

Войтович В.В., Петраш Ю.В., Белоусов М. М., Юнгайтис Е.М., Ершов А.В.,
Войтович Н.И.

DOI: 10.14529/secur200403

ДИПОЛЬНАЯ АНТЕННА С КРУГОВОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ В ПЛОСКОСТИ ВЕКТОРА E ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЦЕЛОСТНОСТИ ИНФОРМАЦИИ СИСТЕМ ПОСАДКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

В работе представлены результаты исследований всенаправленной дипольной антенны, предназначенной для установки на беспилотный летательный аппарат категории мини — БПЛА. Антенна формирует круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости с горизонтальной поляризацией поля излучения. Неравномерность диаграммы направленности исследуемой антенны в свободном пространстве в горизонтальной плоскости составляет $\pm 0,2$ дБ. Антенна содержит минимальное количество элементов фидерного тракта, имеет удобную для практической реализации конструкцию.

Ключевые слова: целостность навигационной информации, ГРМ, дипольная антенна, беспилотный летательный аппарат, мини-БПЛА.

DIPOLE ANTENNA WITH CIRCULAR RADIATION PATTERN IN THE E-PLANE FOR VALIDATION THE INTEGRITY OF THE AIRCRAFT LANDING SYSTEMS INFORMATION

The paper presents the results of studies of an omnidirectional dipole antenna designed for installation on an unmanned aerial vehicle of the mini-UAV category. The antenna forms a circular radiation pattern in the horizontal plane with horizontal polarization of the radiated field. Irregularity of the radiation pattern of the antenna under study in free space in the horizontal plane is ± 0.2 dB. The antenna contains a minimum number of elements of the feeder path. It has convenient for practical implementation design.

Keywords: the integrity of radio navigation information, GRM, omnidirectional dipole antenna, unmanned aerial vehicle, mini UAV.

Введение

Одним из основных факторов обеспечения безопасности полетов воздушных судов на критических этапах захода на посадку и посадки является (наряду с непрерывностью обслуживания) целостность информации, создаваемой в пространстве курсовым и глиссадным радиомаяками (КРМ и ГРМ) инструментальной системы посадки (ILS) [1]. По определению Международной Организации Гражданской Авиации (ИКАО) целостность – это качество ILS, соответствующее степени уверенности в том, что обеспечиваемая данным средством информация является правильной.

Целостность необходима для обеспечения того, чтобы воздушное судно, осуществляющее заход на посадку, имело малую вероятность неправильного наведения.

Подсчет целостности (I) ILS выполняется путем определения вероятности (P) передачи необнаруженного излучения неправильного сигнала: $I = 1 - P$.

Признается, что среднее количество P_c авиационных происшествий со смертельным исходом во время посадки по причине выхо-

да из строя систем в целом или недостатков в ней, куда входит наземное оборудование, воздушное судно и пилот, не должно превышать показатель $P_c = 1 \times 10^{-7}$ [1]. Этот критерий часто называют общим показателем риска. Целостность включает способность системы обеспечить пользователя своевременными и обоснованными предупреждениями.

Нарушение целостности информации может произойти, если выход сигнала за пределы допустимого отклонения либо не опознается контрольным оборудованием, либо цепи контрольного оборудования не могут исключить излучение неправильного сигнала; подобное нарушение, если оно вызывает большую погрешность, может привести к опасной ситуации.

Контрольные устройства, выполняющие постоянный мониторинг излучаемого сигнала в эфире, устанавливаются в точках в ближней зоне действия радиомаяков. Поэтому необходимы тщательные летные и наземные обследования в периодические интервалы времени для обеспечения гарантии целостности информационного сигнала в эфире во всей зоне действия.

Курсовой и глиссадный радиомаяки для подтверждения выходных характеристик при вводе в эксплуатацию, периодически в процессе их эксплуатации и в некоторых специальных случаях подвергаются лётным проверкам. Для целей лётных проверок наземных средств радиотехнического обеспечения полетов используется специальный самолёт-лаборатория, на котором установлены измерительные приёмники [2].

Однако, известен другой способ лётной проверки наземных средств радиотехнического обеспечения полётов, решающий задачу повышения оперативности проверок радиомаяков, снижающий затраты на выполнение проверок. Упомянутый другой способ заключается в том, что в качестве воздушного судна для лётной проверки применяют дистанционно пилотируемый летательный аппарат (ДПЛА) [3].

Для приёма сигналов курсового и глиссадного радиомаяков на борту ДПЛА категории Мини [4], например, квадрокоптера, требуется легкая антенна с круговой диаграммой направленности в горизонтальной плоскости с горизонтальной поляризацией поля излучения (в плоскости вектора E). Настоящая статья посвящена исследованиям, направленным на создание требуемой антенны.

Как известно, подобная антенна требуется при решении и других технических задач. Существует несколько способов получить круговую диаграмму направленности антенны в горизонтальной плоскости. Примером может служить турникетная антенна, состоящая из двух взаимно перпендикулярных полуволновых или петлевых диполей с токами в диполях сдвинутыми между собой на 90 градусов. Первая турникетная антенна была изобретена G. H. Brown в 1935 году [5].

В работах [6-16] представлены способы обеспечения круговой диаграммы направленности за счет использования пространственной антенной решётки излучающих элементов. Однако, такие антенны громоздки, имеют большой вес.

Другой способ — использование рамочных антенн, обладающих малыми габаритами в сравнении с длиной волны на центральной частоте. При этом рамочные антенны имеют существенный недостаток — узкую полосу согласования с фидером [17].

Существенно более простой конструкцией обладает угловой диполь, изобретенный P.S. Carter в 1938 г. [18]. Отличие ДН от окружности составляет ± 3 дБ.

В настоящей работе представлены результаты исследований дипольной антенны с горизонтальной поляризацией поля излучения с круговой диаграммой направленности в горизонтальной плоскости, предназначенной для установки на беспилотный летательный аппарат категории Мини-БПЛА.

Постановка задачи

Поставим своей задачей создать антенну на основе диполя Герца. Вибраторная антенна (вибратор или говорят диполь Герца) известна со времени открытия в 1888 г. Генрихом Герцем электромагнитных волн и экспериментального подтверждения теории Джеймса Максвелла [19, 20]. Вибратор Герца представлял собой совершенно прямую медную проволоку, длиной 2,0 м и толщиной 5 мм. В середине проволока была разрезана с образованием двух плеч и зазора между ними для введения в зазор возбуждающего искрового промежутка. Два маленьких металлических шарика были насажены непосредственно на проволоку на концах, примыкающих к зазору, и соединены с полюсами индукционной катушки. Между шариками происходил электрический разряд. На противоположных концах проволоки были расположены два шара диаметром 30 см, изготовленные из толстого цинкового листа.

Диаграмма направленности (ДН) диполя Герца в свободном пространстве имеет вид тороида, ось которого направлена вдоль оси диполя. ДН диполя Герца, расположенного в горизонтальной плоскости, имеет в горизонтальной плоскости (в плоскости вектора E) вид восьмёрки с нулевыми уровнями, направленными вдоль оси диполя.

В связи с применением в телевизионном вещании волн горизонтальной поляризации появилась потребность в антенне с горизонтальной поляризацией со всенаправленной ДН в горизонтальной плоскости с целью приёма телевизионных сигналов от нескольких разнесённых в пространстве телевизионных станций. При этом под всенаправленной диаграммой направленности в горизонтальной плоскости подразумевается ДН, в которой уровни минимумов в известной мере высоки. Для обеспечения всенаправленного приёма P.S. Carter в 1938 г. предложил диполь, плечи которого в горизонтальной плоскости расположены под углом 90° относительно друг друга [18]. ДН полуволнового углового диполя имеет неравномерность ± 3 дБ. Во многих практических случаях это слишком большая

неравномерность. С целью снижения отличия формы ДН от круга в данной работе предложено выполнить плечи диполя в виде прописной буквы Г.

Интуитивно понятно, что изгиб плеч диполя приведёт к “заплыванию” нулевого уровня в ДН в направлении исходной оси диполя. Естественно стремление получить при этом ДН без нулевых уровней в других направлениях. В той плоскости, в которой выполнен изгиб плеч диполя, необходимо получить ДН, близкую по форме к круговой.

Будем полагать, что общая длина диполя близка к половине длины волны. Диаметр проводников плеч диполя много меньше длины волны. Диполь возбуждается в его центре, в зазоре. При этом для компенсации реактивной составляющей входного сопротивления диполя применён согласующий отрезок фидера. Материал проводников диполя — идеально проводящий. Исследуем влияние геометрии плеч диполя и величины зазора между плечами на формирование диаграммы направленности антенны.

Физическая модель

Исследуемая симметричная вибраторная антенна представляет собой полуволновый

диполь, плечи которого имеют изгиб в некоторой плоскости. Антенна возбуждается в зазоре между плечами диполя источником, включенным последовательно с согласующим устройством в виде отрезка коаксиальной линии передачи. С плечами вибратора соединён также отрезок короткозамкнутой двухпроводной линии. Длина двухпроводной линии равна четверти длины волны на средней рабочей частоте. Короткозамкнутый четвертьволновый отрезок двухпроводной линии выполняет роль симметрирующего устройства. Предполагается, что диполь и симметрирующее устройство выполнены из цилиндрических проводников, радиусы цилиндров которых много меньше длины волны. Все проводники выполнены из идеально проводящего материала. Антенна расположена в свободном пространстве. Возбуждающая мощность к антенне подводится с помощью коаксиального кабеля.

Конструкция антенны

В макете дипольной антенны с зазором (рис.1) каждое плечо диполя состоит из двух частей: основной (исходной) части и ортогональной части.

Части плеча расположены по отношению

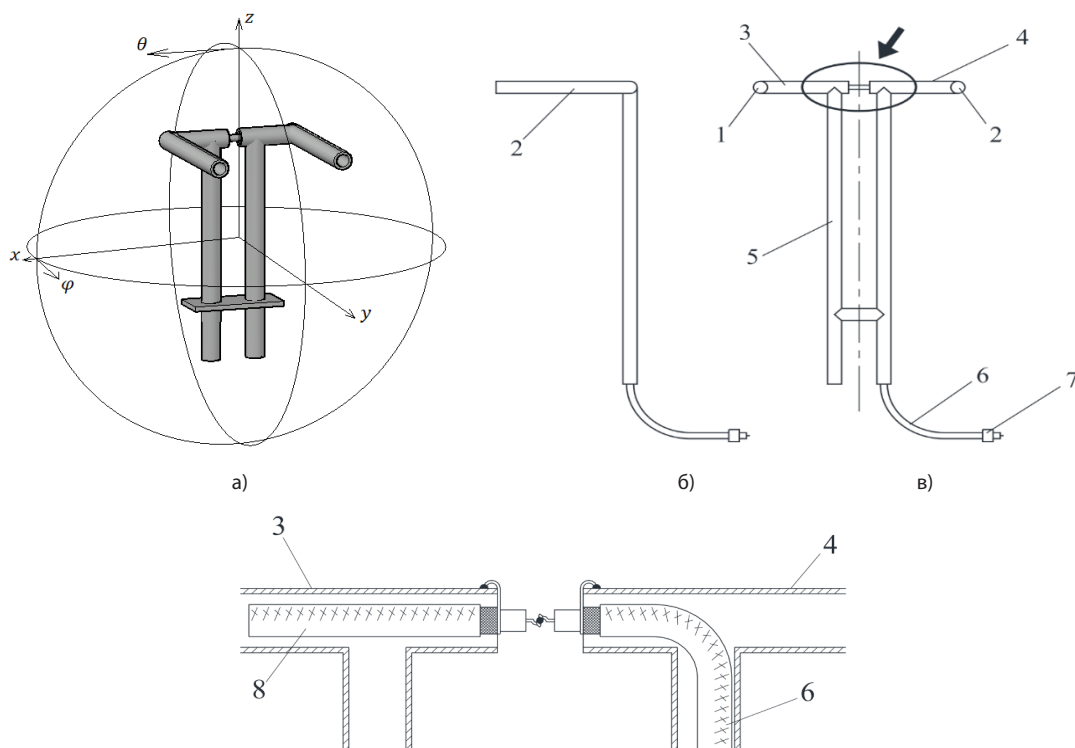


Рис. 1. Конструкция антенны; а) вид в изометрии и система координат,

б) вид сбоку, в) фронтальный вид, г) вид по стрелке;

1, 2 — ортогональная часть диполя, 3, 4 — исходная часть диполя, 5 — плечи симметрирующего устройства, 6 — коаксиальный кабель, 7 — соединитель радиочастотный, 8 — согласующий отрезок кабеля.

друг к другу под углом равным 90° . По форме одно плечо имеет вид прописной буквы Г, а второе имеет вид её зеркального отражения. Буква Г и её зеркальное отражение направлены к центру (к зазору) диполя своей верхней (горизонтальной) частью. Буква Г и её зеркальное отражение лежат в одной и той же плоскости и совместно формируют П-образный диполь с зазором. Для исключения антенного эффекта фидера в антенне использовано симметрирующее устройство, представляющее собой четвертьволновый отрезок двухпроводной линии передачи с режимом короткого замыкания на конце. Плечи симметрирующего устройства перпендикулярны к плоскости, в которой лежит диполь. Плечи диполя и плечи симметрирующего устройства выполнены из поллой трубки с внешним диаметром 8 мм. В качестве фидера антенны применён коаксиальный кабель РК-50-2-11 с соединителем радиочастотном на одном конце. Коаксиальный кабель проложен внутри трубки одного из плеч симметрирующего устройства, далее проложен внутри одного из плеч диполя в сторону зазора между плечами. На выходе из плеча, в зазоре, внешний проводник коаксиального кабеля имеет гальванический контакт с плечом. Центральный проводник проложен через зазор между плечами и соединён с центральным проводником согласующего отрезка кабеля, расположенном во втором плече. Внешний проводник согласующего отрезка кабеля имеет в зазоре гальванический контакт со вторым плечом диполя. Второй, холостой, конец согласующего отрезка кабеля ни с чем не соединён.

Согласующий отрезок коаксиальной линии с режимом холостого хода на конце применён для компенсации индуктивной части входного сопротивления антенны. При этом ёмкостная составляющая указанного согласующего отрезка может быть рассчитана по формулам:

$$\dot{Z} = -jZ_0 \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda}l\right), \quad (1)$$

$$C = -\frac{1}{j\omega\dot{Z}}, \quad (2)$$

где: $\dot{Z}$ — входное сопротивление согласующего отрезка коаксиальной линии с режимом холостого хода на конце;

Z_0 — волновое сопротивление согласующего отрезка коаксиальной линии;

λ — длина волны;

ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика согласующего отрезка;

l — длина согласующего отрезка коаксиальной линии передачи с режимом холостого хода на конце;

C — ёмкостная составляющая согласующего отрезка коаксиальной линии передачи с режимом холостого хода на конце;

ω — круговая частота.

Методы исследования

Воспользуемся двумя теоретическими методами решения поставленной задачи. Во-первых, воспользуемся методом решения интегрального уравнения относительно тока в проводниках диполя в тонкопроволочном приближении [21,22].

Во-вторых, в последующих работах используем широко известное решение краевой задачи в строгой дифракционной постановке прямыми численными методами. В строгой дифракционной постановке краевая электродинамическая задача, сформулированная для непрерывного континуума, редуцируется к проекционно-сеточной модели. Сеточная модель строится с надлежащим выбором базисных и пробных функций, удовлетворяющих граничным условиям, условиям полноты и ортогональности, условиям излучения и условиям Мейкснера. Единственность решения и минимум невязки решения в выбранном конечномерном пространстве базисных функций гарантируется проекционным методом решения дифракционной задачи.

В отношении первого решения заметим следующее. Исследуемая антенна представляет собой конструкцию из совокупности цилиндрических проводников, диаметр которых много меньше длины волны, а продольный размер велик по сравнению с диаметром проводников. Это обстоятельство позволяет при решении задачи использовать тонкопроволочное приближение. Для создания математической модели антенны воспользуемся теоремой взаимности в интегральной форме:

$$\int_V \vec{j}_1 \vec{E}_2 dV = \int_V \vec{j}_2 \vec{E}_1 dV \quad (3)$$

где $\vec{E}_1, \vec{E}_2$ — напряжённости электрических полей, удовлетворяющих принципу излучения на бесконечности и создаваемые независимыми друг от друга сторонними токами проводимости $\vec{j}_1, \vec{j}_2$, соответственно;

V — некоторый произвольный объём, в котором расположены источники $\vec{j}_1, \vec{j}_2$.

Исследуемая антенна представлена совокупностью N диполей, называемых «истинными источниками», с неизвестными комплексными амплитудами тока, для определения которых вводится в рассмотрение N «пробных» диполей. Рассмотрено взаимодействие двух линейных электрических источников, «истинного» и «пробного», расположенных в ближней зоне. Связь между пробным и истинным источниками определена с помощью взаимного сопротивления. Полученные результаты обобщаются на систему N электрически коротких «истинных» диполей, имеющих синусоидальное распределение тока, электромагнитно связанных с N «пробными» диполями. Каждый из диполей анализируемой антенны образован из двух соседних сегментов, на которые разбиты проводники антенны. При этом плечи соседних диполей перекрываются, что позволяет аппроксимировать распределённый вдоль антенны ток с достаточно хорошим приближением.

Далее составлена система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), решаемая относительно амплитуд токов в данных диполях, являющихся коэффициентами кусочно-синусоидальной аппроксимации функции распределения тока вдоль проводников анализируемой антенны. На основе найденного распределения тока определяются входной импеданс и ДН антенны.

Описанная выше методика аналогична известному методу Ричмонда анализа проводочных антенн. Методика включает три основных этапа:

1) разбиение проводников антенны на электрически короткие сегменты, из которых составляются диполи; задание возбуждения в виде вектора $[V]$, элементы которого соответствуют значениям напряжений источников диполей;

2) составление матрицы $[Z]$ взаимных сопротивлений «истинных» и «пробных» диполей, элементы которой для m -го «пробного» и n -го «истинного» диполей вычисляются по формуле:

$$Z_{mn} = - \int_{l_{n-1}}^{l_n} \frac{\sin k(l_n - l)}{\sin kd_{n-1}} \vec{h}_{n-1} \vec{E}_m dl - \int_{l_n}^{l_{n+1}} \frac{\sin k(l - l_n)}{\sin kd_n} \vec{h}_n \vec{E}_m dl, \quad (4)$$

где l — координата вдоль оси сегмента;

l_n — продольная координата стыка n -1-го и n -го сегментов;

k — волновое число;

d_{n-1} и d_n — длины сегментов с номерами $n-1$ и n соответственно;

$\vec{h}_{n-1}$ и $\vec{h}_n$ — касательные орты соответствующих сегментов, направлены в сторону положительного направления тока;

$\vec{E}_m$ — напряженность электрического поля в точке интегрирования, создаваемая m -ым «пробным» диполем;

3) решение СЛАУ относительно комплексных амплитуд функции, аппроксимирующей токовую функцию, в виде вектора $[I]$:

$$[V] = [Z][I] \quad (5)$$

Для реализации данного метода найдены соотношения для вычисления напряжённости электрического поля диполя с синусоидальным распределением тока, первое плечо которого имеет длину d_1 , второе — d_2 , а угол между плечами отличается от 180° на величину α (рис. 2). Поле определяется в точке наблюдения $M(\rho, \theta, z_m)$. Решение найдено на основе уравнений Максвелла с помощью метода запаздывающего векторного электрического потенциала.

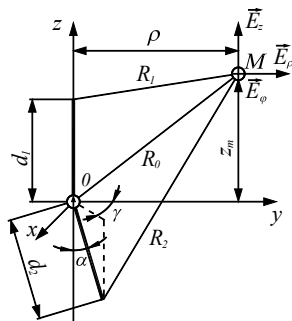


Рис. 2. Расположение диполя в цилиндрической системе координат

Электрическое поле $\vec{E}_m = \vec{E}(E_z, E_\rho, E_\phi)$ такого диполя в цилиндрической системе координат определяется соотношениями:

$$E_z = E_{||}^{(1)} + E_{||}^{(2)} \cos \alpha + E_{\perp}^{(2)} \sin \alpha \quad (6)$$

$$E_\rho = E_\rho^{(1)} + E_{||}^{(2)} \sin \alpha \cos \gamma + E_{\perp}^{(2)} \cos \alpha \cos \gamma \quad (7)$$

$$E_\phi = -E_{||}^{(2)} \sin \alpha \sin \gamma - E_{\perp}^{(2)} \cos \alpha \sin \gamma, \quad (8)$$

где

$$E_{||}^{(1)} = \frac{-iWl_0}{4\pi \sin kd_1} \left\{ \frac{e^{-ikR_1}}{R_1} - \frac{e^{-ikR_0}}{R_0} \cos kd_1 - \frac{e^{-ikR_0}}{R_0} \frac{\sin kd_1}{k} \left(ik + \frac{1}{R_0} \right) \frac{z_m}{R_0} \right\} \quad (9)$$

$$E_{\perp}^{(1)} = \frac{iWl_0}{4\pi \rho \sin kd_1} \left\{ \frac{\sin kd_1}{k} \frac{e^{-ikR_0}}{R_0} - \frac{z_m^2}{R_0^2} \frac{\sin kd_1}{k} e^{-ikR_0} \left(ik + \frac{1}{R_0} \right) + \frac{z_m - d_1}{R_1} e^{-ikR_1} - \frac{z_m}{R_0} \cos kd_1 e^{-ikR_0} \right\}, \quad (10)$$

$$E_{||}^{(2)} = \frac{-iWl_0}{4\pi \sin kd_2} \left\{ \frac{\sin kd_2}{k R_0^2} e^{-ikR_0} \left(ik + \frac{1}{R_0} \right) z_m - \frac{e^{-ikR_0}}{R_0} \cos kd_2 + \frac{e^{-ikR_2}}{R_2} \right\} \quad (11)$$

$$E_{\perp}^{(2)} = \frac{iWl_0}{4\pi \rho \sin kd_2} \left\{ -\frac{\sin kd_2}{k} \frac{e^{-ikR_0}}{R_0} + \frac{z_m^2}{R_0^2} \frac{\sin kd_2}{k} e^{-ikR_0} \left(ik + \frac{1}{R_0} \right) + \frac{z_m + d_2}{R_2} e^{-ikR_2} - \frac{z_m}{R_0} \cos kd_2 e^{-ikR_0} \right\}, \quad (12)$$

$$R_0 = \sqrt{\rho^2 + z_m^2}; \quad (13)$$

$$R_1 = \sqrt{\rho^2 + (z_m - d_1)^2} \quad (14)$$

$$R_2 = \sqrt{(\rho - d_2 \sin \alpha \cos \gamma)^2 + (z_m + d_2 \cos \alpha)^2 + (d_2 \sin \alpha \sin \gamma)^2} \quad (15)$$

γ — угол между проекцией второго плеча диполя на плоскость xOy и осью Oy ;

W — волновое сопротивление среды;

I_0 — амплитуда тока в диполе.

Оба решения реализованы в виде программ на ЭВМ и использованы для численных исследований.

Результаты численных исследований

Введём буквенные обозначения элементов антенны. Обозначим буквой А исходную (до изгиба) часть плеча, буквой В — загнутую часть плеча диполя. Буквой L_1 обозначим длину симметрирующего устройства, D — расстояние между трубками СУ, R_1 — радиус трубок плеч диполя, R_2 — радиус труб симметрирующего устройства, L_2 — длина согласующего отрезка кабеля. На рис. 3, в качестве примера, представлено распределение тока вдоль плеч диполя, плеч и короткозамыкателя симметрирующего устройства, на проводниках, продолжающих плечи СУ. Распределение тока на

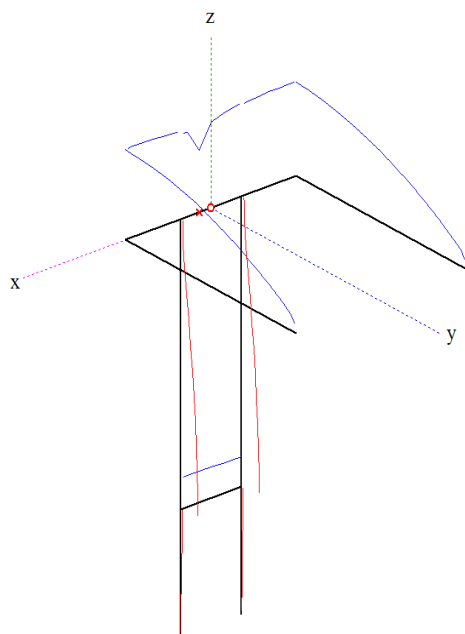


Рис. 3. Распределение тока на излучающих и конструктивных элементах антенны на частоте 954 МГц.

$A=56$ мм, $B=68$ мм, $L_1=76$ мм, $D=20$ мм, $R_1=4$ мм, $R_2=4$ мм, $L_2=14.5$ мм.

Общая длина вибратора 192 мм.

№ варианта	1	2	3	4	5	Угловой вибратор
Длина средней части (А), мм	36	46	56	66	76	—
Длина загнутой части (В), мм	78	73	68	63	58	78
Максимальное отклонение ДН от окружности, %	14	7,4	2,4	8,5	16	42
Максимальное отклонение ДН от окружности, дБ	1,1	0,62	0,2	0,71	1,3	3,1

участке В от кончика плеча до изгиба на каждом плече диполя имеет характер стоячей волны. На участке А от изгиба до точки подключения к плечу диполя плеча СУ распределение тока соответствует распределению смешанной волны. Вдоль плеч СУ и на короткозамыкателе распределение тока близко к стоячей волне тока. Отличие от нулевого значения тока на входе СУ объясняется тем фактом, что СУ является отрезком открытой линии передачи, частично излучающей электромагнитные волны в окружающее пространство.

Ток на проводниках, продолжающих плечи СУ, пренебрежимо мал.

Рассмотрено несколько вариантов антенн. Диаграммы направленности (ДН) антенн в декартовой системе координат представлены на рис. 4. Наилучшие характеристики ДН получены при следующих размерах элементов антенны:

Экспериментальные результаты

Антенна для установки на квадрокоптер для измерения характеристик ПРМГ в сумме с кабелем и соединителем радиочастотным весит 87,2 грамма. В том числе: антенна 35,2 грамм, кабель РК-50-2-12 длиной 75 см 12 грамм, соединитель радиочастотный СР-50-135ПВ 40 гр. Экспериментальное исследование основных электродинамических параметров всенаправленной дипольной антенны выполнено в лаборатории каф. КиПР ЮУрГУ. В качестве измерительного оборудования использовался векторный анализатор цепей ОБЗОР-103. В качестве передающей антенны использована рупорная антенна глассадного радиомаяка.

На рис 6. Представлено фото антенны с диэлектрическим обтекателем, защищающим область возбуждения антенны от воздействия дождя и снега.

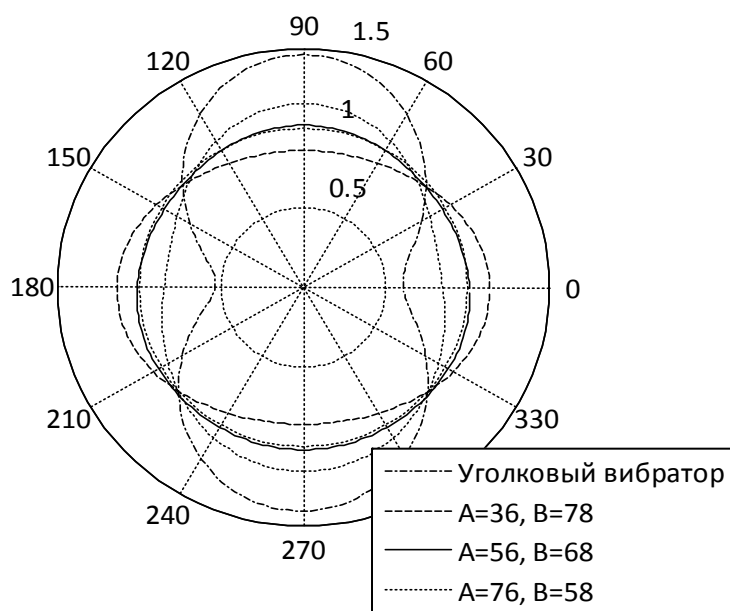
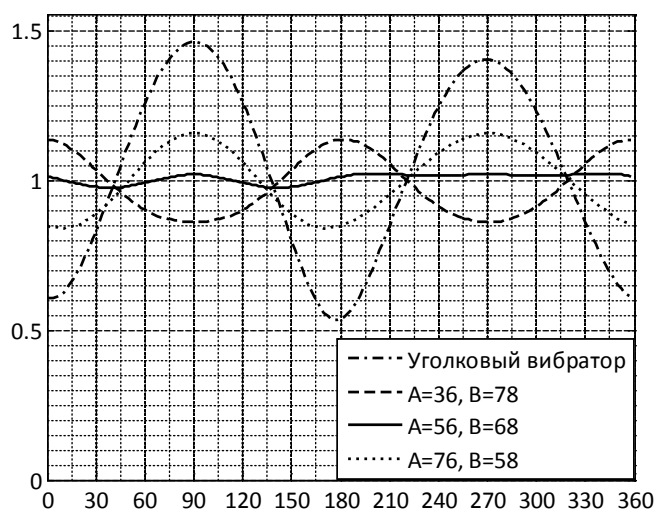
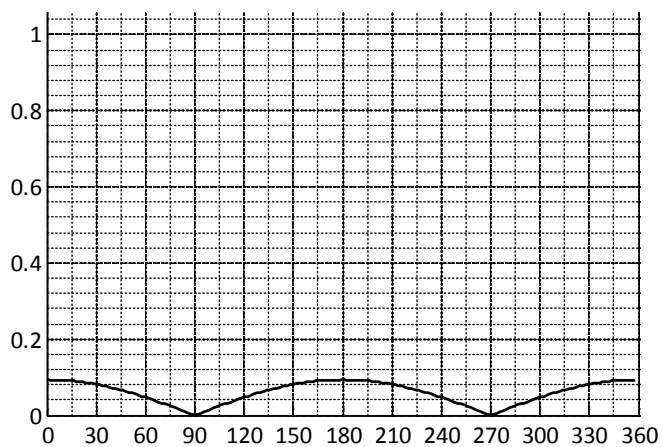


Рис. 4. Диаграммы направленности горизонтальной составляющей поля излучения диполя с плечами Г-образной формы в горизонтальной плоскости.



а)

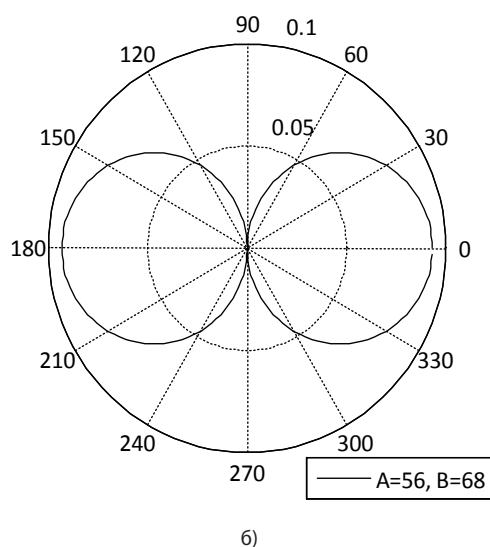


Рис.5. Диаграмма направленности антенны в горизонтальной плоскости для вертикальной составляющей (кросс-компоненты) напряжённости электрического поля ($A=56$, $B=68$ мм); а) в декартовой системе координат, б) в полярной системе координат

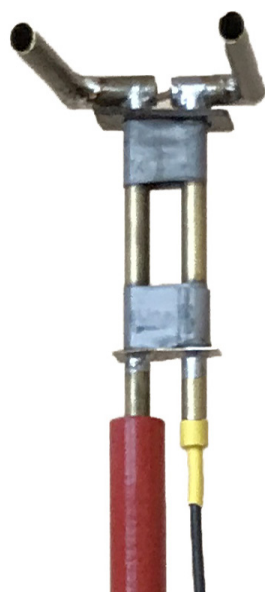


Рис.6. Фото макета антенны

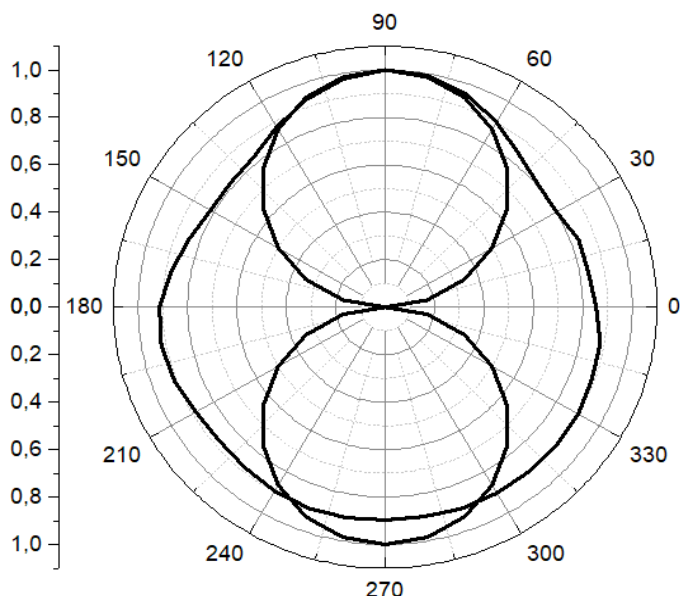


Рис.7. Диаграммы направленности макета антенны и классического диполя на частоте 1000 МГц

На рис.7 представлена диаграмма направленности в Е-плоскости на частоте 1000 МГц макета всенаправленной дипольной антенны и классического диполя (в виде восьмёрки).

Уровень отклонения диаграммы направленности от окружности равен $\pm 0,1$ (минус 20 дБ).

Обсуждение

Как указывалось выше, диполь Герца, будучи расположенным в горизонтальной плоскости, имеет в горизонтальной плоскости (в

плоскости вектора E) вид восьмёрки, с нулевыми уровнями, направленными вдоль оси диполя. Диполь, предложенный P.S. Carter, плечи которого в горизонтальной плоскости расположены под углом 90° относительно друг друга имеет неравномерность ± 3 дБ. Для ряда применений антенны с горизонтальной поляризацией это слишком большая величина. С целью снижения отличия формы ДН от круга в данной работе предложено выполнить плечи диполя в виде прописной буквы Г. На рис.4 представлены ДН для диполей с

плечами Г-образной формы, отличающихся друг от друга точкой, в которой выполнен поворот проводника на 90° .

Как видно из рассмотрения, наилучшей формой ДН обладает диполь, у которого участок диполя от центра диполя до поворота на 90° составляет долю, равную 0,41 длины плеча диполя. Такое соотношение частей плеча диполя естественна, поскольку токи, текущие по прилегающей к центру части плеча больше, чем токи, текущие по периферийной части плеча.

Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости для кроссполаризационной (вертикальной) составляющей напряжённости электрического поля (рис.5) имеет вид восьмёрки. Нулевые уровни ДН направлены перпендикулярно к плоскости, в которой лежат плечи симметрирующего устройства, а максимальные уровни — в плоскости плеч СУ. Форма ДН для вертикальной составляющей свидетельствует о том, что излучение вертикальной компоненты поля обусловлено противофазными токами, текущими по плечам СУ в противоположных направлениях.

На рис. 3 представлено распределение тока на излучающих и конструктивных элементах антенны. Следует отметить принципиальное отличие в распределении тока на плечах прямолинейного диполя и плечах диполя с 90° изгибом плеч. В плечах классического

прямолинейного диполя распределение имеет вид стоячей волны тока. В плечах диполя с изгибом распределение имеет вид стоячей волны тока на ортогональной части плеча и вид смешанной волны на основной (исходной) части плеча.

Выводы

Выбором сечений поворота каждого плеча вибратора на 90° градусов относительно неизменной части плеча возможно создать антенну с диаграммой направленности, близкой к круговой, в плоскости вектора Е.

Теоретически достижимое отклонение формы диаграммы направленности от окружности составляет величину $\pm 0,2$ дБ.

Антенна конструктивно проста, обеспечивает удобное подключение фидера и предотвращает проявление антенного эффекта фидера за счет введения в конструкцию антенны симметрирующего устройства.

Антенна полезна для приёма сигналов курсо-глиссадных радиомаяков с целью подтверждения целостности системы посадки воздушных судов.

Целесообразно продолжить исследование характеристик данной антенны с целью обеспечения согласования её с линией питания и экспериментальные исследования.

Благодарности

Авторы выражают свою благодарность Фомину Д.Г. за его вклад в разработку макета антенны.

Литература

1. Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation. Vol. 1. Radio Navigation Aids. Monreal (Canada), ICAO, 2006. 616 p.
2. Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation. Aeronautical Telecommunications. Vol. 1. Radio Navigation Aids. 7th ed., Montreal (Canada), ICAO, 2018
3. Войтович Н. И., Жданов Б. В. Способ лётных проверок наземных средств радиотехнического обеспечения полётов и устройства для его применения. Патент РФ на изобретение № 2 501 031 С2 заявка 2011133133 от 05.08.2011. Опубликовано: 10.12.2013. Бюл. №34.
4. Фетисов В.С., Неугодникова Л.М., Адамовский В.В., Краснощёков Р.А. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние. Под ред. В.С. Фетисова. Уфа: ФОТОН, 2014. – 217 с.
5. G.H. Brown, "The Turnstile Antenna", Electronics, April 1936, pp. 14-17.
6. Справочник по антенной технике: Справ. В 5 т. Т.1/Л.Д. Бахрах, Л.С. Бененсон, Е.Г. Зелкин и др; Под ред. Я.Н. Фельда, Е.Г.Зелкина. – М.: ИПРЖР, 1997.
7. X.L. Quan, and R.L. Li, "A broadband dual-polarized omnidirectional antenna for base stations", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 61, no. 2, pp. 943–947, Feb. 2013.
8. K. Wei, Z. Zhang, Z. Feng et al., "A MNG-TL loop antenna array with horizontally polarized omnidirectional patterns", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 60, no. 6, pp. 2702-2710, 2012.
9. Z. D. Wang, Y. Z. Yin, X. Yang, J. J. Wu, "Design of a wideband horizontally polarized omnidirectional antenna with mutual coupling method", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 63, no. 7, pp. 3311-3316, Jul. 2015.
10. Shixian Chen, Yufa Sun, Dong Zhou, "A wideband omnidirectional horizontally polarized antenna

for wireless applications", *Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT) 2016 IEEE International Conference on*, vol. 2, pp. 713-715, 2016.

11. Hatim Bukhari, Kamal Sarabandi, "Miniaturized omnidirectional horizontally polarized antenna", *IEEE Trans. On Antennas Propag.*, vol. 63, no. 10, pp. 4280-4285, Oct. 2015.

12. G. Jiang, C. Guo, "A broadband horizontally polarized omnidirectional antenna array consisting of four corrugated TSA elements", *2016 CIE International Conference on Radar*, pp. 1-5, October 2016.

13. H. Liu, Y. Liu, W. Zhang, S. Gao, "An ultra-wideband horizontally polarized omnidirectional circular connected Vivaldi antenna array", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 8, pp. 4351-4356, August 2017.

14. C.A. Balanis, *Antenna theory analysis and design*, New Jersey, 2005. – 1070 p.

15. R. E. Collin, *Antennas and Radiowave Propagation*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1985.

16. Peng Luo, Yuehui Cui, RongLin Li, "Novel multiband/broadband horizontally polarized omnidirectional antennas", *Antennas and Propagation (APSURSI) 2016 IEEE International Symposium on*, pp. 1795-1796, 2016.

17. Фомин Д.Г., Войтович Н.И. Магнитный датчик контроля АФР антенны. Труды 28 международной конференции "Микроволны и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2018)" Севастополь, сентябрь 9-15, 2018.

18. Carter, P.S.: "Wide band antenna", US patent № 2258406, 1938 г.

19. H. Hertz. Über sehrschnellelektrische Schwingungen. *Wied. Ann.*, 31, 421, 1887.

20. Герц Г.Р. 50 лет волн Герца (сборник избранных работ Г. Герца. Под ред. Аркадьева В.К.). М.-Л.: АН СССР, 1938.

21. Бузов А.Л., Сподобаев Ю.М., Филиппов Д.В. Юдин В.В. Электродинамические методы анализа проволочных антенн. М.: Радио и связь. – 2000, - 153 с.

22. Ершов А.В. Широкополосная вибраторная антенна для многоканального радиовещания. Кандидатская диссертация. Челябинск.: ЮУрГУ. – 2004.

References

1. Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation. Vol. 1. Radio Navigation Aids. Monreal (Canada), ICAO, 2006. 616 p.

2. Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation. Aeronautical Telecommunications. Vol. 1. Radio Navigation Aids. 7th ed., Montreal (Canada), ICAO, 2018

3. Voytovich N. I., Zhdanov B. V. Sposob lyotny'x proverok nazemny'x sredstv radiotekhnicheskogo obespecheniya polyotov i ustrojstva dlya ego primeneniya. Patent RF na izobretenie № 2 501 031 S2 pozayavke 2011133133 ot 05.08.2011. Opublikovano: 10.12.2013. Byul. №34.

4. Fetisov V.S., Neugodnikova L.M., Adamovskij V.V., Krasnopyorov R.A. Bespilotnaya aviatsiya: terminologiya, klassifikatsiya, sovremennoe sostoyanie. Pod red. V.S. Fetisova. Ufa: FOTON, 2014. – 217 s.

5. G.H. Brown, "The Turnstile Antenna", *Electronics*, April 1936, pp. 14-17.

6. Spravochnik po antennoj tekhnike: Sprav. V 5 t. T.1/L.D. Baxrax, L.S. Benenson, E.G. Zelkin i dr; Pod red. Ya.N. Fel'da, E.G.Zelkina. – M.: IPRZhR, 1997.

7. X.L. Quan, and R.L. Li, "A broadband dual-polarized omnidirectional antenna for base stations", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 2, pp. 943–947, Feb. 2013.

8. K. Wei, Z. Zhang, Z. Feng et al., "A MNG-TL loop antenna array with horizontally polarized omnidirectional patterns", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 6, pp. 2702-2710, 2012.

9. Z. D. Wang, Y. Z. Yin, X. Yang, J. J. Wu, "Design of a wideband horizontally polarized omnidirectional antenna with mutual coupling method", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 63, no. 7, pp. 3311-3316, Jul. 2015.

10. Shixian Chen, Yufa Sun, Dong Zhou, "A wideband omnidirectional horizontally polarized antenna for wireless applications", *Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT) 2016 IEEE International Conference on*, vol. 2, pp. 713-715, 2016.

11. Hatim Bukhari, Kamal Sarabandi, "Miniaturized omnidirectional horizontally polarized antenna", *IEEE Trans. On Antennas Propag.*, vol. 63, no. 10, pp. 4280-4285, Oct. 2015.

12. G. Jiang, C. Guo, "A broadband horizontally polarized omnidirectional antenna array consisting of four corrugated TSA elements", *2016 CIE International Conference on Radar*, pp. 1-5, October 2016.

13. H. Liu, Y. Liu, W. Zhang, S. Gao, "An ultra-wideband horizontally polarized omnidirectional circular connected Vivaldi antenna array", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 8, pp. 4351-4356, August 2017.

14. C.A. Balanis, Antenna theory analysis and design, New Jersey, 2005. – 1070 p.
15. R. E. Collin, Antennas and Radiowave Propagation. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1985.
16. Peng Luo, Yuehui Cui, RongLin Li, "Novel multiband/broadband horizontally polarized omnidirectional antennas", Antennas and Propagation (APSURSI) 2016 IEEE International Symposium on, pp. 1795-1796, 2016.
17. Fomin D.G., Voytovich N.I. Magnitny'j datchik kontrolya AFR antennoy. Trudy' 28 mezhdunarodnoy konferencii "Mikrovolny' i telekommunikacionny'e tekhnologii (Kry'MiKo 2018)" Sevastopol', sentyabr' 9-15, 2018.
18. Carter, P.S.: "Wide band antenna", US patent № 2258406, 1938.
19. H. Hertz. Uber sehrschnellelektrischeSchwingungen. Wied. Ann., 31, 421, 1887.
20. Gerc G.R. 50 let voln Gerca (sbornik izbranny'x rabot G. Gerca. Pod red. Arkad'eva V.K.). M.-L.: AN SSSR, 1938.
21. Buzov A.L., Spodobae Yu.M., Filippov D.V. Yudin V.V. E'lektrodinamicheskie metody' analiza provolochny'x anten. M.: Radio i svyaz'. — 2000, — 153 s.
22. Ershov A.V. Shirokopolosnaya vibratornaya antenna dlya mnogokanal'nogo radioveshaniya. Kandidatskaya dissertaciya. Chelyabinsk.: YuUrGU. – 2004.

ВОЙТОВИЧ Вадим Вадимович, инженер-исследователь, ООО «Конструкторское Бюро «ЭКРАН» имени М.А. Шильмана». 454080, г. Челябинск, ул. Энтузиастов, 26Б. E-mail: vadimka.voytovich@mail.ru

VOYTOVICH Vadim, research engineer, LLC "Design Bureau "EKRAN" named after M.A. Shilman". 26B, Enthusiasts st., Chelyabinsk, Russia, 454080. E-mail: vadimka.voytovich@mail.ru

ПЕТРАШ Юрий Валерьевич, инженер-исследователь, ООО «Конструкторское Бюро «ЭКРАН» имени М.А. Шильмана». 454080, г. Челябинск, ул. Энтузиастов, 26Б. E-mail: yurapetrash111@gmail.com

PETRASH Iyurii, research engineer, LLC "Design Bureau "EKRAN" named after M.A. Shilman". 26B, Enthusiasts st., Chelyabinsk, Russia, 454080. E-mail: yurapetrash111@gmail.com

БЕЛОУСОВ Макар Михайлович, инженер-исследователь, ООО «Конструкторское Бюро «ЭКРАН» имени М.А. Шильмана». 454080, г. Челябинск, ул. Энтузиастов, 26Б. E-mail: makarbel84@gmail.com

BELOUSOV Makar, research engineer, LLC "Design Bureau "EKRAN" named after M.A. Shilman". 26B, Enthusiasts st., Chelyabinsk, Russia, 454080. E-mail: makarbel84@gmail.com

ЮНГАЙТИС Екатерина Михайловна, младший научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76. E-mail: jungaitis92@gmail.ru

IUNGAITIS Ekaterina, junior researcher, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "South Ural State University (National Research University)". 76, Lenin prospect, Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: jungaitis92@gmail.ru

ЕРШОВ Алексей Валентинович, кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76. E-mail: eav@list.ru

ERSHOV Aleksey, PhD in Engineering sciences, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "South Ural State University (National Research University)". 76, Lenin prospect, Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: eav@list.ru

ВОЙТОВИЧ Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, **ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»**. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76. E-mail: voytovichni@mail.ru

VOYTOVICH Nikolay, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Production of Radio Equipment, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "South Ural State University (National Research University)". 76, Lenin prospect, Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: voytovichni@mail.ru