

**Н.В. Иванов, В.М. Тургалиев, Д.В. Холодняк**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

## **Широкополосная нефостеровская согласующая цепь для рамочной антенны**

*Представлены результаты исследования и разработки нефостеровской согласующей цепи для широкополосного согласования рамочной антенны на частотах ниже частоты резонанса. Предложенная согласующая цепь состоит из конвертора отрицательного импеданса на биполярных транзисторах, реализующего нефостеровскую отрицательную индуктивность, и симметрирующего трансформатора. Показано, что ширина полосы согласования в основном ограничена рабочей полосой частот симметрирующего трансформатора. При использовании симметрирующего трансформатора, выполненного на элементах с сосредоточенными параметрами, ширина полосы согласования рамочной антенны по уровню коэффициента отражения  $-6$  дБ достигает 40%.*

**Ключевые слова:** нефостеровские элементы, конвертер отрицательного импеданса, рамочная антенна

С целью уменьшения габаритов радиоаппаратуры, устанавливаемой на подвижных объектах, используемой в носимой электронике и т.п. в последнее время наблюдается повышенный интерес к применению электрически малых антенн (ЭМА), размеры которых много меньше длины волны. Поскольку сопротивление излучения таких антенн невелико, особенно остро стоит проблема достижения высокого КПД. В то же время ЭМА обладают большим реактивным сопротивлением, что сильно осложняет их согласование в широкой полосе частот. Создание эффективных широкополосных ЭМА является одной из актуальных задач антенной техники.

Согласно теореме Фостера импеданс и проводимость пассивного реактивного двухполюсника монотонно возрастают с увеличением частоты. Таким образом, пассивные индуктивные и емкостные элементы могут принимать только положительные значения [1]. Вместе с тем фундаментальные ограничения, налагаемые теоремой Фостера, не распространяются на активные цепи. Перспективное решение задачи широкополосного согласования ЭМА заключается в использовании активных цепей, которые реализуют так называемые нефостеровские элементы, обладающие эквивалентной отрицательной индуктивностью или емкостью. Применение нефостеровских элементов теоретически позволяет полностью компенсировать реактивность ЭМА и обеспечить ее согласование в широкой полосе частот [2], [3].

В работе представлены результаты исследования и разработки нефостеровской согласующей цепи (СЦ) для широкополосного согласования рамочной антенны на частотах ниже частоты резонанса. Топология печатной рамочной антенны, выполненной на подложке из материала Arlon AD 255 ( $\epsilon_r = 2,55$ ;  $\text{tg}(\delta) = 0,0015$ ) толщиной 1.016 мм, показана на рис. 1, а. Геометрические параметры антенны:  $R = 32,5$  мм,  $w = 5$  мм. Толщина металлизации – 35 мкм. На рис. 1, б представлена частотная зависимость мнимой и вещественной составляющих входного импеданса антенны, полученная при помощи численного электродинамического моделирования. Центральная рабочая частота составляет 200 МГц, что в 3,5 раза меньше резонансной частоты антенны. Ниже частоты резонанса мнимая часть

входного импеданса антенны носит индуктивный характер. Эквивалентная индуктивность антенны составляет 110 нГн.

Рис. 2 иллюстрирует принцип компенсации реактивности рамочной антенны при помощи положительной емкости (рис. 2, а) и идеальной отрицательной индуктивности (рис. 2, б). В случае применения положительной емкости мнимая составляющая входного импеданса антенны полностью компенсируется только на центральной частоте (рис. 2, а). В то же время, использование отрицательной индуктивности, которая равна по абсолютной величине, но противоположна по знаку реактивности антенны, позволяет компенсировать мнимую составляющую входного импеданса антенны в широкой полосе частот (рис. 2, б).

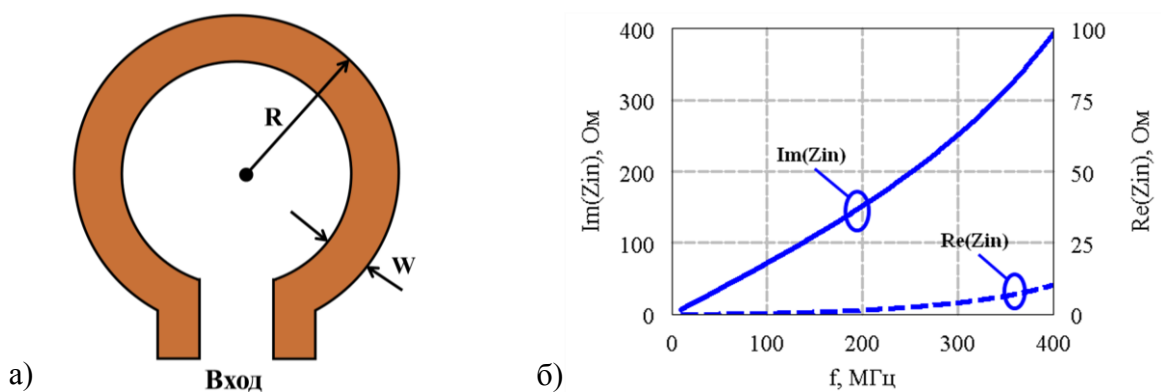


Рисунок 1.

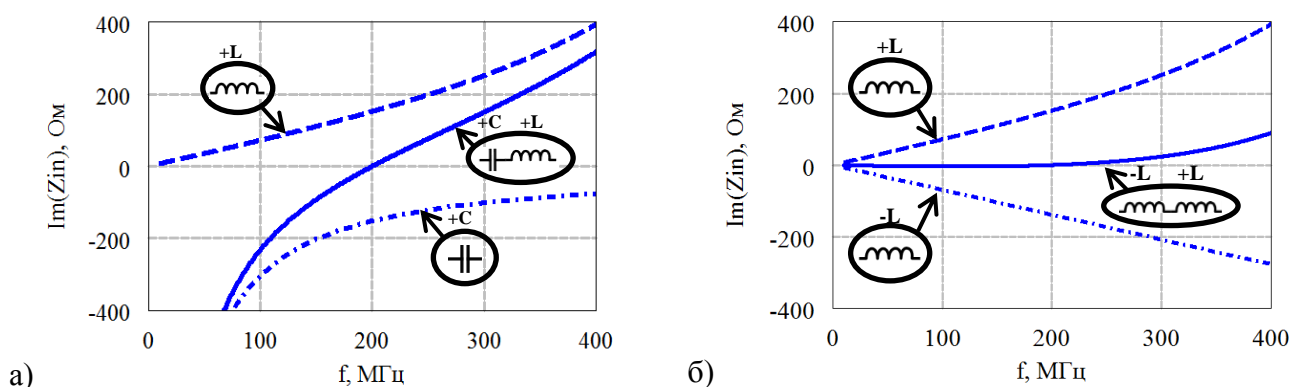
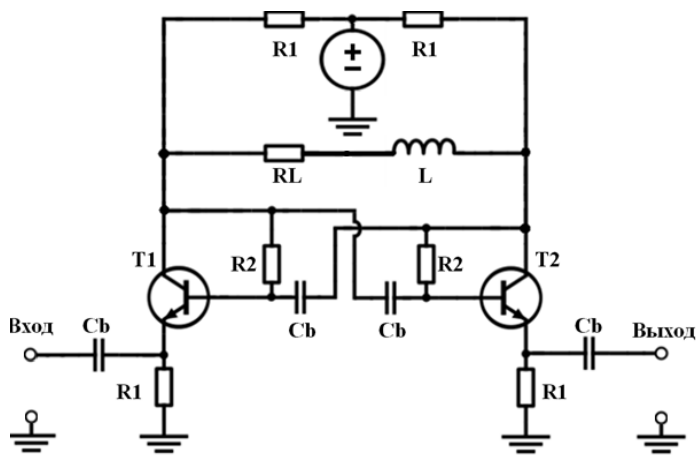


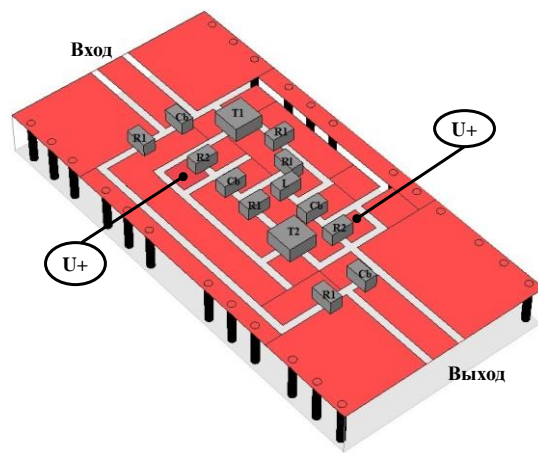
Рисунок 2.

Нефостеровские элементы с отрицательными значениями индуктивности или емкости реализуются при помощи конверторов отрицательного импеданса (КОИ) на основе биполярных или полевых транзисторов [4], [5].

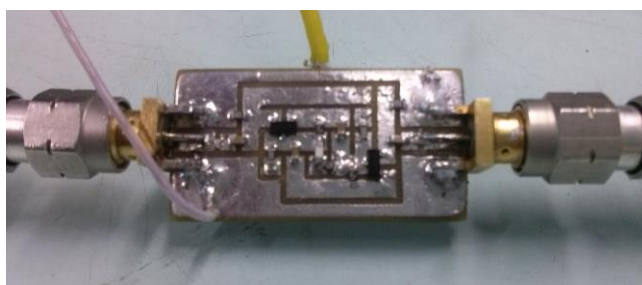
На рис. 3, а показана схема КОИ на биполярных транзисторах, который применялся для реализации отрицательной индуктивности. Использовались транзисторы типа BFQ67. Режим работы транзисторов задается резисторами  $R1 = 2 \text{ кОм}$  и  $R2 = 120 \text{ кОм}$ . Индуктивность  $L = 110 \text{ нГн}$  преобразуется КОИ в эквивалентную отрицательную. Сопротивление  $R_L = 12 \text{ Ом}$  обеспечивает устойчивый режим работы схемы. Конденсаторы  $C_b = 10 \text{ нФ}$  являются блокировочными.



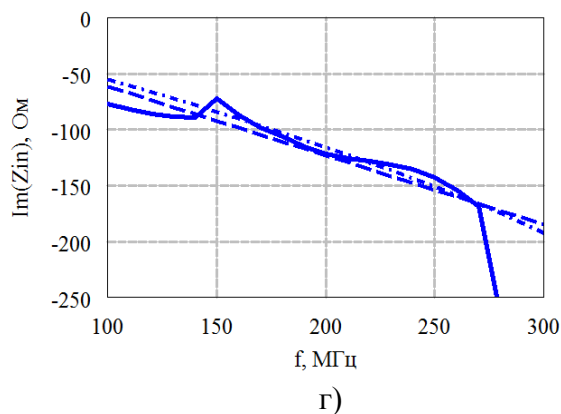
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.

Топология печатной платы КОИ с элементами поверхностного монтажа показана на рис 3, б. Фотография устройства, выполненного на печатной плате из материала FR4 толщиной 1,5 мм, представлена на рис. 3, в.

На рис. 3, г показана частотная зависимость мнимой части входного импеданса идеальной отрицательной индуктивности (штриховая линия). Там же приведены соответствующие характеристики для КОИ, реализующего нефостеровскую отрицательную индуктивность, которые были получены в результате электродинамического моделирования печатной платы с компонентами поверхностного монтажа (штрих-пунктир) и измерены экспериментально (сплошная линия). Измерения выполнялись при помощи векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZNC-3. В полосе частот 150–250 МГц, экспериментальная характеристика нефостеровской отрицательной индуктивности хорошо согласуется с результатами моделирования и целевой характеристикой идеальной отрицательной индуктивности.

Для согласования рамочной антенны помимо компенсации мнимой составляющей входного импеданса необходимо трансформировать его вещественную составляющую к сопротивлению генератора (50 Ом). Для подключения балансного входа рамочной антенны к небалансному выходу генератора используется симметрирующий трансформатор (рис. 4). Этот же трансформатор способен обеспечить необходимое преобразование вещественной части входного импеданса антенны.

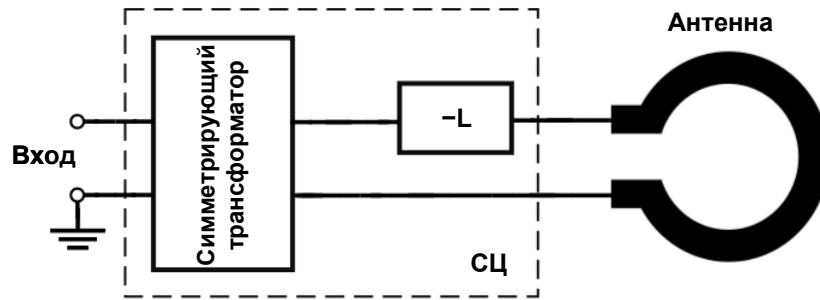


Рисунок 4.

Малогабаритный симметрирующий трансформатор может быть выполнен на элементах с сосредоточенными параметрами по схеме, показанной на рис. 5, а. Для рассматриваемой рамочной антенны параметры схемы симметрирующего трансформатора:  $L = 6,9$  нГн и  $C = 91,9$  пФ. При условии равенства нулю мнимой части импеданса рамочной антенны, подключаемой к выходам симметрирующего трансформатора, он способен обеспечить полосу согласования по уровню коэффициента отражения  $-6$  дБ шириной до 43% (рис. 5, б).

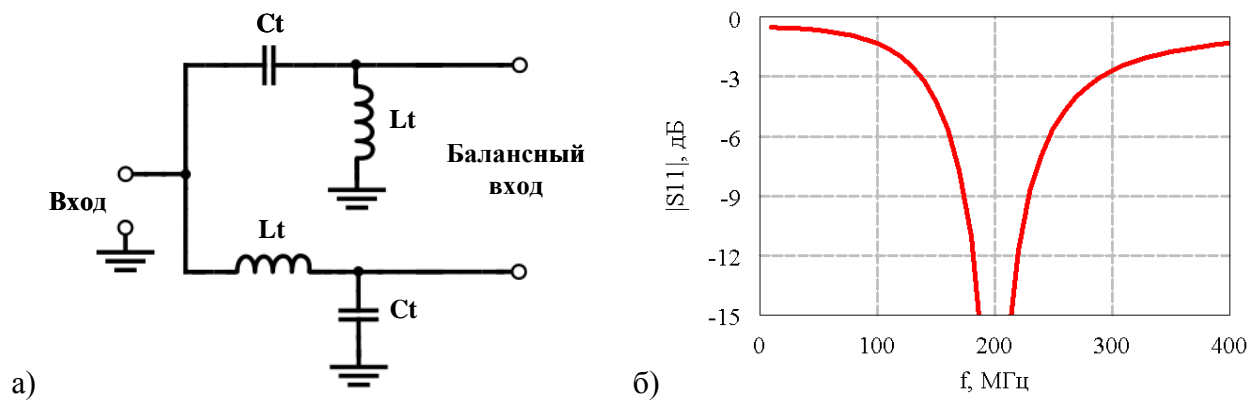


Рисунок 5.

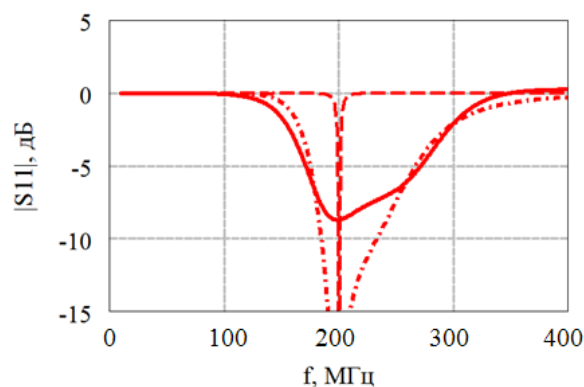


Рисунок 6.

Результаты моделирования коэффициента отражения на входе СЦ, подключенной к рамочной антенне представлены на рис. 6. Сплошной линией показана характеристика отражения для СЦ, которая состоит из симметрирующего трансформатора и КОИ, реализующего нефостеровскую отрицательную индуктивность. Пунктирной линией показан

коэффициент отражения на входе аналогичной согласующей цепи на идеальных LC-элементах. В обоих случаях ширина полосы согласования по уровню коэффициента отражения –6 дБ составляет около 40%. Для сравнения штриховой линией на этом же графике показана характеристика отражения при согласовании антенны с помощью пассивной СЦ, состоящей из симметрирующего трансформатора и положительной емкости. При этом ширина полосы согласования не превышает 1,5%. Преимущество от применения нефостеровской СЦ для широкополосного согласования рамочной антенны, таким образом, очевидно.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки России (задание № 8.1825.2014/К).

#### Библиографический список

1. Foster, R.M. A reactance theorem / R.M. Foster // Bell Systems Technical Journal. – 1924. – V.3. – P.259-267.
2. Sussman-Fort, S.E. Non-Foster impedance matching of electrically-small antennas / S.E. Sussman-Fort, R.M. Rudish // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 2009. – V.57, N.8. – P.2230-2241.
3. Jacob, M.M. Broadband non-Foster matching of an electrically small loop antenna / M.M. Jacob, J. Long, D.F. Sievenpiper // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Chicago, IL, USA, 2012. – P.1-2.
4. Aberle, J.T. Antennas with non-Foster matching networks / J.T. Aberle, R. Loepsinger-Romak. – San Rafael, CA: Morgan & Claypool, 2007. – 53 P.
5. Linvill, J.G. Transistor negative impedance converters / J.G. Linvill // Proc. IRE. – 1953. – V.41. – P.725-729.