

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

Использование конверторов отрицательного импеданса на биполярных транзисторах для согласования электрически малоразмерных антенн

Предложена модификация Линвилловской схемы реализации конвертора отрицательного импеданса на основе биполярных транзисторов для согласования электрически малоразмерной антенны. Приведены результаты моделирования и их сравнение с реальными измерениями макетной платы КОИ по предложенной схеме.

Ключевые слова: антенна, согласование, конвертор отрицательного импеданса

В настоящее время в мобильных устройствах, а также в радиоаппаратуре диапазонов ВЧ и УВЧ часто используют электрически малоразмерные антенны для экономии места. Как определено в работах [1, 2] размеры антенны и добротность ее импеданса, определяющая мгновенную рабочую полосу антенны, связаны известным соотношением:

$$Q \geq \frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{ka},$$

где $k=2\pi/\lambda$, λ – длина волны, соответствующая центральной частоте рабочего диапазона, a – радиус сферы, заключающей антенну.

Как видно из этого соотношения, малоразмерные антенны имеют высокую добротность, и, следовательно, могут быть эффективно согласованы только в очень узком диапазоне радиочастот с помощью обычных пассивных цепей согласования. Для обеспечения широкой рабочей полосы приходится за счет потерь уменьшать КПД антенны, часто совсем отказываются от цепи согласования и напрямую подключают малоразмерную антенну к радиотракту, получая в этом случае достаточно большую ширину полосы рабочих частот за счет потери полезной мощности сигнала. Альтернативным способом включения малоразмерной антенны в радиотракт является использование согласующей цепи на основе конвертора отрицательного импеданса (КОИ).

Одной из базовых схем КОИ является схема Линвилла на биполярных транзисторах. В данной работе будет представлена модифицированная схема КОИ на биполярных транзисторах, проведен ее анализ и сравнения результатов моделирования с испытаниями макета.

В работах [3, 4] были представлены модели антенн для анализа цепей КОИ и получены основные соотношения, описывающие их характеристики. В данной работе для анализа будет использована упрощенная модель электрически малоразмерной штыревой антенны, представленная на рисунке 1.

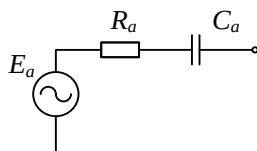


Рис. 1. Эквивалентная схема штыревой малоразмерной антенны

В данной работе мы будем сравнивать эффективность применения КОИ со случаем прямого подключения антенны в радиотракт, оба этих случая показаны на рисунке 2.

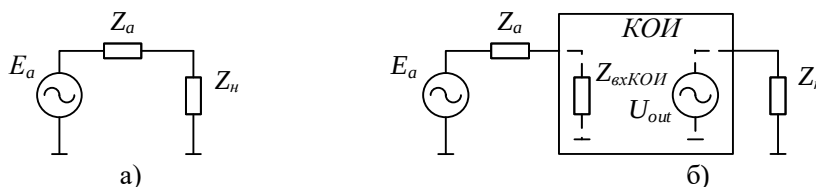


Рис. 2. а) Прямое включение антенны в радиотракт. б) Использование КОИ для согласования импеданса антенны

В случае схемы рис.2,а импеданс антенны сильно рассогласован с волновым сопротивлением радиотракта, что приводит к значительным потерям в уровне сигнала. На рисунке 3 показано сравнение коэффициентов передачи уровней сигналов для двух случаев – подключение антенны ($C_a = 10$ пФ, $R_a = 10$ Ом) напрямую к нагрузке, использование идеального КОИ, полностью компенсирующего входной импеданс антенны.

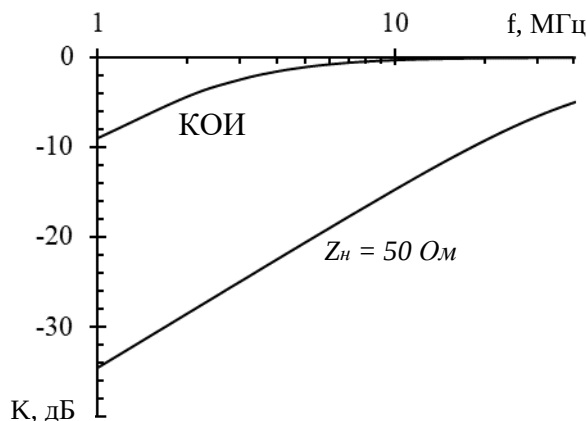


Рис. 3. Сравнение эффективности КОИ

Модифицированная Линвилловская схема КОИ на биполярных транзисторах представлена на рисунке 4. В отличие от оригинальной схемы здесь в цепь обратной связи помимо конденсатора включены также индуктивность и резистор, это необходимо для трансформации импеданса антенны к величине 50 Ом, в схему добавлены цепи высокочастотной стабилизации и цепи стабилизации рабочей точки на основе биполярного транзистора. Параметры цепи стабилизации рабочей точки выбраны таким образом, чтобы поддерживать постоянный ток через каждый из транзисторов равным 4 мА.

Оптимизация параметров схемы КОИ проводилась в пакете AWR Microwave Studio – в процессе оптимизации оценивались такие характеристики КОИ, как устойчивость, входной импеданс совместно с антенной, обратные потери на выходе КОИ, уровень шума на выходе КОИ. На основе результатов моделирования была собрана макетная плата КОИ (рисунок 5). Далее будут приведены результаты моделирования и их сравнение с результатами измерений параметров макета КОИ по схеме рис. 4. При моделировании, как и при измерениях

характеристик макета, вместо реальной антенны был использован эквивалент малоразмерной антенны (см. рис. 1) со следующими параметрами – $C_a = 10$ пФ, $R_a = 10$ Ом.

Устойчивость схемы КОИ была оценена методом NDF анализа, данный метод был подробно описан в работе [5]. Результат анализа устойчивости приведен на рисунке 6.

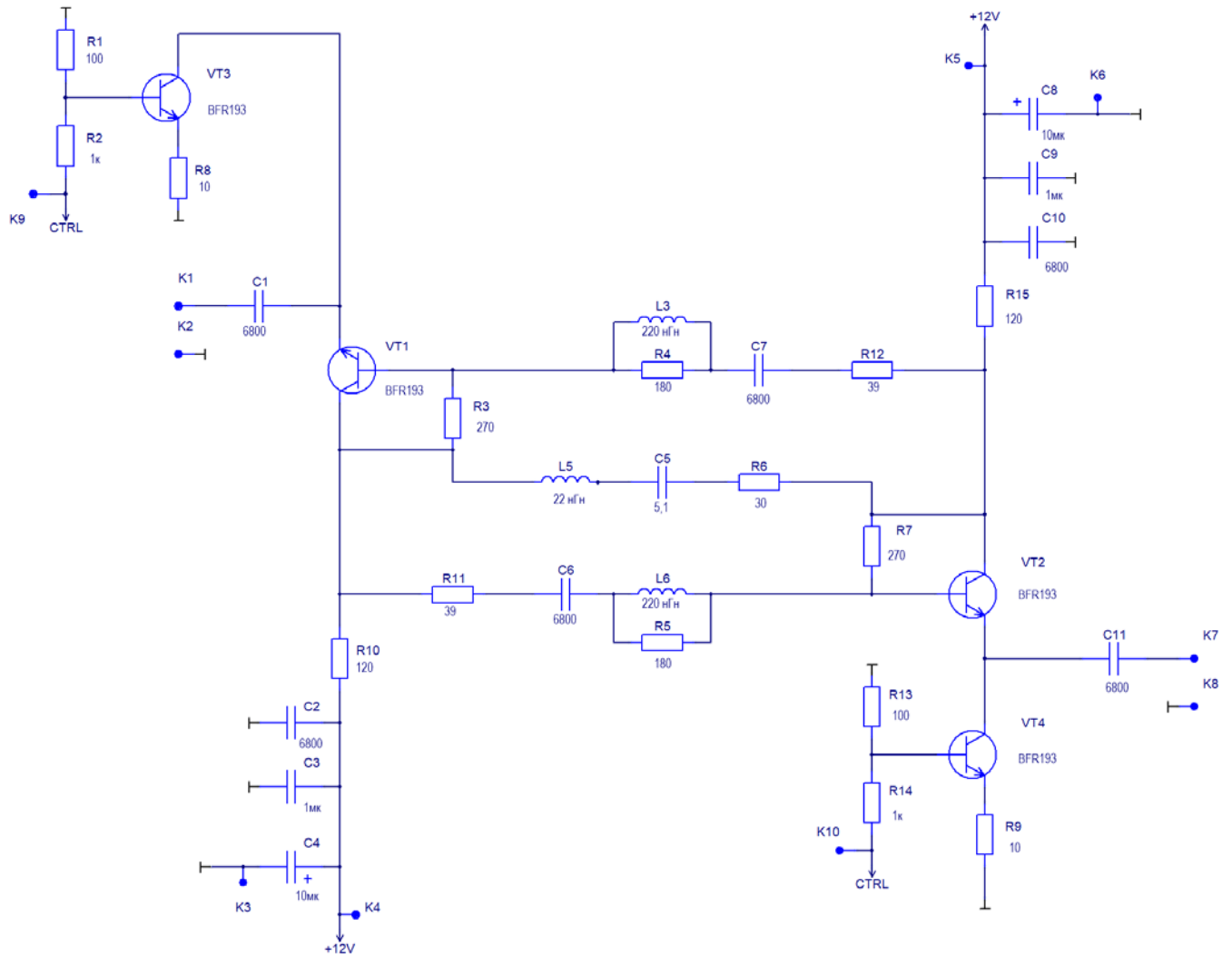


Рис. 4. Модифицированная Линвилловская схема КОИ на биполярных транзисторах

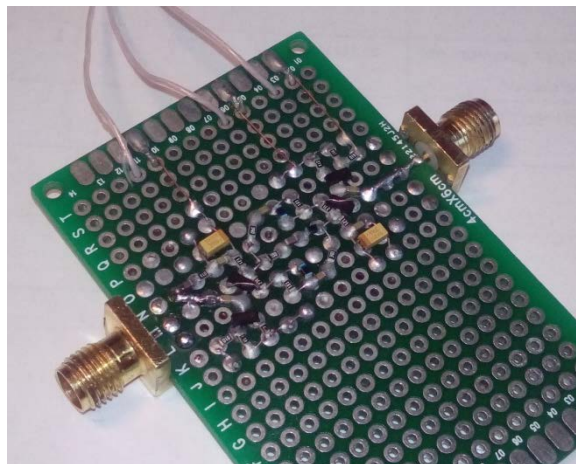


Рис. 5. Внешний вид макетной платы КОИ

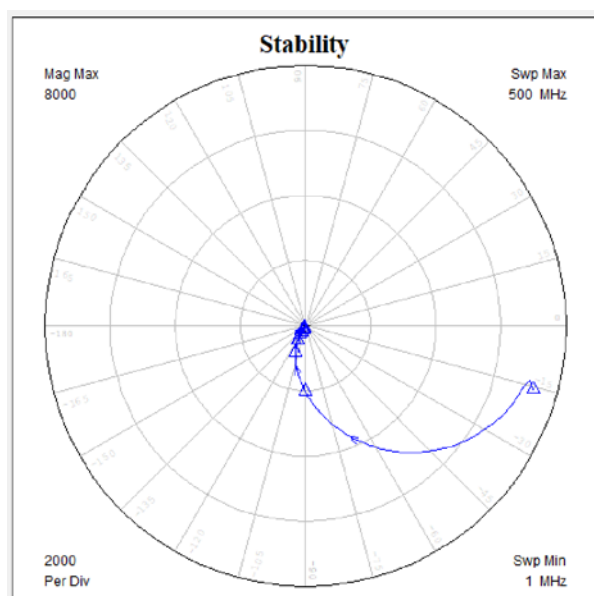


Рис. 6. Анализ устойчивости КОИ методом NDF

На рисунке 7 сплошными линиями показаны реальная и мнимая части входного импеданса эквивалента антенны с КОИ по результатам моделирования, а прерывистыми результаты измерений.

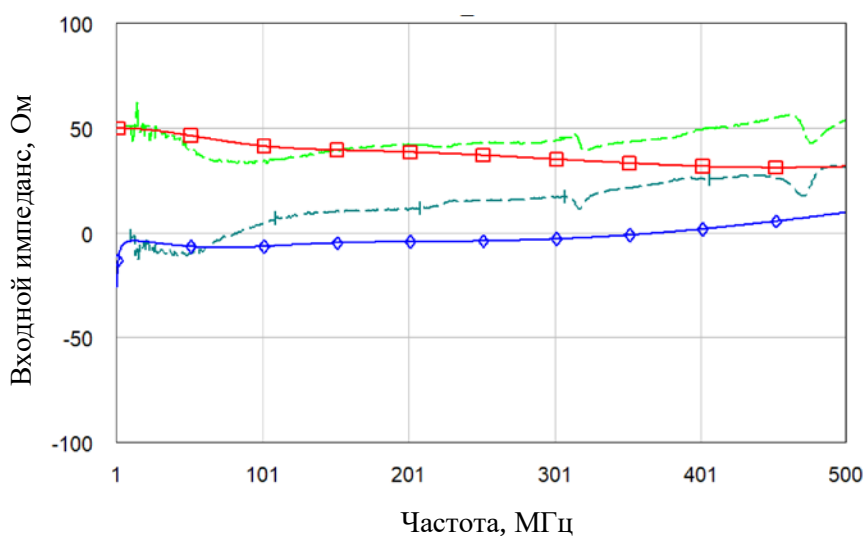


Рис. 7. Входной импеданс эквивалента антенны с КОИ

На рисунке 8 сплошной линией показаны обратные потери на входе эквивалента антенны с КОИ по результатам моделирования, а прерывистой результаты измерений.

Помимо обеспечения устойчивости и требуемого значения входного импеданса антенны с КОИ важной характеристикой является значение спектральной мощности шума на выходе схемы, т.к. этот параметр напрямую определяет чувствительность приемника.

На рисунке 9 показаны результаты моделирования уровня спектральной плотности мощности шумов на выходе КОИ.

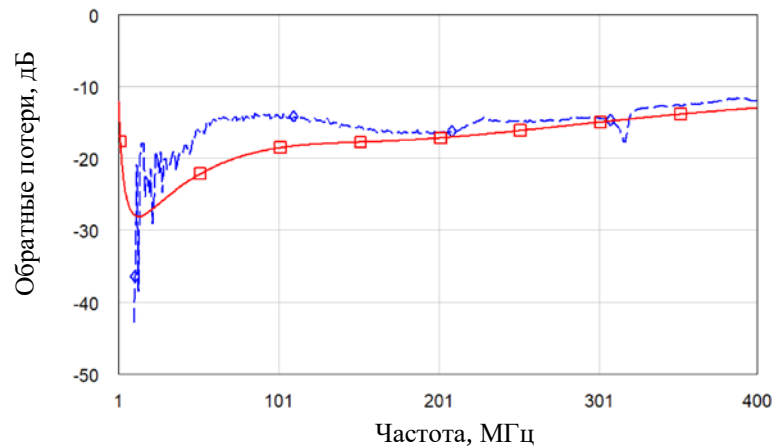


Рис. 8. Обратные потери на входе эквивалента антенны с КОИ

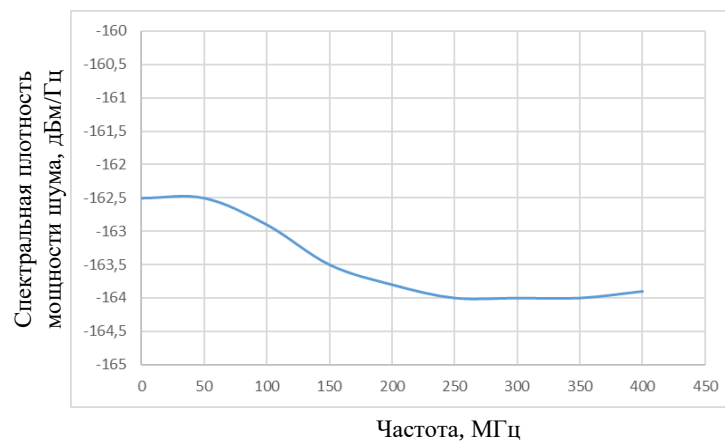


Рис. 8. Спектральная плотность мощности шумов на выходе эквивалента антенны с КОИ

В настоящее время не были проведены измерения уровня спектральной плотности мощности шума на выходе КОИ, т.к. для данного измерения необходимо использовать внешний малошумящий усилитель, чтобы усилить шумы КОИ выше уровня чувствительности спектроанализатора. В дальнейших планах также проведение анализа эффективности передачи сигнала от антенны к нагрузке при использовании предложенной в данной работе схемы КОИ и анализ уровня интермодуляционных составляющих на выходе КОИ.

Библиографический список

1. Volakis J., Chen C-C., Fujimoto K. Small Antennas: Miniaturization Techniques & Applications - McGraw-Hill Companies, N.Y., 2012, 428pp.
2. D.H.Kwon "On the Radiation Q and Gain of Crossed Electric and Magnetic Dipole Moment", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.53, pp.1681-1687, May 2005.
3. S.E.Sussman-Fort, R.V.Rudish, "Non-Foster Impedance Matching of Electrically-Small Antennas", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.57, pp.2230-2241, 2009.
4. J.T.Aberle, "Two-Port Representation of an Antenna with Application to Non-Foster Matching Network", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.56, pp.1218-1222, May 2008.
5. Qi Tang, Hao Xin "Stability Analysis of Non-Foster Circuit Using Normalized Determinant Function". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume: 65, Issue: 9, Sept. 2017