

**Беленко Д.В., Головков А.А., Мусинов П.В.**  
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
 университет «ЛЭТИ»

## Ограничение полосы согласования коротких штыревых антенн активной цепью, реализующей заземленный отрицательный конденсатор

*Установлено ограничение полосы пропускания приемной электрически малоразмерной штыревой антенны, согласуемой с помощью активных цепей, подобное ограничению Боде-Фано для цепей с фостеровскими элементами. Получена зависимость между минимальным значением коэффициента отражения антенны и перекрытием по частоте.*

**Ключевые слова:** Электрически малоразмерные штыревые антенны, согласование, отрицательные реактивные элементы, конвертор отрицательного импеданса

В последнее время все большую популярность набирает способ согласования электрически малоразмерных антенн (ЭМА) с использованием активных цепей [1]-[5]. Такие согласующие цепи применяются, например, в мобильных телефонах и других малогабаритных устройствах. Это объясняется в частности малыми размерами такой согласующей цепи и большими успехами в развитии полупроводниковых технологий. В данной работе рассматриваются нефостеровские согласующие цепи. Как указано в [1,3] отрицательный конденсатор может быть реализован конвертором отрицательного импеданса (КОИ), выполненном на операционном усилителе (ОУ) или транзисторах.

В 1954 году Линвилл впервые представил схемы КОИ, реализующего функцию отрицательного конденсатора с использованием биполярного транзистора. Он предложил цепи отрицательного сопротивления, используя в качестве нагрузки КОИ, заземленный с одной стороны (рис.1).

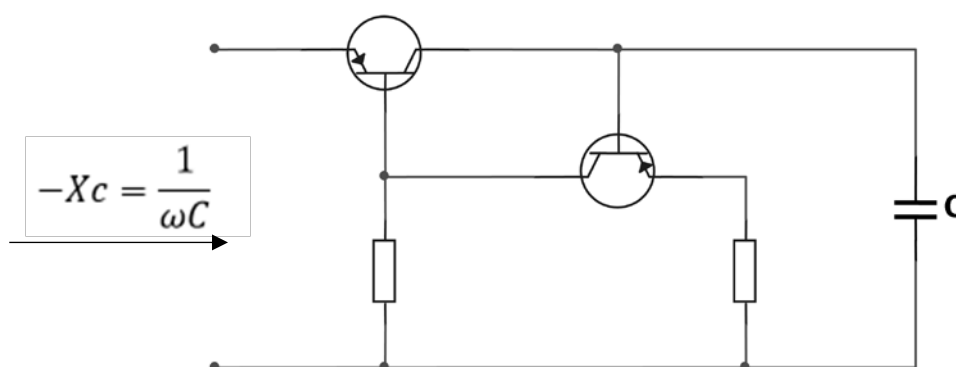


Рис.1 Схема Линвилла: КОИ, реализующий отрицательный конденсатор, заземленный с одной стороны

В [1] были проанализированы ограничения предельной полосы согласования для штыревой ЭМА с помощью схемы КОИ с "плавающим" потенциалом, реализованным на ОУ. Как показала практика, такие нефостеровские согласующие цепи являются нестабильными и склонными к самовозбуждению. В [2] была сделана попытка найти ограничение полосы согласования штыревой ЭМА при параллельном включении КОИ, заземленного с одной стороны, однако при этом полагалось, что емкость антенны компенсируется во всей полосе частот, что невозможно. В настоящей работе выполнено более точное исследование возможной полосы согласования штыревой ЭМА с параллельно включенным отрицательным конденсатором.

Эквивалентная схема согласования штыревой ЭМА с помощью заземленного КОИ, реализующего отрицательный конденсатор, показана на рис.2.

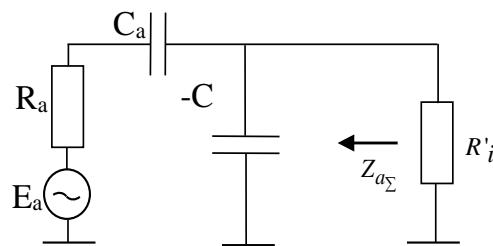


Рис. 2. Эквивалентная схема согласования штыревой ЭМА нефостеровской емкостью

На рис.2 введено обозначение  $R'_i = R_i k^2$  - частотно независимое сопротивление входной цепи приемника с трансформатором, имеющим коэффициент трансформации  $k$ . Выражение для сопротивления антенны вместе с отрицательным элементом  $Z_{a\Sigma}$  (см.рис.2) можно записать как:

$$Z_{a\Sigma} = \frac{\left(\frac{1}{j\omega C_a} + R_a\right) \left(-\frac{1}{j\omega C}\right)}{\frac{1}{j\omega C_a} + R_a - \frac{1}{j\omega C}} \quad (1)$$

Выполнив ряд математических операций преобразуем выражение для сопротивления  $Z_{a\Sigma}$  к виду:

$$Z_{a\Sigma} = \frac{R_a}{\left(1 - \frac{C}{C_a}\right)^2 + \omega^2 R_a^2 C^2} + \frac{\frac{1}{j\omega C_a} \left(1 - \omega^2 R_a^2 C C_a - \frac{C}{C_a}\right)}{\left(1 - \frac{C}{C_a}\right)^2 + \omega^2 R_a^2 C^2} \quad (2)$$

КОИ полностью компенсирует реактивную составляющую импеданса штыревой ЭМА только на частоте  $\omega_0$ , при этом должны выполняться равенства:

$$0 = \left(1 - \omega^2 R_a^2 C C_a - \frac{C}{C_a}\right),$$

$$\omega_0^2 = \left(1 - \frac{C}{C_a}\right) \frac{1}{R_a^2 C_a C} \quad \text{или} \quad 1 - \frac{C}{C_a} = \frac{1}{Q^2} \frac{C}{C_a} \quad (3)$$

где  $Q = \frac{1}{\omega_0 C_a R_a}$  - добротность импеданса антенны на частоте компенсации. Из (3) следует, что компенсация реактивной составляющей на мнимой оси частот возможна лишь при выполнении условия:  $\frac{C}{C_a} \leq 1$ .

С учетом (3) можно получить итоговое выражения для сопротивления антенны  $Z_{a\Sigma}$  с учетом нефостеровского элемента:

$$Z_{a\Sigma} = R_a \left[ \frac{Q^2}{\frac{C}{C_a} \left[ 1 - \frac{C}{C_a} (1 - \Omega^2) \right]} + \frac{Q(1 - \Omega^2)}{j\Omega \left[ 1 - \frac{C}{C_a} (1 - \Omega^2) \right]} \right] \quad (4)$$

где  $\Omega = \frac{\omega}{\omega_0}$  - относительная частота.

Для модуля коэффициента отражения на входе приемника запишем:

$$|S_{11}(\Omega)| = \frac{|Z_{a\Sigma} - R_i'|}{|Z_{a\Sigma} + R_i'|} = \frac{\left| \frac{\frac{Q^2}{\frac{C}{C_a} \left[ 1 - \frac{C}{C_a} (1 - \Omega^2) \right]} + \frac{Q(1 - \Omega^2)}{\left[ 1 - \frac{C}{C_a} (1 - \Omega^2) \right] \cdot \Omega}}{\frac{Q^2}{\frac{C}{C_a} \left[ 1 - \frac{C}{C_a} (1 - \Omega^2) \right]} + \frac{Q(1 - \Omega^2)}{\left[ 1 - \frac{C}{C_a} (1 - \Omega^2) \right] \cdot \Omega}} - r \right|}{\left| \frac{\frac{Q^2}{\frac{C}{C_a} \left[ 1 - \frac{C}{C_a} (1 - \Omega^2) \right]} + \frac{Q(1 - \Omega^2)}{\left[ 1 - \frac{C}{C_a} (1 - \Omega^2) \right] \cdot \Omega}}{\frac{Q^2}{\frac{C}{C_a} \left[ 1 - \frac{C}{C_a} (1 - \Omega^2) \right]} + \frac{Q(1 - \Omega^2)}{\left[ 1 - \frac{C}{C_a} (1 - \Omega^2) \right] \cdot \Omega}} + r \right|} \quad (5)$$

где  $r = \frac{R_i'}{R_a}$  - относительное сопротивление.

Ограничение полосы пропускания для штыревой ЭМА при согласовании отрицательной емкостью, реализованной КОИ, с заземлением одной стороны, подобное ограничению Бодэ-Фано для фостеровских цепей:

$$2 \int_0^{\infty} \ln \left| \frac{1}{|S_{11}(\omega)|} \right| d\omega = \omega_0 \int_0^{\infty} \ln \left[ \left( \frac{Q^2}{\frac{C}{C_a} \left[ 1 - \frac{C}{C_a} (1 - \Omega^2) \right]} + r \right)^2 + \left( \frac{Q(1 - \Omega^2)}{\left[ 1 - \frac{C}{C_a} (1 - \Omega^2) \right] \cdot \Omega} \right)^2 \right] d\Omega - \quad (6)$$

$$- \omega_0 \int_0^{\infty} \ln \left[ \left( \frac{Q^2}{\frac{C}{C_a} \left[ 1 - \frac{C}{C_a} (1 - \Omega^2) \right]} - r \right)^2 + \left( \frac{Q(1 - \Omega^2)}{\left[ 1 - \frac{C}{C_a} (1 - \Omega^2) \right] \cdot \Omega} \right)^2 \right] d\Omega = \omega_0 J(Q, r)$$

Практика требует постоянного и минимального значения  $|S_{11}(\omega)|$  в рабочей полосе частот  $\omega_g \leftrightarrow \omega_n$ . Считая модуль коэффициента отражения постоянным в рабочей полосе частот, запишем выражение (6) в виде:

$$\int_{\omega_H}^{\omega_B} \ln \left| \frac{1}{S_{11}(\omega)} \right| d\omega = (\omega_B - \omega_H) \frac{\ln \left| \frac{1}{S_{11}} \right|}{\omega_0} = J(Q, r) \quad (7)$$

Для вычисления несобственных интегралов в (6) и (7) можно воспользоваться пакетом MathCAD. Вычисленные численным образом значения  $J(Q, \frac{c}{Ca})$  для различных параметров антенны  $Q$  и  $\frac{c}{Ca}$  показаны на рис.3.

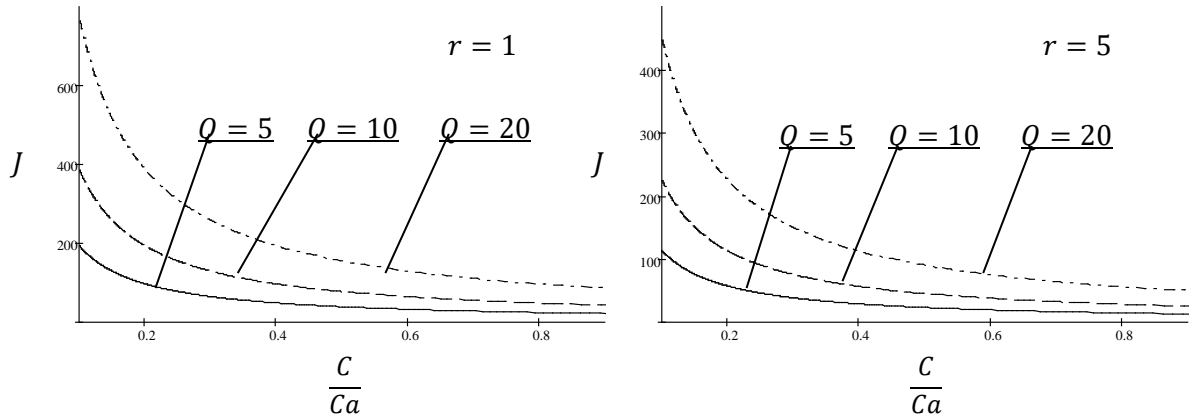


Рис.3 Значения интеграла.

Для удобства оценки  $|S_{11}(\omega)|$  в рабочей полосе антенны преобразуем выражение (7) к виду:

$$|S_{11}| \geq e^{-\frac{\omega_0}{\omega_B - \omega_H} J(Q, r)} \quad (8)$$

Таким образом из (8) и рис.3 следует, что подобно ограничению Боде-Фано для фостеровских цепей [3], [5] зная параметры штыревой ЭМА  $Q$  и  $r$  можно задав значение  $|S_{11}|$  найти полосу рабочих частот  $\omega_B \leftrightarrow \omega_H$  антенны, согласованной КОИ, заземленным с одной стороны, который реализует параллельно включенный отрицательный конденсатор. Возможно решение и обратной задачи: задав диапазон рабочих частот определить минимально возможный коэффициент отражения для данной антенны.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ (Проект №8.7130.2017/8.9)

#### Библиографический список

1. Головкин А.А., Можаява Е.И. Ограничение полосы согласования приемных штыревых антенн нефостеровскими цепями//Изв.вузов России.Радиоэлектроника.2016. Вып.2.С 59-62
2. Н. А. Wheeler, "Fundamental limitations of small antennas," Proceedings of the IRE, vol. 35, no. 12, pp. 1479–1484, 1947.
3. S. E. Sussman-Fort and R. M. Rudish, "Non-foster impedance matching of electrically-small antennas," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 57, no. 8, pp. 2230–2241, 2009.
4. Вай Кайчень. Теория и проектирование широкополосных согласующих цепей: гер. с англ.; под ред. Ю. Л. Хотунцева. М.: Связь, 1979. 288 с.