

К. В. Фролов

Инженер 1 категории, ПАО «Интелтех»

С. В. Русин

Кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, ПАО «Интелтех»

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СОГЛАСУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА МАЛОГАБАРИТНОЙ КОРАБЕЛЬНОЙ ПЕРЕДАЮЩЕЙ ДВ-СВ АНТЕННЫ

АННОТАЦИЯ. В статье изложены результаты расчета согласующего устройства малогабаритной корабельной передающей антенны ДВ-СВ диапазона.

Одной из актуальных проблем авианесущего флота является проблема миниатюризации антенны приводной радиостанции. Эта проблема может быть решена на основе замены класса излучения А2А на А1А [1]. При уменьшении габаритов антенны увеличивается ее добротность и напряжения на элементах антенно-фидерного тракта. В результате вопросы электрической прочности антенного устройства принимают важнейшее значение. В настоящей статье представлены результаты расчета малогабаритного антенного устройства диапазона ДВ-СВ и его электрической прочности.

Исторически сложилась традиция оборудовать аэродромы приводными радиостанциями диапазона ДВ-СВ, которые излучают в эфир опознавательный сигнал в классе А2А. Благодаря особенностям распространения радиоволн диапазона ДВ-СВ приводная радиостанция небольшой мощности обеспечивает достаточный уровень сигнала на входе бортового авиационного радиокompаса, даже когда самолет или вертолет находится за горизонтом. Тогда как зарубежные приводные радиостанции диапазона ДЦВ имеют большую мощность, но не способны обеспечить достаточный уровень сигнала на входе радиокompаса, если самолет находится на уровне горизонта или за горизонтом.

Передающая антенна приводной радиостанции диапазона ДВ-СВ имеет большие габариты, но, тем не менее, является электрически малой и характеризуется ограниченной полосой согласования и большой реактивностью входного сопротивления. Установить подобную антенну на корабль невозможно. Из-за нехватки места корабельная антенна меньше чем антенны на аэродроме, ее реактивность больше, а полоса согласования — уже. Для того чтобы облегчить проблему с компенсацией реактивности антенны, корабельные радиостанции используют меньший диапазон рабочих частот — 250...1500 кГц [2], тогда как диапазон аэродромных станций 150...1750 кГц [3]. Для расширения полосы согласования искусственно увеличивают потери мощности в антенной системе. Потери вносят просто: либо используют элементы с потерями в антенном контуре, либо включают в цепь антенны мощный резистор, который торчит из палубы корабля подключенный верхней клеммой к антенне, а нижней — к антенному контуру. Чтобы компенсировать искусственно внесенные потери, корабельная радиостанция имеет большую мощность — 1 кВт [2], тогда как ее аэродромные аналоги имеют мощность не более 500 Вт [3]. Тем не менее, все эти меры не решают проблему размещения антенны, габариты корабельной антенны велики для корабля. Например,

на корвете проекта 20380 установлена Т-образная антенна, вертикальная часть которой имеет длину 9,4 м, а горизонтальная — 14,6 м. Для поддержки антенны используют дополнительную мачту. Дополнительная мачта влечет использование более прочного, а значит более тяжелого корпуса. Большая антенна и дополнительная мачта повышают радиолокационную заметность, а тяжелый корпус ухудшает ходовые качества корабля.

Проблема миниатюризации корабельной передающей антенны диапазона ДВ-СВ актуальна. Габариты антенны могут быть значительно уменьшены, если заменить класс излучения А2А на А1А. Для неискаженной передачи опознавательного сигнала в эфир необходима полоса 15 Гц, тогда как для передачи сигнала в эфир используют класс излучения А2А с частотой основного тона 1020 ± 50 Гц [2]. Соответственно, в эфире сигнал занимает полосу 2140 Гц, т. е. в 142 раза больше чем необходимо. Излучаемый в эфир сигнал является сверхширокополосным [4, с. 7], а для его излучения используется узкополосная передающая антенна, полоса согласования которой расширена за счет уменьшения КПД.

Приемником опознавательного сигнала является авиационный радиокompас с полосой пропускания 600 Гц [3], что в 40 раз больше необходимой. Если уменьшить полосу пропускания до необходимых 15 Гц, то мощность шумов на входе радиокompаса уменьшится в 40 раз. Это значит, что с переходом в узкополосный режим можно использовать на корабле передатчик в 40 раз меньшей мощности, т. е. всего 25 Вт вместо 1000 Вт. При этом отношение сигнал/шум на входе радиокompаса останется прежним. И, кроме того, появляется возможность значительно уменьшить габариты передающей антенны без потери КПД.

Параметром, который связывает габариты, полосу согласования и КПД передающего антенного устройства, является добротность Q :

$$Q = \frac{X}{2(R_{\Pi} + R_{\Sigma})}, \quad (1)$$

где X — реактивная часть входного сопротивления антенны, R_{Π} — сопротивление потерь, а R_{Σ} — сопротивление излучения. Поскольку в ДВ-СВ диапазоне $R_{\Sigma} \ll R_{\Pi}$, то добротность обратно пропорциональна сопротивлению потерь $Q \sim \frac{1}{R_{\Pi}}$. Под антенным устройством понимают

собственно антенну с антенным контуром. Чис-

ленно добротность антенного устройства равна отношению центральной частоты f_0 к полосе согласования антенны $2\Delta f$:

$$Q = \frac{f_0}{2 \cdot \Delta f}. \quad (2)$$

Уменьшив полосу согласования $2\Delta f$ в 142 раза можно уменьшить сопротивление потерь R_{Π} в 142 раза, увеличив тем самым добротность антенного устройства. При этом увеличится КПД антенного устройства, который связан с добротностью:

$$\text{КПД} = \frac{Q}{Q_0}, \quad (3)$$

где Q_0 — добротность идеальной (без учета потерь) антенны, т. н. «внешняя» добротность антенны:

$$Q_0 = \frac{X}{2R_{\Sigma}}. \quad (4)$$

Если антенна выполнена правильно и в заданных габаритах имеет минимально возможное реактивное сопротивление X и максимально возможное сопротивление излучения R_{Σ} , то ее «внешняя» добротность минимальна, зависит от габаритов антенны и определяется выражением [5]:

$$Q_0 = \left[\frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{ka} \right], \quad (5)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, a — радиус сферы, описанной вокруг антенны.

Основной вклад в величину Q_0 вносит первое слагаемое правой части, которое при уменьшении радиуса описанной окружности a в 3,2 и более раза много больше второго. Можно с приемлемой для практики точностью считать «внешнюю» добротность зависящей обратно пропорционально кубу a ($Q_0 \sim \frac{1}{a^3}$).

Из выражений (3) и (5) следует: для того чтобы КПД антенного устройства остался прежним после уменьшения R_{Π} в 142 раза, можно уменьшить габариты антенны так, чтобы радиус сферы описанной вокруг антенны уменьшился в $142^{1/3}$ раза, т. е. в 5,225 раз.

Нетрудно определить, что радиус окружности, описанной вокруг Т-образной антенны, установленной на корвете проекта 20380, равен $a = 7,535$ м.

Переход в узкополосный режим дает возможность уменьшить габариты передающей антенны до такой величины, что радиус описанной вокруг нее окружности будет в 5,225 раз меньше и составит 1,44 м. При этом будет достаточно мощности приводной радиостанции 25 Вт, чтобы эффективность радиопривода осталась прежней.

Малогабаритная антенна может быть выполнена с соблюдением технологии «Стелс». Как один из вариантов это может быть несимметричная антенна с верхней емкостной нагрузкой. Уменьшение габаритов передающей антенны связано с увеличением напряжений на элементах антенно-фидерного тракта. Конструкция антенны должна исключать возможность как электрического пробоя в тракте возбуждения, так и факельное истечение (ионизацию воздуха) на внешних элементах антенны. Для примера приведем расчет параметров малогабаритного передающего антенного устройства и напряжений на его элементах. Габариты антенны таковы, что

вокруг нее можно описать окружность радиуса 1,5 м. С целью понижения напряжения на опорном изоляторе увеличена площадь антенны, а для понижения градиента потенциала — увеличен радиус провода вертикальной части относительно длины и радиус верхней емкостной нагрузки.

Схема антенного устройства представлена на рис. 1, она состоит из несимметричной антенны с верхней емкостной нагрузкой (A), антенного контура ($L_{ак}$), сопротивления потерь (поглотителя) (R_n), и Г-образного согласующего устройства (СУ) на реактивных элементах L_p и C_s .

Несимметричная антенна с верхней емкостной нагрузкой изображена на рис. 2. По условию, габариты антенны таковы, что радиус описанной вокруг нее сферы равен 1,5 м. Длина вертикальной антенны $l = 1,5$ м, диаметр 6 дюймов (радиус $a = 165$ мм), верхняя емкостная нагрузка — диск радиусом $r = 1,5$ м. Потери мощности в реальных проводниках антенного устройства, в том числе за счет скин-эффекта учтены величиной сопротив-

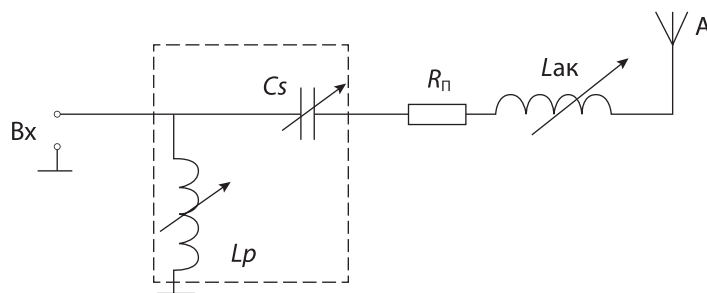


Рис. 1. Схема антенного устройства электрического типа с согласующим устройством на реактивных элементах с последовательной емкостью

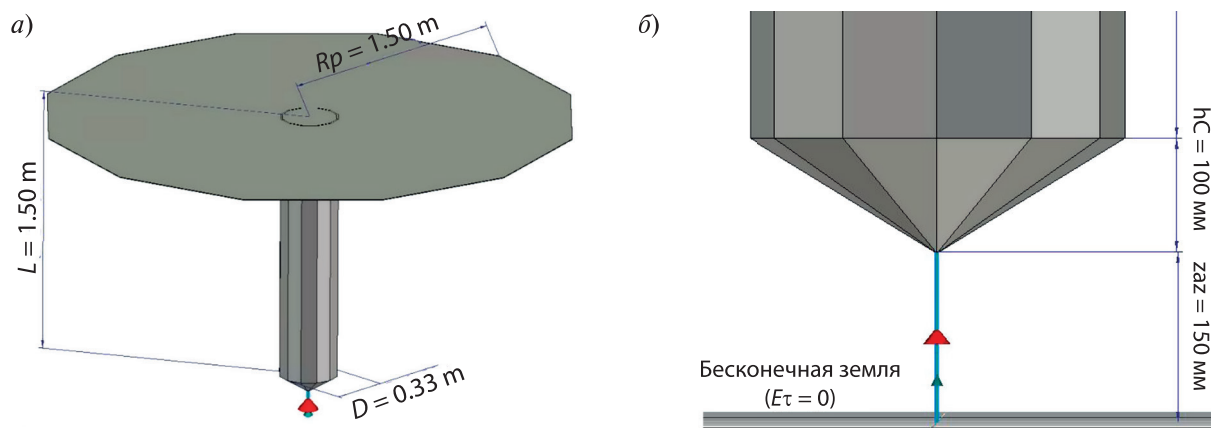


Рис. 2. Несимметричная антенна с верхней емкостной нагрузкой с различных ракурсов, красным треугольником обозначена точка приложения сторонней ЭДС

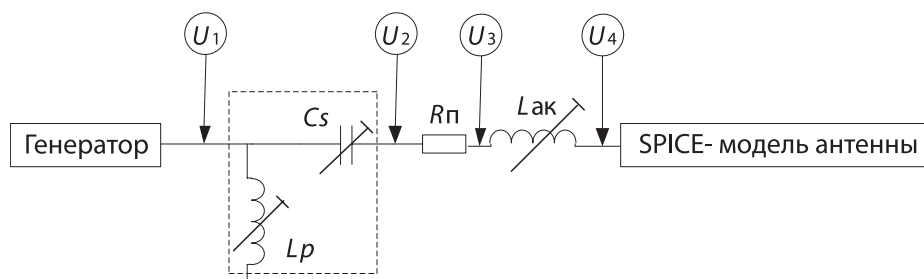


Рис. 3. Схема антенного устройства для анализа в CST Design Studio, и точки, в которых вычислено напряжение на элементах цепи

Таблица 1

Величины элементов антенного устройства

Параметр	Частота, кГц	
	190	1750
C_s , нФ	80	8,33
$R_{п}$, Ом	1,43	
L_p , мкГн	8,6	0,97
L_{ak} , мкГн	4074	47,2
Коэффициент отражения, дБ	-18,26	-24,08
КСВН на входе антенного устройства	1,278	1,13

ления потерь $R_{п}$, в нем же учтены необходимые потери для уменьшения добротности антенного устройства с целью согласования в передатчиком в полосе 15 Гц на частоте настройки 190 кГц.

Анализ антенного устройства выполнен в диапазоне 190...1750 кГц в программах *RFSim99* и *CST Microwave Studio*. При разбросе электрических параметров элементов схемы в пределах 5 % обеспечивается согласование с приводной радиостанцией на уровне КБВ = 1...0,6.

Модель антенны выполнена в *CST Microwave Studio* в качестве материала выбран идеально проводящий металл ($\sigma = \infty$). Нижняя коническая часть выполнена из сплошного усеченного конуса с радиусом нижнего основания 1.5 мм и радиусом верхнего основания $R = 330$ мм. Вертикальная часть выполнена из трубки внешним диаметром $R = 330$ мм, длиной $L = 1500$ мм и толщиной стенки 3 мм. Емкостная нагрузка представлена диском толщиной 3 мм и радиусом $R_p = 1500$ мм. В качестве подстилающей поверхности выбран идеальный проводник на поверхности которого касательная составляющая электрического поля равна нулю $E_{\tau} = 0$. Для облегчения задачи построения расчетной сетки все изогнутые элементы имеют 12 граней.

Электродинамический расчет выполнен во временной области с использованием метода конечных разностей во временной области (КРВО).

На основании электродинамического расчета получена SPICE-модель антенны, которая используется в расчетах антенного контура и согласующего устройства в *CST Design Studio*.

Начальные величины элементов Г-образной согласующей цепи найдены по методике изложенной в [6, с. 112].

Схема антенного устройства для анализа в *CST Design Studio* представлена на рис. 3.

Величины элементов антенного устройства на краях частотного диапазона анализа представлены в табл. 1.

Частотная зависимость коэффициента отражения и КСВН на краях частотного диапазона анализа (190 и 1750 кГц) представлена на графиках, рис. 4 и 5, соответственно.

Величины напряжений $U_1...U_4$ на элементах антенного устройства, на краях частотного диапазона анализа при мощности генератора 25 Вт представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2 наибольшее напряжение 3508 В возникает на входе антенны при частоте

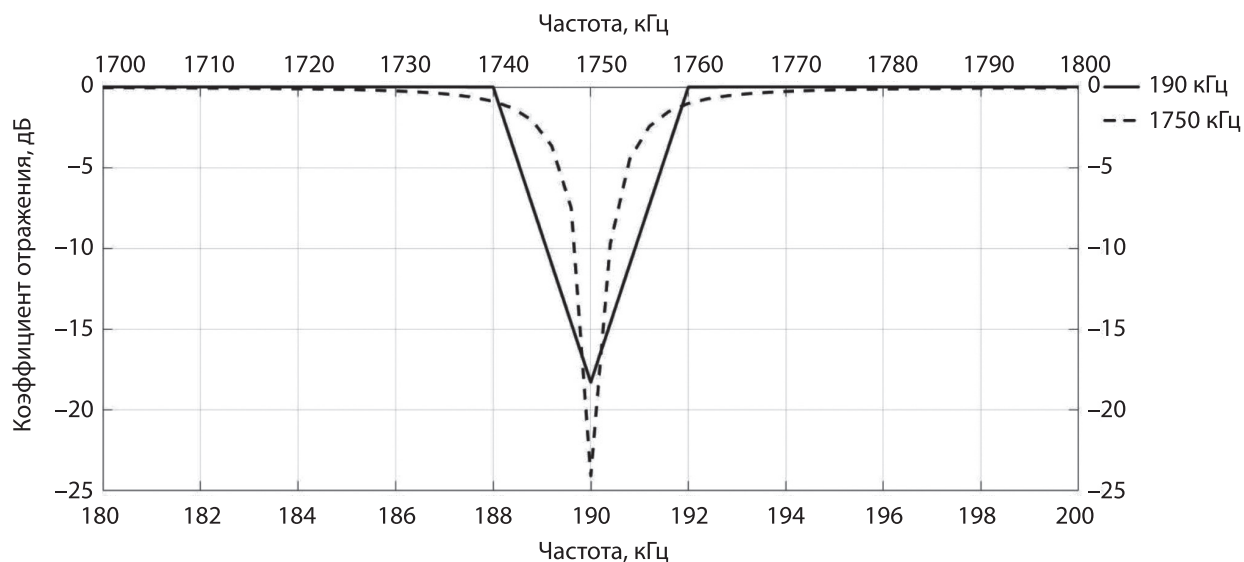


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения в окрестности 190 кГц и 1750 кГц

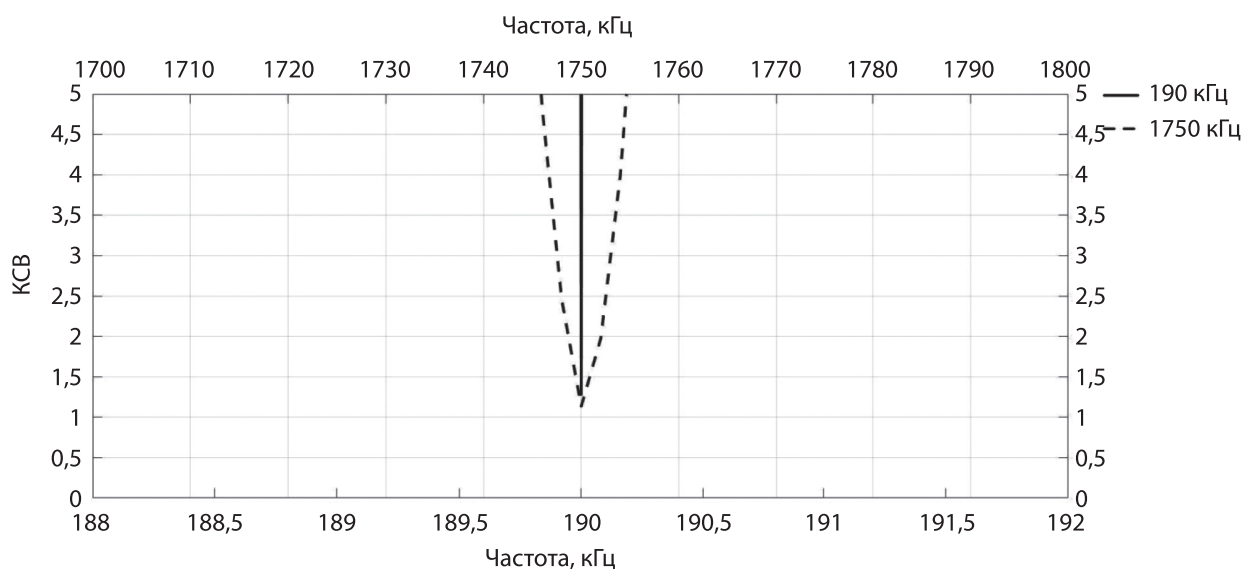


Рис. 5. Частотная зависимость КСВН в окрестности 190 кГц и 1750 кГц

Таблица 2

Напряжения на элементах антенного устройства при мощности генератора 25 Вт на частотах настройки 190 и 1750 кГц.

Частота настройки, кГц	Напряжения на элементах цепи, В			
	U_1	U_2	U_3	U_4
190	7,1	1,163	0,529	3508
1750	7,1	1,04	0,201	343

настройки 190 кГц. Величина его создаст в питающем зазоре напряженность электрического поля $E = 2339 \text{ В/см}$, что много меньше напряженности поля электрического пробоя $3 \cdot 10^4 \text{ В/см}$.

Выводы

Из приведенных расчетов следует, что миниатюризация приводной антенны ДВ-СВ диапазона на основе замены класса излучения А2А на А1А возможна. Смысл такого решения проблемы состоит в замене сверхширокополосного сигнала на узкополосный. Замена класса излучения позволит реализовать миниатюрную передающую антенну диапазона ДВ-СВ, которую можно вписать в сферу радиусом 1,5 м, а также использовать приводную радиостанцию меньшей мощности. Эффективность радионавигационного комплекса при этом останется прежней.

Электрический пробой в тракте возбуждения антенны и факельная ионизация воздуха на элементах антенны будут исключены.

Использование узкополосных сигналов в системе радиопривода требует модернизации автоматического радиокompаса с целью обеспечения приема опознавательного знака в двух классах излучения: А1А — для привода самолета или вертолета на авианесущий корабль и А2А — для привода на береговой аэродром. Габариты, элементы крепления и внешние подключения модернизированного радиокompаса останутся прежними.

Уменьшение габаритов корабельной антенны приводной радиостанции позволит отказаться от дополнительной мачты, что улучшит боевые качества авианесущих кораблей: уменьшит их радиолокационную заметность и улучшит ходовые качества за счет уменьшения габаритов и массы корпуса корабля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ломакова А. С. Способ миниатюризации корабельной передающей ДВ-СВ антенны приводной радиостанции / А. С. Ломакова, Ю. В. Савенкова, С. В. Русин, А. К. Скворцов // Информация и Космос. — 2018, № 1. — С. 51–56.
2. Изделие РПДУ Р-637 Технические условия ЖЯ1.201.009 ТУ.
3. Приводные аэродромные радиостанции типа ПАР-10, Автоматизированный приводной передатчик АПРМ-250. Техническое описание. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.irtysh.com.ru/catalog/radiostations/4.html> (дата обращения 20.04.2016)
4. Урядников Ю. Ф. Сверхширокополосная связь. Теория и применение / Ю. Ф. Урядников, С. С. Аджемов. — М.: СОЛОН-Прес, 2009, 368 с. — С. 6–8.
5. McLean J.S. A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of the electrically small antennas // IEEE Trans. Antennas and Prop. — 1996. — Vol. 44. — № 5. — P. 672–676.
6. Ротхаммель К. Энциклопедия антенн.: Пер. с нем. / К. Ротхаммель, А. Кришке. — М.: ДМК Пресс, 2011. — 812 с.