

М.А. Аборин¹
В.Т. Поляков²
Л.С. Чудновский³

M.A. Aborin
V.T. Polyakov
L.S. Chudnovsky

ДЛИННОВОЛНОВАЯ АНТЕННА

LONG-WAVE ANTENNA

Рассмотрены варианты экспериментальной антенны для имитации молниевых разрядов. Оценены добротность, КПД и напряженность излучаемого поля.

Ключевые слова: длинноволновая антенна, добротность, КПД, напряженность поля.

The variants of the experimental antenna for simulation of lightning discharges are considered. The Q -factor, efficiency and field strength are estimated.

Keywords: long-wave antenna, Q -factor, efficiency, field strength.

В связи с необходимостью калибровки длинноволновых (ДВ) приемников, регистрирующих радиоизлучение молний, в [1] предложена антенна испытательного передатчика, содержащая горизонтальную разветвленную сеть, служащую емкостной нагрузкой, снижение с настроечной катушкой индуктивности и коммутатор, замыкающий цепь антенны на землю. Перед излучением импульса антенна заряжается до некоторого (высокого) потенциала U_0 , а при замыкании коммутатора генерирует импульс затухающих колебаний с частотой, определяемой ее индуктивностью и емкостью, $\omega^2 = 1/LC$.

Конструкция вполне традиционная (рис. 1) и напоминает ранние антенны искровых передатчиков. За годы развития радио она хорошо отработана и просчитана, хотя этот анализ в значительной мере утерян. Кратко восстановим его. Заряд антенны и цуг затухающих колебаний

¹ Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения».

© Аборин М.А., 2017.

² Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры ТСиИБ АНО ВО «Российский новый университет».

© Поляков В.Т., 2017.

³ Доктор технических наук, заведующий сектором, АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения».

© Чудновский Л.С., 2017.

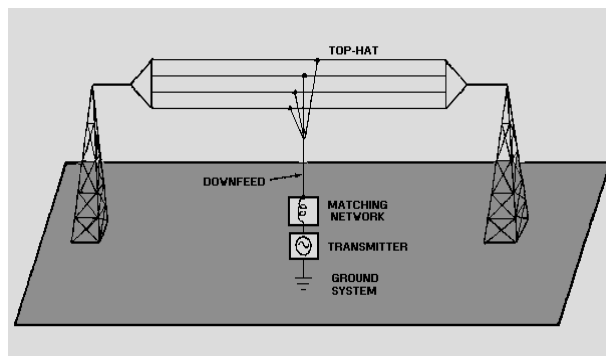


Рис. 1. Эскиз конструкции ДВ антенны

в антенной цепи (рис. 2) описывается выражениями:

$$q = CU; U = U_0 e^{-\delta t} \cos \omega t,$$

где δ – коэффициент затухания.

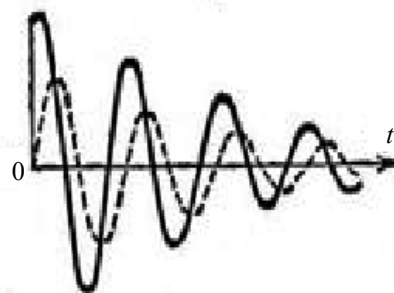


Рис. 2. Затухающие колебания в антенной цепи. Сплошная линия – напряжение, штриховая линия – ток в снижении

Ток в снижении антенны

$$i = dq/dt = CU_0 (\omega e^{-\delta t} \sin \omega t - \delta e^{-\delta t} \cos \omega t)$$

достигает максимума при $\omega t = \pi/2$, а поскольку за четверть периода амплитуда колебаний несущественно уменьшается, можно считать, что первый максимум тока

$$i_m = \omega CU_0.$$

Теорию антенн обычно начинают с двух основных формул, описывающих напряженность магнитного H и электрического E полей от элемента тока i малой длины l (диполя Герца) в дальней (волновой) зоне [2; 3]:

$$H_m = i_m l / 2\lambda D; E_m = H_m Z_0 = 60\pi i_m l / \lambda D,$$

где l – длина диполя, λ – длина волны, $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ – волновое сопротивление пространства, $Z_0 = 120\pi$ Ом, D – расстояние.

Для заземленного диполя высотой h с учетом его зеркального отражения в проводящей земле $l = 2h$ и выражение для E получается таким:

$$E_m = 120\pi i_m h / \lambda D.$$

Подставив i_m и учитывая, что $\lambda = 2\pi c / \omega$, $c = 1 / \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, $\omega = 2\pi f$, получаем:

$$E_m = 2\pi \mu_0 f^2 CU_0 h / D.$$

Разумеется, спектр затухающего импульса с крутым передним фронтом весьма широк, тем не менее частоту колебаний имеет смысл выбирать в диапазоне 136...139 кГц, специально отведенном для экспериментальной работы и для радиолюбителей, поскольку ниже, на частоте 100 кГц, работают навигационные системы «Лоран», а выше, со 150 кГц начинается радиовещательный диапазон ДВ.

Для примера найдем пиковую напряженность поля на расстоянии $D = 1$ км от антенны с параметрами $C = 1$ нФ, $U_0 = 1$ кВ, $h = 10$ м, $f = 137$ кГц ($\lambda = 2200$ м). Расчет дает $i_m = 0,86$ А (начальный импульс тока в антенне) и $E_m = 1,5$ мВ/м. Это совсем немного для ДВ диапазона, где средний уровень атмосферных помех достигает 100 мкВ/м [4].

В то же время, постройка антенны с такими параметрами – достаточно сложная инженерная задача. Учитывая близость земли, погонную емкость проводов можно принять равной 10 пФ/м, тогда для создания емкостной нагрузки 1 нФ потребуется не менее 100 м провода в горизонтальной части, например 4 параллельных провода длиной по 25 м, разнесенных на несколько метров. Для настройки антенны потребуется катушка с индуктивностью $L = 1/\omega^2 C = 1,37$ мГн, характеристическое сопротивление контура $X = \sqrt{L/C}$ составит 1,17 кОм, и даже при доброт-

ности 300 ее активное сопротивление будет около 4 Ом.

Основные же потери определяет заземление. По эмпирической формуле М.В. Шулейкина [2, с. 261], сопротивление потерь $R_n = A\lambda/\lambda_0$, где λ_0 – собственная длина волны антенны, A варьируется от 0,5 Ом при хорошем заземлении до 7...10 Ом – при плохом. В нашем случае R_n получается порядка 30 Ом, это дает общую добротность антенной цепи Q около 35, что и определяет скорость затухания колебаний.

Любопытно определить сопротивление излучения R_Σ и КПД этой антенны. По формуле Рюденберга, для короткого вибратора на идеально проводящей земле и с верхней емкостной нагрузкой [3, с. 276] имеем:

$$R_\Sigma = 160\pi^2 (h/\lambda)^2 = 0,044 \text{ Ом};$$

$$\text{КПД} = R_\Sigma / (R_\Sigma + R_n) = 0,12\%.$$

Попытки повысить КПД путем уменьшения потерь в заземлении и удлиняющей катушке не приводят к увеличению начальной амплитуды излучаемого импульса E_m , но повышают добротность системы $Q = X/R_n$ и просто удлиняют импульс.

Столь печальные результаты заставляют искать альтернативные пути. Из формулы для E_m видно, что начальная амплитуда поля пропорциональна Ch , и для простого вертикального провода – квадрату высоты (поскольку его емкость примерно пропорциональна длине провода). Рассмотрим четвертьволновую вертикальную антенну из тонкого провода, поднятую метеорологическим шаром-зондом, воздушным змеем или беспилотным аппаратом (БЛА) на высоту 550 м.

Для справки: шар-зонд диаметром 1,5 м имеет свободную подъемную силу (за вычетом собственного веса) 1,22 кгс, а литцендрат ЛЭШО $24 \times 0,1$ (24 медных жилки диаметром по 0,1 мм) имеет внешний диаметр по изоляции 0,75 мм, $R = 99$ Ом/км (dc) и вес 1,93 кг/км.

Емкость антенны при диаметре провода (по меди) 0,63 мм составит 2200 пФ (4 пФ/м) [3, с. 51] и начальный импульс тока в основании антенны (при $U_0 = 1$ кВ) окажется равным $i_m = 1,9$ А.

Поле излучения теперь следует искать, исходя из действующей высоты антенны с косинусоидальным распределением тока $h_d = \lambda/2\pi$ [2; 3]:

$$E_m = 60 i_m / D.$$

Для «единичной» дальности 1 км получаем $E_m = 114$ мВ/м, что почти на два порядка больше, чем в предыдущем примере с наземной антенной высотой 10 м. Сопротивление излучения те-

перь будет около 36 Ом, что позволяет получить значительный КПД даже при плохом заземлении. Характеристическое (в данном случае уже волновое) сопротивление антенны $X = 530$ Ом, а добротность не может быть выше 15, что определяется потерями на излучение.

Любопытно отметить, что подобные антенны, поднимаемые воздушными змеями с вершин холмов, использовал еще пионер беспроводной связи М. Лумис в 1860-х годах, осуществив официально документированную связь на расстоянии более 20 км [5–7]. Для зарядки антенн он использовал атмосферное электричество, обеспечивающее даже в ясную погоду напряженность электростатического поля 100...200 В/м. В рассматриваемом случае и при надлежащей изоляции источник питания не нужен – антенна может заряжаться до потенциала $U_0 = 50...100$ кВ.

Дополнительную информацию про искровые передатчики и их антенны можно найти в книге 1912 года [8].

Литература

1. Aborin, M.A., Polyakov, V.T., Chudnovskiy, L.S. Broadband LF Emitter // AIS-2016 «Atmosphere, Ionosphere, Safety». – Kaliningrad, 2016. – P. 313–316.
2. Белоцерковский Г.Б. Антенны. – М. : Оборонгиз, 1956.
3. Мейнке Х., Гундлах Ф. Радиотехнический справочник. – М.–Л. : ГЭИ, 1961. – Т. 1.
4. Справочник по радиовещанию / под общ. ред. А.В. Выходца. – Киев, 1981. – Разд. 2. – Гл. 5-1. – <http://rfcmd.ru/books/sprv/251.html>
5. Поляков В. Первый радиолюбитель // CQ-QRP. – 2015. – № 50. – С. 4–12. – <http://qrp.ru/cqqr-magazine/1116-cq-qrp-50>
6. Поляков В. Результаты экспериментов по QRN связи // CQ-QRP. – 2015. – № 51. – С. 4–11. – <http://qrp.ru/cqqr-magazine/1148-cq-qrp-51>
7. Жигалов В. О скорости заряда антенны атмосферным электричеством // CQ-QRP. – 2015. – № 51. – С. 12–13. – <http://qrp.ru/cqqr-magazine/1148-cq-qrp-51>
8. <https://ia902707.us.archive.org/34/items/experimentalwir00edelgoog/experimentalwir00edelgoog.pdf>