

УДК 621.371.029:621.396.094

© Армизонов Н.Е., Армизонов А.Н.

Armizonov N.E., Armizonov A.N.

**МАГНИТНЫЕ АНТЕННЫ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ – ПУТЬ  
ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА**

**MAGNETIC ANTENNAE WITH ROTATING POLARIZATION AS A WAY  
FOR EFFICIENT USE OF RADIO FREQUENCY SPECTRUM**

*Аннотация.* Предложен технический метод эффективного использования радиочастотного спектра при создании наземных спутниковых и подводных информационных радиотехнических систем различного назначения (связных, навигационных, радиолокационных и сотовых систем связи) путем использования магнитоэлектрических волн, магнитных антенн.

*Abstract.* The technical method of RF spectrum efficient use in ground, satellite, and underwater radio systems (as for communication, navigation, radar, and cellular communication) with application of magnetic antennae and magneto-electric waves.

*Ключевые слова.* Радиочастотный спектр, электромагнитные волны, радиолинии, информационная безопасность, электрические антенны, магнитные антенны

*Keywords.* Radio frequency spectrum, electromagnetic waves, radio links, information security, electric antennae, magnetic antennae

Сегодня все мы – свидетели процесса внедрения новых радиотехнологий, жизненный цикл которых закономерно предопределяется логикой развития научно-технического прогресса в условиях перехода человечества к построению глобального информационного общества. Информация в настоящее время признается наиболее значительным ресурсом, а информационная среда, наряду с социальной и экологической, становится новой средой обитания человека. Человечество вплотную подошло к реализации двух основных задач в области телекоммуникаций: глобализации – вхождению в глобальные информационные структуры – и персонализации – продвижению услуг к каждому пользователю. Процесс формирования глобального информационного общества весьма не прост, он проходит

и будет в дальнейшем проходить на фоне информационных противоречий. Одновременно в связи с быстрым прогрессом радиосвязи, радионавигации, радиовещания и смежных областей все более возрастает нагрузка радиочастотного спектра (РЧС). Множество жизненно важных служб перегружает недостаточное количество радиоканалов, создавая все увеличивающийся уровень возможных помех, а быстрый рост количества пользователей усугубляет нехватку участков радиоспектра, которая остро ощущается в настоящее время.

С другой стороны, несмотря, например, на бурный рост систем сотовой и транкинговой связи, наблюдающийся в городах и на территориях с высокой плотностью населения, значительная часть территории России, в том числе большая часть территории Си-

Армизонов Николай Егорович  
Армизонов Алексей Николаевич  
Armizonov Nikolay E.  
Armizonov Aleksey N.

– ОАО «ИСС им. Академика М.Ф. Решетнева», г. Железногорск, Красноярский край  
– ОАО «ИСС им. Академика М.Ф. Решетнева», г. Железногорск, Красноярский край  
– JSC 'Information Satellite Systems named after Academician M.F. Reshetnev',  
– Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Region .

бири, остаются вне зоны покрытия мобильными системами связи. Основной причиной является экономический фактор – организация мобильной связи оказывается невыгодной на малонаселенных территориях из-за высокой стоимости базовой станции и относительно малой площади обслуживания, обеспечиваемой ею. Таким образом, для территорий с низкой плотностью населения и слабо развитой инфраструктурой задача увеличения площади зон обслуживания мобильных систем связи остается актуальной.

Современные технологии систем мобильной связи базируются на использовании УКВ диапазона частот, главным образом дециметровых волн (300...3000 МГц), что позволяет применять высокие скорости передачи информации, высокоэффективные малоразмерные антенны, реализовать миниатюрные абонентские радиостанции. Вместе с тем, распространение радиоволн УКВ диапазона ограничено пределами прямой видимости. Максимальный радиус зоны обслуживания УКВ зонных систем связи может быть определен из выражения [1]:

$$r_0 = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (1)$$

где  $r_0$  – максимальный радиус зоны обслуживания, км;  $h_1$  – высота поднятия антенны базовой станции, м;  $h_2$  – высота поднятия антенны абонентской станции, м.

Для мобильного исполнения базовой станции высота легких мобильных антенных мачт ограничена величиной  $h_1 = 20...25$  м, что сокращает радиус зоны (для  $h_2 = 20...25$  м) обслуживания до 21...26 км. Из выражения (1) следует, что для обеспечения связи с мобильными абонентами на расстоянии 50 км антенну базовой станции следует поднять на высоту 130...160 м. Подъем антенн на такую высоту требует возведения специальных дорогостоящих стационарных сооружений. Таким образом, организация зонных УКВ систем связи с радиусом зоны обслуживания свыше 20...30 километров достигается технически сложными затратными методами.

Глобальным решением вопроса обеспечения мобильной связью на удаленных и малонаселенных территориях является ис-

пользование спутниковых систем связи. Однако при использовании геостационарных спутников зону устойчивой связи принято ограничивать областью обслуживания по широте не выше  $75^\circ$ , а в условиях города и гористой местности качественный прием сигналов с геостационарных спутников земными станциями, размещенными на малогабаритных объектах, возможен в зонах, ограниченных сверху сорока пятью градусами северной или южной широты [2]. Использование низкоорбитальной спутниковой системы связи обеспечивает полное покрытие территории, но для ее реализации требуется значительное число космических аппаратов (КА). Так, известная система спутниковой связи IRIDIUM использует для глобального обслуживания 66 КА [3].

Спутниковые системы связи имеют достаточно высокую стоимость трафика и абонентской аппаратуры. Так, для уже упоминавшейся системы IRIDIUM минута разговора стоит от двух до 14 долларов, цена одного комплекта оборудования лежит в диапазоне 40...180 тыс. рублей [3].

В последнее время в Европе, США, Японии и России прорабатываются концепции использования аэростатной техники в качестве высотных платформ (HAPs – High Altitude Platforms) [4]. Отметим, что использование высотных платформ является дорогостоящим вариантом решения задачи.

Одним из вариантов увеличения зоны обслуживания является снижение несущих частот в области мириаметровых (ОНЧ) волн 3...30 кГц, километровых (НЧ) волн 30...300 кГц, гектометровых (СЧ) волн 300...3000 кГц и использование механизма распространения сигнала земной волной, что обеспечивает загоризонтное распространение земных радиоволн за счет процессов дифракции и рефракции.

Как известно, развитие радиосвязи и радиовещания начиналось с освоения низкочастотных диапазонов радиоволн, поэтому у многих эти диапазоны ассоциируются с техникой связи прошлого. Однако использование современных технологий связи совместно с уникальными особенностями низкочастотных диапазонов радиоволн позволяет вывести радиосвязь в этом диапазоне на качественно иной уровень.

Радиочастотный ресурс в силу его ограниченности и при постоянно растущем спросе на него играет значительную роль в экономике любого государства. Успех внедрения новых радиотехнологий зависит не только от предоставления пользователям конкурентоспособных услуг, тарифов и широкого выбора пользовательских терминалов, но и от возможности обеспечения их РЧС. Поэтому РЧС должен рассматриваться как ограниченный природный ресурс, который следует благоразумно использовать и заботливо охранять, как это имеет место в отношении минеральных источников сырья, энергии рек или лесных богатств.

Обзор и анализ возможности роста эффективности использования РЧС и повышения информационной безопасности радиоканалов показывает, что радикальные и относительно быстрые методы исправления сложившейся ситуации существуют – это технические методы. Технические методы занимают особое место. Прежде всего, это связано с тем, что, во-первых, они часто применимы без изменения действующих технологий, разрешений, а во-вторых, именно развитие радиотехнологий может привести к коренному пересмотру принципов использования, управления РЧС и защиты радиоканалов от несанкционированного применения.

### Магнитные антенны

**В** радиосистемах антенны выполняют специальную функцию, связывая излученные в пространстве и принятые приемным устройством с электронными компонентами приемо-передающей аппаратуры магнитоэлектрическую и электромагнитную энергии. Поэтому следует подчеркнуть, что антенны являются одними из основных экономических и технических элементов, определяющих построение радиолиний.

При разработке и создании радиотехнических систем различного назначения (локационного, навигационного, связного, включая системы сотовой связи), а также систем различного базирования (наземные, спутниковые, подводные), предлагается технический метод эффективного использования радиочастотного спектра в области

передачи и приема информации с применением магнитоэлектрических волн, магнитных антенн, обеспечивающий высокий энергетический потенциал радиолиний, а следовательно высокую скорость передачи информации и ее помехозащищенность (помехоустойчивость).

В основу принципа работы магнитной антенны положено создание изначально вращающегося переменного магнитного поля, которое затем индуцирует в окружающем ее пространстве переменное электрическое поле. Принцип работы основан на магнитоэлектрической индукции, открытой М. Фарадеем в 1831 году.

В явлении магнитоэлектрической индукции Максвелл увидел факт порождения вихревого электрического поля изменяющимся магнитным полем.

Изначальное возбуждение в антеннах переменным электрическим полем магнитного и, наоборот, переменным магнитным полем электрического образует, соответственно, процессы электромагнитного и магнитоэлектрического излучения.

В первом случае для излучения, приема электромагнитных волн применяются электрические антенны, а во втором для излучения, приема магнитоэлектрических волн применяются магнитные антенны.

Физика, природа распространения магнитоэлектрических и электромагнитных волн в физическом вакууме идентична.

Из курса теоретических основ электротехники известно, что при питании трехфазной кольцевой обмотки трехфазным синусоидальным током в ней возникает вращающееся магнитное поле, которое индуцирует в окружающем ее пространстве переменное электрическое поле. Частота индуцируемого электрического поля, частота излучения  $f_{изл}$  магнитоэлектрического поля кольцевой трехфазной обмоткой определяется частотой питающей трехфазной сети  $f_{пит}$  и числом пар полюсов  $p$  [6]:

$$f_{изл} = 60 f_{пит} / p.$$

Три одинаковые фазовые катушки кольцевой фазовой обмотки магнитной антенны расположены так, что их оси сдвинуты относительно друг друга в пространстве на

угол  $120^\circ$  (рис. 1). Тогда через фазовые катушки будут протекать токи:

$$i_A = I_m \sin \omega t;$$

$$i_B = I_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$i_C = I_m \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right).$$

При пропорциональной зависимости индукций от токов мгновенные значения индукций фаз выразятся следующим образом:

$$B_A = B_m \sin \omega t;$$

$$B_B = B_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$B_C = B_m \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right),$$

где  $B_m$  – амплитуда индукции на оси каждой из катушек,  $\omega$  – угловая скорость,  $t$  – время,  $\pi = 180^\circ$ .

Результирующий вектор индукции определяется сложением векторов  $\vec{B}_A$ ,  $\vec{B}_B$ ,  $\vec{B}_C$ :

$$\vec{B} = -1,5B_m e^{-j\omega t}$$

Изменение направления вращения поля осуществляется изменением чередования фаз.

Линии магнитной индукции замыкаются по воздушному кольцевому зазору магнитной антенны. Место выхода линий индукции можно рассматривать как северный полюс, а место входа как южный полюс магнитного поля кольцевой магнитной антенны.

Кривая распределения индукции  $B$  вдоль воздушного зазора имеет ступенчатую форму, которая может быть приближенно заменена синусоидой.

Обмотки (катушки) трех фаз расположены по кольцу магнитной антенны так, что оси трех пульсирующих магнитных полей сдвинуты в пространстве на  $120^\circ$ . Поэтому при прохождении через обмотки трехфазного тока пульсирующие магнитные поля образуют в сумме двухполюсное вращающееся

в кольцевом зазоре магнитной кольцевой антенны синусоидальное магнитное поле, амплитуда индукции которого постоянна и равна  $3/2$  амплитуды слагающих фазных полей.

За один период переменного тока такое магнитное поле совершит один оборот, а за 1 минуту  $60f_{\text{пит}}$  оборотов.

Если обмотку магнитной кольцевой антенны выполнить многополосной, то три пульсирующих магнитных поля, сдвинутые в пространстве на  $120^\circ/p$ , создадут в результате  $2p$ -полосное вращающееся магнитное поле, имеющее скорость вращения, равную  $60f_{\text{пит}}/p$  оборотов в минуту [6].

В магнитном поле всегда запасена энергия  $W$  [7]:

$$W = \frac{\mu_a}{2} H^2 Al,$$

где  $\mu_a = \mu_0 \mu = B/H$  – абсолютная магнитная проницаемость, характеризующая магнитные свойства среды;  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость,  $H$  – напряженность магнитного поля,  $Al$  – объем однородного магнитного поля  $V$ . Поскольку  $B = \mu_a H$ , то  $W = \frac{BHV}{2}$ .

В природе существуют вещества, способные намагничиваться, которые называются магнетиками. Магнетика, когда они намагничены, создают в окружающем пространстве магнитное поле.

Степень намагниченности магнетика определяется вектором намагничивания  $j$ , который пропорционален вектору напряженности магнитного поля, создаваемого магнетиком.

Магнитная индукция  $B$  – векторная величина, равная среднему значению индукции поля внутри магнетика. Эта величина складывается из индукции поля, создаваемого намагничивающим током ( $\mu_a H$ ), и индукции поля, создаваемого магнетиком ( $4\pi j$ ) [8]:

$$B = \mu_a H + 4\pi j.$$

Связь между вектором намагничивания  $j$  и напряженностью намагничивающего поля определяется выражением  $j = \square H$ , где величина  $\square$ , называемая магнитной восприимчи-

востью, зависит от рода магнетика и его состояния. Так как  $B = \mu_a H$ , то  $\mu = \mu_a + 4\pi l$ . Вещества, у которых  $\mu_a$  намного больше единицы, называют ферромагнетиками.

Под действием вращающегося магнитного поля, обусловленного фазовыми токами, протекающими в фазовых обмотках магнитной антенны, магнитные диполи ферромагнетика ориентируются в направлении поля фазовых обмоток, увеличивая таким образом магнитную индукцию.

С увеличением магнитной индукции магнитной антенны увеличивается соответственно напряженность, энергия магнитного поля антенны.

Важнейшей характеристикой ферромагнетика является значение  $HV/8\pi$ . Эта величина пропорциональна максимальной энергии магнитного поля, окружающего ферромагнетик. Так, например, значение  $HV/8\pi$  для ферромагнетика «сплав магнито...» равно  $190000 \text{ эрг/см}^3$  (52 дБ) [8].

Следовательно, если фазовую кольцевую обмотку разместить на поверхности кольцевого ферромагнетика «сплав магнито...», получим кольцевую (рамочную) магнитную антенну вращающейся поляризации. Увеличение энергии и магнитного поля, создаваемого магнитной антенной, на 52 дБ эквивалентно увеличению коэффициента усиления антенны на 52 дБ или, что то же самое, увеличению мощности передающего устройства.

Согласно принципу взаимности приемных антенн направленные свойства антенн (амплитудные и фазовые характеристики направленности, коэффициенты направленного действия) при их работе в качестве передающих остаются одинаковыми при условии, что приемники и передатчики присоединяются к одним и тем же точкам антенны [9]. Следовательно, использование передающих магнитных рамочных антенн с вращающейся поляризацией в качестве приемных эквивалентно увеличению коэффициента усиления приемной антенны также на 52 дБ или, что то же самое, увеличению чувствительности приемных устройств. В целом, при использовании в радиолиниях в качестве передающих, приемных антенн рамочных магнитных антенн с ферромагнети-

ком энергетический потенциал радиолинии повышается на 100 дБ.

Установлено также, что магнитная проницаемость физического вакуума, которая характеризует магнитные свойства этой среды, равна  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^6 \text{ Гн/м}$ , а электрическая проницаемость, которая в свою очередь характеризует электрические свойства физического вакуума, равна  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ . Чтобы их сопоставить, необходимо выбрать такую систему единиц, при которой Фарада и Генри были бы сопоставимы. Такой системой является система единиц СГС (система Гаусса). В этой системе Фарада и Генри выражаются через единицу длины, а именно:  $1 \text{ Ф} = 9 \cdot 10^9 \text{ м}$ ;  $1 \text{ Гн} = 1 \cdot 10^7 \text{ м}$ .

Подставив эти значения, получим в безразмерных единицах  $\mu_0 = 1257$ , а  $\epsilon_0 = 0,08$ . Сравним их значения, разделив  $\mu_0$  на  $\epsilon_0$ . Получим  $\mu_0/\epsilon_0 = 157$ . Это значит, что для того чтобы добиться такой же эффективности, какую в физическом вакууме дает магнитное поле, надо на два порядка уменьшить расстояние взаимодействия объектов, излучающих, принимающих сопоставимые поля.

Энергопотенциал радиолинии есть величина, показывающая, в какой полосе частот может передаваться информация с требуемым отношением сигнал/шум, то есть с заданным качеством. Применительно к полосе сигнала  $\Delta F$  можно записать,

$$C/N_0 = (C/\Pi)_{\text{вых}} \cdot \Delta F,$$

где  $C/N_0$  – энергопотенциал радиолинии,  $(C/\Pi)_{\text{вых}}$  – отношение сигнал/шум на выходе демодулятора приемного канала.

Основным выражением, применяемым для расчета спутниковой радиолинии, является

$$C/N_0 = \frac{\text{ЭИИМ} \cdot G/T}{K \cdot L_{\text{сум}}},$$

где ЭИИМ – эквивалентная изотропно-излучаемая мощность передающего конца радиолинии, равная произведению выходной мощности передатчика на коэффициент усиления (КУ) передающей антенны с учетом потерь в фидерном тракте;

$G/T$  – добротность приемного конца радиолинии, равная отношению коэффициента усиления приемной антенны к эффективной

шумовой температуре приемного устройства. Составляющими этой шумовой температуры выступают значения шумовой температуры самой антенны, ее фидерного тракта и малошумящего усилителя;

$K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/Гц·К – постоянная Больцмана;

$L_{\text{сум}}$  – суммарные потери в радиолинии, которые в общем случае складываются из потерь при распространении в физическом вакууме.

На рисунке 1 представлена реализация магнитной рамочной антенны на базе четырехполюсной однослойной статорной обмотки трехфазного асинхронного двигателя, размещенной равномерно на поверхности кольца из ферромагнетика [10], [11].

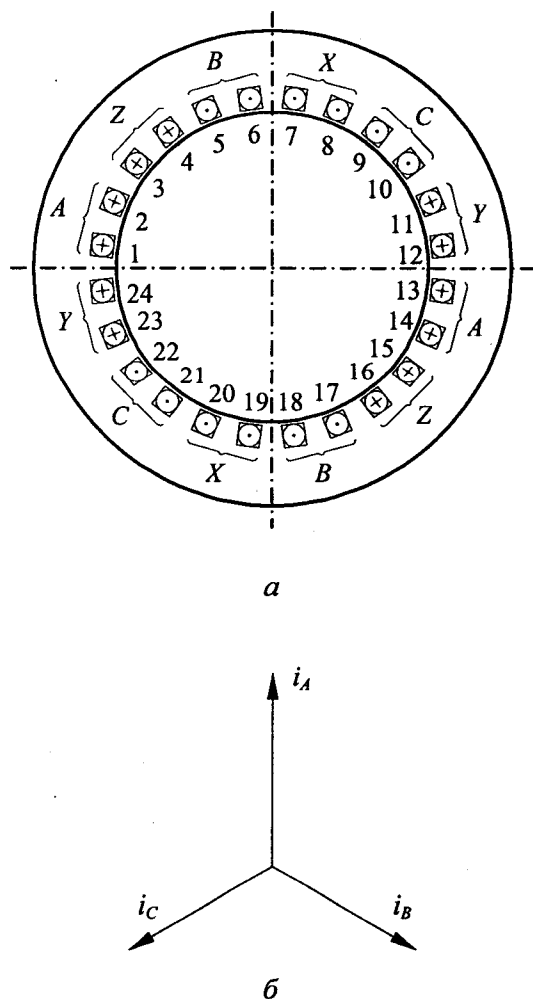


Рис. 1. Схема кольцевой магнитной рамочной антенны:

*a* – расположение катушек трехфазной однослойной обмотки;

*б* – векторная диаграмма фазных токов

Фазовые обмотки антенны *A-X*, *B-Y*, *C-Z* соединяют по схеме звезды или треугольника и подключают к сети трехфазного тока. Фаза *A-X* состоит из четырех катушек, образованных проводниками, размещенными в пазах 1-8, 2-7, 13-20 и 14-19. Соответственно, фаза *B-Y* состоит из четырех катушек, образованных проводниками, лежащими в пазах 5-11, 6-11, 17-24 и 18-23, а фаза *C-Z* – из четырех катушек, образованных проводниками, лежащими в пазах 9-16, 10-15, 21-4, 22-3. Обмотки трех фаз расположены по окружности кольца так, что их оси сдвинуты в пространстве на  $120^\circ$ . Поэтому при прохождении через обмотки трехфазного тока пульсирующие поля образуют в сумме четырехполюсное вращающееся магнитное поле со скоростью равной  $60f_{\text{пит}}/p$  об/мин, амплитуда индукции которого постоянна и равна  $3/2$  амплитуды слагающих фазных полей [6], [10].

За один период переменного тока такое магнитное поле совершает один оборот, а за 1 минуту –  $60f_{\text{пит}}$  оборотов, где  $f_{\text{пит}}$  – частота питающей сети.

Продолжительность одного периода

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{n}, \text{ где } n - \text{ число оборотов,}$$

$[n] = [f] = \text{об/с}$ . Следовательно, рабочие частоты излучения (приема) магнитоэлектрических волн магнитными антеннами определяются отношением

$$f_{\text{изл(пр)}} = \frac{60f_{\text{пит}}}{p}. \quad (2)$$

Положительное направление токов обозначено на рисунке 1 с помощью точек и крестиков: точкой обозначено острие, а крестиком – конец стрелки, соответствующей направлению тока.

Функциональная схема создания вращающегося магнитного поля магнитной антенны приведена на рисунке 2.

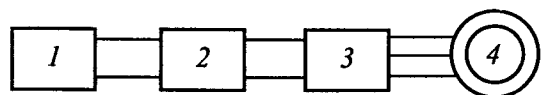


Рис. 2. Функциональная схема преобразователя частоты, поочередно подключающего обмотки антенны

Схема содержит следующие основные элементы: входной фильтр 1, служащий для уменьшения пульсаций тока в питающей сети постоянного тока; регулятор напряжения 2, позволяющий изменять напряжение питания магнитной антенны при изменении частоты излучения магнитного поля в соответствии с выбранным законом регулирования; преобразователь (инвертор) частоты 3, поочередно подключающий обмотки антенны 4 к шинам разной полярности.

Схема питания трехфазной обмотки магнитной антенны от трехфазного мостового транзисторного инвертора показана на рисунке 3.

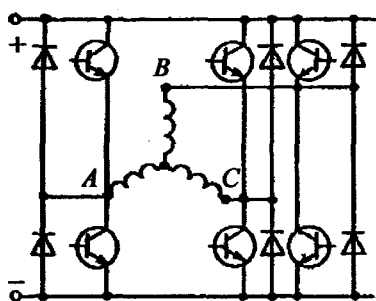


Рис. 3. Схема питания обмотки магнитной антенны от транзисторного инвертора

Благодаря поочередному включению транзисторов ток последовательно проходит по контурам обмоток  $A-B$ ,  $-A-C$ ,  $-B-C$ ,  $-B-A$ ,  $-C-A$ ,  $-C-B$ ,  $-A-B$ , в итоге в антенне создается вращающееся магнитное поле. Достоинство трехфазной мостовой схемы инвертора в том, что в кривых фазных токов отсутствуют третьи гармоники. Транзисторы можно представить в виде идеальных ключей, включающихся поочередно, попарно.

Передача сообщения осуществляется путем нелинейного преобразования колебаний  $f_{\text{шт}}$  с помощью управляющего (информационного) сигнала. В ряде случаев в зависимости от используемого частотного диапазона, определяемого выражением (2) и параметрами информационных сигналов, с целью понижения или повышения частоты модулированных колебаний производится второе преобразование.

В зависимости от схемы преобразователя его выходное напряжение  $u$  имеет прямоугольную форму (рис. 4).

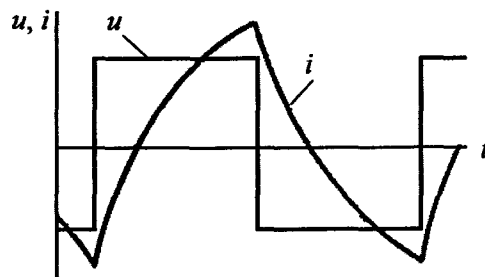


Рис. 4. Графики напряжения и тока в фазовых обмотках магнитной антенны

Основные достоинства магнитно-рамочных антенн с вращающейся поляризацией [12]:

- линейные размеры антенн не зависят от используемого диапазона частот;
- предельная компактность сочетается с высоким значением коэффициента полезного действия;
- способность непрерывно перекрывать заданный интервал частот – широкополосность;
- магнитно-рамочные антенны не нуждаются в согласующих устройствах;
- благодаря оптимальному согласованию отсутствуют потери мощности;
- пригодность для любых приемо-передающих устройств;
- при вертикальном расположении магнитно-рамочной антенны ее диаграмма направленности в горизонтальной плоскости имеет форму восьмерки, что позволяет отстраиваться от мешающих станций (пеленгаторный эффект);
- при горизонтальном расположении магнитно-рамочной антенны с экраном ее диаграмма направленности имеет ориентацию, что позволяет создавать остронаправленные антенны, антенные решетки;
- магнитная составляющая поля магнито-электрического излучения глубже проникает в здание по сравнению с электрической со-

ставляющей. Обилие металла и проводов, хорошо проводящие стены в определенной степени затрудняют проникновение электрической составляющей в помещения, благодаря чему магнитно-рамочные антенны лучше работают в комнатах, нежели электрические;

- в режиме передачи магнитно-рамочные антенны препятствуют излучению побочных гармоник передатчика, например, первая гармоника подавляется на уровне 35 дБ.

### Заключение

Применение магнитно-рамочных антенн на базе ферромагнетика для передачи и приема магнитоэлектрических волн позволяет:

- повысить скорость передачи информации;
- повысить помехозащищенность;
- снизить эквивалентную изотропно-излучаемую мощность передающих устройств;
- повысить чувствительность приемных устройств;
- снизить мощность источников питания электрической энергии, запитывающих приемные и передающие устройства;
- применить простейшие малогабаритные антенны.

В настоящее время все более актуальным становится обеспечение связи при перевозках Северным морским путем и проведении работ за полярным кругом, где геофизическая обстановка весьма динамична. Как показала на практике связь с кораблями на разных широтах и в различных геофизиче-

ских условиях, волны вращающейся поляризации могут существенно повысить надежность связи в ОНЧ(VLF), НЧ(LF) и СЧ(MF) диапазонах длин волн.

### Литература

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1972.
2. Дятлов А.П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами. ч.1. – Таганрог: ТРПУ, 1997.
3. IRIDIUM в России. <http://iridium-russian.ru>.
4. Вишневецкий В.И., Ляхов А.И. и др. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: Техносфера, 2005.
5. Черенкова Е.Л., Чернышев О.В. Распространение радиоволн: учебник для вузов связи. – М.: Радио и Связь, 1984.
6. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1969.
7. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1982.
8. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Изд. «ФМ», 1962.
9. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства. – М.: Связь, 1968.
10. Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1988.
11. Армизонов Н.Е., Армизонов А.Н. Способ беспроводной передачи, приема энергии, сообщения на расстояние и реализующее его устройство. Заявка № 2013142036 от 13.09.2013.
12. Ротхаммель К. Антенны. – М.: Изд. Данвел, 2005.

Рукопись поступила в редакцию 28.03.2014 г.