Стационарная средневолновая радиовещательная антенна

Сергей Комаров, главный редактор радиоканала “Зелёный глаз”, зам. директора ООО “Комета” по научно-техническим разработкам.
Константин Гранковский, инженер-физик, ныне на пенсии.

Часть 1. Немного теории и рассуждений

- Как сделать хорошую передающую антенну?
- Приобретите участок земли площадью 200 га,
В центре вбейте мачту высотой 100 метров...

Выдержка из старинного американского Handbook-а.

Впрочем, эта радиолюбительская шутка недалека от истины. Давайте посчитаем. Как положено. По классике. Для полноценного формирования электромагнитного поля антенны, в её ближней зоне не должно быть никаких мешающих предметов. Ближняя зона – как минимум – 5λ. Писалась эта шутка для любительских диапазонов. В частности, для средневолнового, 1,8-2,0 МГц. Если взять участок круглой формы радиусом 5λ, то для частоты 1,88 МГц имеем длину волны 159,57 метра и 5λ – 797,9 м. Соответственно, площадь круга с таким радиусом будет Пи Эр Квадрат или ровно 200 га. Что же касается высоты вбитой мачты, то 100 метров для диапазона 1,8-2,0 МГц, – это точно пять восьмых лямбды! У американцев, в те далёкие годы, было всё точно!

Для нашего случая, диапазон для ИРВ – 200 метров. Ближняя зона – те же 5λ или 1000 м. То есть, должен быть либо круг диаметром 2 км, либо квадрат 2х2 км. В случае квадрата получается 4 кв.км. Или 400 га. В случае круга – 314 га. Заодно, чтобы под антенной не пропадали площади, можно прекрасно заняться фермерством. Любым. Земли хватит.

А теперь серьёзно. Профессиональные передающие вещательные радиоцентры длинных и средних волн как раз и занимали площади того же порядка, а бывало и больше. Их размещали вдали от городов и вообще, вдали от населённых пунктов. Ну, и мощности там были не ватты и даже не киловатты. Сотни киловатт. Бывало и мегаватты. И питались такие передатчики вовсе не из розетки. К ним подходила весьма серьёзная ЛЭП. И рядом была собственная электроподстанция. Увы, сейчас это всё разрушено. Я писал об этом в профессиональной прессе, но, увы...[1]

Индивидуальное радиовещание отличается от любительской радиосвязи ещё и тем, что передатчик работает непрерывно часами и каждый день. И антенна излучает электромагнитные волны в течение всего времени радиовещания. Стало быть, для ИРВ необходимо соблюдать нормы на уровни электромагнитных полей для селитебных территорий. То есть, для территорий населённых людьми. В своей книге по антеннам[2], я привожу эти уровни и типы антенн, которые в ближней зоне создают минимальные напряжённости при одинаковых уровнях излучаемой мощности.

А теперь отойдём от классики и придвинемся к реальности. Резонансная средневолновая вертикальная[3] антенна диапазона 200 метров должна иметь электрическую высоту λ/4. Это 50 метров. В сельской малонаселённой местности (а именно там разумно строить антенные полигоны для радиотехнических ВУЗ-ов и техникумов), как правило, жилые постройки редко бывают выше трёх этажей. А это не выше 10 метров. Или, по отношению к длине волны – λ/20. К тому же они не цельнометаллические, даже, если с железной крышей. Можно смело сказать, что для формируемой волны – это незначительная шероховатость поверхности земли, которой можно пренебречь.

Стало быть, в реальности, участок круглой формы площадью 314 га вовсе не нужен. Да и мощности передатчиков огромные не нужны. Ведь задача ИРВ не покрыть вещанием большие территории, а сделать испытательный учебный полигон, на котором можно проверять новую радиовещательную технику (в том числе и конструкции передающих антенн) и обучать практической радиотехнике желающих стать настоящими “железными” инженерами (а не владельцами “бумажных” “корочек” с нулевыми знаниями, коих сейчас штампуют почти все ВУЗ-ы).

В ИРВ нужны передатчики не более 500 Вт для технических факультетов крупных университетов. Для

[1] Сергей Комаров. Мощное радиовещание на КСДВ. Казнить нельзя помиловать!. - Профессиональный журнал “Broadcasting Телевидение и радиовещание” №2 (115) 2014.

[2] Сергей Комаров. “Индивидуальное радиовещание. 1. Самодельные передающие антенны диапазона 200 метров”. Практическое руководство для руководителей и членов конструкторских радиокружков и радиостанций Индивидуального радиовещания. - М.: ООО “ИД Медиа Паблишер”, 2022. 216 с. Издание второе, исправленное и дополненное.

[3] В радиовещании на Длинных и Средних волнах используется исключительно вертикальная поляризация.

прочих технических ВУЗ-ов – 250-300 Вт. А для техникумов (технических колледжей) и самодеятельных радиокружков, которым явно не под силу построить и содержать загородный антенный полигон, и передатчики будут работать в городе среди жилых и учебных зданий, вполне хватит 100 и 50 Вт соответственно. На малые мощности проще получать согласования и оформлять разрешительные документы[4]. И с санитарными нормами на излучения проблем не будет.

А, вот, антенна в любом случае должна быть хорошая! С высоким КПД, занимающая минимальную площадь, и имеющая малые уровни излучений на соседние селитебные территории.

Вот именно такую антенну я и опишу в данной статье.

Чтобы понимать, откуда и что взялось и почему сделано именно так, сначала сформулируем

Техническое задание на средневолновую радиовещательную антенну.

1. Антенна должна быть относительно простой для повторения, прочной и технологичной, чтобы её можно было бы сделать “в одни руки”. Высота мачты в 50 метров явно велика. Сложно такую сделать прочной и поднять силами радиокружка. А в ИРВ и передатчик, и антенна, принципиально, должны быть самодельными и сделаны руками кружковцев. Мы же инженеров и техников готовим, а не менеджеров! – Созидателей, а не покупателей, потребителей и распределителей.

50 метров – это электрическая длина вибратора. А геометрическая может быть значительно меньше. Вариантов есть несколько. Можно сделать “толстый” многопроводный вибратор, разведя провода друг от друга обручами, можно сделать вибратор в виде многопроводного перевёрнутого конуса, а можно на верхушке мачты сделать горизонтальный емкостной “зонтик” в виде нескольких лучей. Первые два варианта в вертикальной реализации относительно сложны. А вариант с лучевым зонтиком меня вдохновил ещё во время службы в армии, когда я увидел “звёздочку” на верхушке штыревой антенны радиостанции РБМ-1. Ну, собственно, предлагаемая здесь конструкция и есть увеличенная антенна от РБМ-ки! Правда, у этой антенны лучей у “звёздочки” – восемь и длиной они по 3 метра каждый!

Эксперименты, проведённые в 2019 году[5], показали, что геометрическую высоту антенны (при той же электрической) можно сократить таким способом приблизительно на 0,075λ. На частоте 1584 кГц – это 14,2 метра. Соответственно, требуемая геометрическая резонансная высота антенны 300 / (1,584 х 4) – 14,2 = 33,2 метра. Серьёзный выигрыш! Летом 2019 года мы поднимали антенну высотой 27,4 метра. На ней и проверили работу “зонтика” на частоте 1584 кГц. Чуть-чуть не дотянули до червертьволнового резонанса. Однако антенну проверили и измерения провели.

В эквивалентной схеме антенны сопротивление излучения включено последовательно с сопротивлением заземления. И именно соотношение этих двух сопротивлений определяет КПД антенны:

КПД = Rизл / (Rизл + Rз).

Из формулы видно, что для увеличения КПД надо увеличивать сопротивление излучения и уменьшать сопротивление высокочастотного заземления.

Существует практический график, показывающий зависимость сопротивления излучения от геометрической высоты антенны. Он приведён в моей книге по антеннам. Из него видно, что если увеличить высоту антенны с 0,25λ до 0,27λ, то сопротивление излучения возрастёт с 36,6 до 50 Ом. И с увеличением длины сопротивление излучения растёт очень быстро. Стало быть, есть смысл удлинять антенну на столько, на сколько позволит прочность конструкции и технические возможности её поднять.

Для нынешней рабочей частоты “Зелёного глаза” 1485 кГц, я сделал такой расчёт:

Длина волны: λ = 300 / 1,485 = 202 метра.

Тогда 0,27λ = 54,55 м.

Эффективность емкостного зонтика фиксированного геометрического размера с понижением частоты снижается (емкостное сопротивление линейно растёт), поэтому выигрыш от него приблизительно считаем 14,2 х 1485/1584 = 13,3 метра.

Требуемая геометрическая высота удлинённой антенны с зонтиком 54,55 – 13,3 = 41,25 метра.

Для надёжной конструкции антенны угол между мачтой и каждой оттяжкой верхнего яруса должен быть не менее 30 градусов. Эту норму нарушать нельзя. Строго. Иначе – сдует!

Если верхняя оттяжка будет крепиться к мачте в центр зонтика (это на 1,1 метра ниже высоты антенны), то анкера под оттяжки потребуется отнести от мачты на (41,25 – 1,1) tg 30 = 23,2 метра. Сделаем с запасом, 25 метров. Тогда предел высоты мачты будет 1,1 + 25 / tg 30 = 44,4 метра.

2. Теперь про ВЧ заземление. Именно про высокочастотное, то есть, надо создать на поверхности земли проводящий слой, который в зоне максимальных радиальных токов прикроет собой реальную почву с относительно низкой проводимостью. К тому же у нас на верхушке антенны – емкостной зонтик. Стало быть, и в земле должен быть аналогичный проводящий пятачок, который возьмёт на себя сосредоточение электрического поля непосредственно под антенной.

[4] Именно поэтому на радиостанцию “Зелёный глаз” я оформил разрешение на 98 Вт. Меньше проблем с оформлением.

[5] Сергей Комаров. Передвижная разборная передающая антенна “Зонтик-27”. - Радиолюбитель, 2020, №1, стр. 24-26.

На профессиональных радиоцентрах от основания вертикальной мачты пускают 120 радиалов (через каждые 3 градуса) из биметаллической проволоки БСМ-1 толщиной 6 мм. И чтобы не спотыкаться, прикапывают их на глубину 10-15 см. Глубже – нельзя. Плохая проводимость реальной земли вносит потери. Длина земляных радиалов на разных радиоцентрах бывает разной. Максимально – равной высоте мачты. Но делают и меньше.

По некоторым исследованиям[6], длину земляных радиалов можно сократить даже до λ/10. Там же исследуется рациональное количество радиалов для классического λ/4 штыря и для удлинённой антенны 5λ/8. Вывод: лучше увеличивать число коротких радиалов, чем их длину.

3. Теперь, на сколько сторон делать оттяжки. Варианты: на три стороны, в плане – под 120 градусов или на 4 стороны, в плане – под 90 градусов. Под три – материалов меньше (трос, изоляторы, зажимы). Однако, после подъёма надо переносить боковые оттяжки с подъёмного положения под 90 градусов в штатное под 120. Операция, требующая высокой степени внимательности и аккуратности, иначе можно уронить уже поднятую мачту. К тому же на тросе не сэкономить. Подъёмные оттяжки всё равно придется делать на четвёртую сторону, хоть их и не надо разбивать изоляторами, а после подъёма подвязать к мачте вдоль её нижней секции. Такая конструкция была применена в 2019 году при монтаже антенны высотой 27,4 метра. Было сложно, но справились.

В случае сильных ветров, всё-таки, стоит не экономить, а сделать оттяжки на 4 стороны. Тогда не потребуется перенос боковых оттяжек, но изоляторов и зажимов потребуется на треть больше. Я решил не экономить. Всё-таки мачта более 40 метров. Страшно. Прочность конструкции важнее.

4. Вернёмся к заземляющему “пятачку” под антенной. Появились две ориентировки: анкера под оттяжки отнесены от мачты на 25 метров, и, оттяжки делаются на 4 стороны. Стало быть, разумно длину радиалов сделать тоже 25 метров (λ/8), заземлить их на концах неглубоко забитыми стальными кольями – ровно настолько, чтобы прочно их закрепить в земле, и можно было натянуть радиалы. И число радиалов взять кратным четырём. В статье про радиалы часто фигурирует число 32. Не случайно. Однако, у нас наверху емкостной зонтик и очень хотелось бы, чтобы электрическое поле от него находило бы противоположный полюс на радиалах, а не грело бы землю. Поэтому число радиалов под антенной сделаем 32, а по мере удаления от мачты, когда расстояния между ними возрастут, сделаем их число в два раза больше. Таким образом, максимально сосредоточим электрическое поле антенны между зонтиком и земляным пятачком высокой проводимости.

И, как завершающая конструкцию земли “вишенка на торте”, соединим по кругу все 32 заземляющих кола между собой, ещё увеличив этим периферийную ёмкость ВЧ земли.

Этим я не только увеличиваю КПД антенны (сокращая ВЧ сопротивление заземления), но и концентрирую электрическое поле ближе к антенне, уменьшая уровень рассеяния возбуждающего электрического поля на селитебную территорию. Вокруг же люди живут. Хоть и есть хороший запас по санитарным нормам, но всё-таки лучше к ним вообще не подходить близко.

5. Ну, и вернувшись к эпиграфу этой главы, посчитаем, какую реальную площадь занимает эта антенна. Круг, радиусом 25 метров. Площадь: Пи Эр Квадрат. Это будет 0,196 га или 19,6 соток. В случае прямоугольного выделения участков: 50х50 метров или 25 соток.

С небольшим ухудшением качества ВЧ земли, можно расположить анкера оттяжек по углам участка, укоротив радиалы, и вписав земляной пятачок в квадрат, внутри круга, диаметром 50 метров. Тогда сторона квадрата будет 50 / $\sqrt{2}$ = 35,5 метра, а площадь участка – 12,5 соток.

Оба варианта вполне приемлемы даже для индивидуалов. А для ВУЗ-овского учебного полигона можно и гораздо большую площадь приобрести. Ведь там ещё и корпуса под летние общежития студентов строить, и остальную инфраструктуру загородного студенческого лагеря.

Местность под установку передающей КВ-СВ антенны надо выбирать на возвышенности – антенна должна стоять высоко! Если вокруг сосновый лес, то это критерий хорошо выбранного места. Лиственный, еловый или смешанный – не показатель. Так что, перед выбором участка изучаем карты высот.

[6] “GP с радиалами на грунте”: http://dl2kq.de/ant/3-33.htm

Продолжение в №11/2025

Индивидуальное (любительское) радиовещание:
http://www.cqf.su/