — «Н_П» и второй — длиной 22 мм между клеммами «Н_П» — «М_П». Четвертая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 17^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 22 мм между клеммами «Н_П» — «М_П» и второй — длиной 54 мм между клеммами «М_П» — «Л_П». Пятая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 17^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 54 мм между клеммами «М_П» — «Л_П» и второй — длиной 23 мм между клеммами «Л_П» — «К_П». Шестая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 17^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 23 мм между клеммами «Л_П» — «К_П» и второй — длиной 52 мм между клеммами «К_П» — «И_П». Седьмая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 17^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 52 мм между клеммами «К_П» — «И_П» и второй — длиной 27 мм между клеммами «И_П» — «З_П». Восьмая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 10^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 27 мм между клеммами «И_П» — «З_П» и второй — длиной 50 мм между клеммами «З_П» — «Ж_П». Девятая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 30^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 50 мм между клеммами «З_П» — «Ж_П» и второй — длиной 30 мм между клеммами «Ж_П» — «Е_П». Десятая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 17^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 30 мм между клеммами «Ж_П» — «Е_П» и второй — длиной 40 мм между клеммами «Е_П» — «Д_П». Одиннадцатая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 100^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 40 мм между клеммами «Е_П» — «Д_П» и второй — длиной 20 мм между клеммами «Д_П» — «Г_П». Двенадцатая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 100^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой — длиной 20 мм между клеммами «Д_П» — «Г_П» и второй — длиной



22 мм между клеммами «Г_П» – «В_П». Тринадцатая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 60^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой – длиной 22 мм между клеммами «Г_П» – «В_П» и второй – длиной 30 мм между клеммами «В_П» – «Б_П». Четырнадцатая компланарная линия правого плеча представляется углом $\alpha = 130^\circ$ между соединенными отрезками линий: первой – длиной 30 мм между клеммами «В_П» – «Б_П» и второй – длиной 20 мм между клеммами «Б_П» – «А_П». Клемма «А_П» правого плеча антенны соединена с клеммой «С_П» центральной жилы коаксиального кабеля 2, а клемма «А_Л» левого плеча антенны соединена с клеммой «С_Л» экранной оболочки коаксиального кабеля 2.

На рисунке 5 представлены результаты измерений активной (R) и реактивной (jX) составляющих входного сопротивления в диапазоне частот 100–10 000 МГц для симметричных вибраторов, изображенных на рисунках 3 и 4. Сопротивление R для диапазона указанных частот изменяется в пределах 25–60 Ом. Реактивное сопротивление jX лежит в пределах от 100 Ом на частотах 100–500 МГц до 20 Ом в остальной высокочастотной части диапазона.

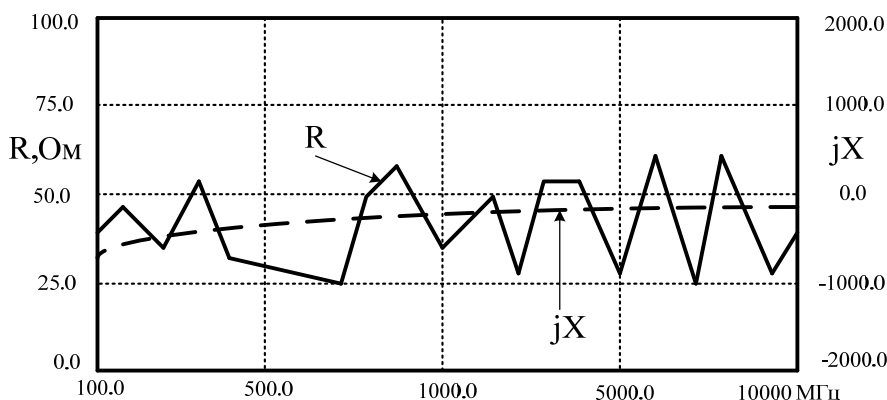


Рис. 5. Значения входного сопротивления антенны в рабочем диапазоне частот

Предлагаемые антенные конструкции характеризуются высоким постоянством коэффициента усиления (> 10), что позволяет использовать их для работы в широком диапазоне частот 100–10 000 МГц. Также они отличаются положительными массогабаритными свойствами – имеют малые размеры и массу, что делает их универсальными и весьма удобными при использовании в системах корабельной УКВ-радиосвязи на судах различного назначения.

Список литературы

1. Вершков М.В., Миротворский О.Б. Судовые антенны. Л., 1990.
2. Ротхаммель К. Антенны : в 2 т. Т. 1. М., 2005.
3. Гончаренко И.В. Антенны КВ и УКВ : в 2 ч. Ч. 2 : Основы и практика. М., 2005.



4. Пониматкин В.Е., Пименов В.С., Каскевич Б.И., Артемов Д.Г. Корабельная частотонезависимая УКВ антенная система : патент на изобретение №2731170 от 12.01.2021 г. М., 2021.

5. Пониматкин В.Е., Шpileвой А.А., Кужелев А.А., Типикин А.А. Антенный модуль коротковолнового диапазона // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2015. Вып. 4 : Физико-математические науки. С. 74–81.

6. Кужелев А.А., Пониматкин В.Е. Корабельная приемная антенная система : патент на изобретение №167704 от 01.10.2017 г. М., 2021.

7. Balanis C. A. Modern antenna handbook. N. Y., 2008.

Об авторах

Виктор Ефимович Пониматкин — канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Андрей Алексеевич Шpileвой — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

Андрей Александрович Горбачёв — канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: AlGorbachev@kantiana.ru

Владислав Алексеевич Гоглев — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Борис Игоревич Каскевич — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

The authors

Dr Viktor E. Ponimatkin, Associate Professor, Research Fellow, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Dr Andrey A. Shpilevoy, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

Dr Andrey A. Gorbachev, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: AlGorbachev@kantiana.ru

Vladislav A. Goglev, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Boris I. Kaskevich, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru