

## Широкополосные СВЧ-устройства с использованием нефостеровских отрицательных индуктивных и емкостных элементов

*Предложен подход к созданию широкополосных СВЧ-устройств на основе квази-постоянных реактивностей, использующих активные нефостеровские отрицательные индуктивные и емкостные элементы.*

**Ключевые слова:** нефостеровские элементы, отрицательная индуктивность, отрицательная емкость, отрицательный конвертор импеданса, полосно-пропускающий фильтр, направленный ответвитель

### Введение

Зависимость реактивного сопротивления индуктивного ( $L$ ) и емкостного ( $C$ ) элементов от частоты может быть записана в виде

$$X_L(\omega) = X_{0L} \cdot \omega/\omega_0 \text{ и } X_C(\omega) = X_{0C} \cdot \omega_0/\omega, \quad (1)$$

где  $X_{0L} = \omega_0 L$  и  $X_{0C} = -1/(\omega_0 C)$  – реактивное сопротивление на частоте  $\omega = \omega_0$ .

Согласно теореме Фостера [1] импеданс ( $Z = jX$ ) и проводимость ( $Y = jB = 1/Z = -j/X$ ) пассивного реактивного двухполюсника монотонно возрастают с увеличением частоты:

$$\frac{dX}{d\omega} > 0 \text{ и } \frac{dB}{d\omega} > 0. \quad (2)$$

Таким образом, пассивные индуктивные и емкостные элементы могут принимать только положительные значения. Зависимость их реактивного сопротивления от частоты показана на Рис. 1 сплошными линиями.

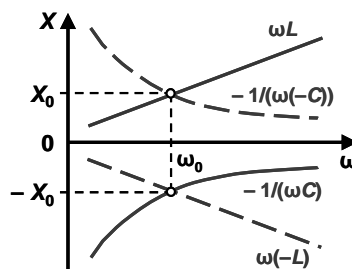


Рис. 1.

Фундаментальные ограничения, налагаемые теоремой Фостера, не распространяются на активные цепи. При помощи отрицательного конвертора импеданса (ОКИ), использующего пару транзисторов [2], можно реализовать эквивалентную отрицательную индуктивность ( $-L$ ) или емкость ( $-C$ ) с реактивным сопротивлением  $X_{0(-L)} = \omega_0(-L) = -\omega_0 L$  или  $X_{0(-C)} = -1/(\omega_0(-C)) = 1/(\omega_0 C)$ , которое убывает с увеличением частоты (пунктирные линии на Рис. 1).

В последние годы наблюдается повышенный интерес к применению активных "нефостеровских" отрицательных индуктивностей и емкостей для согласования электрически малых антенн [3], создания антенн вытекающей волны с неизменной шириной диаграммы направленности [4], широкополосных метаматериалов [5] и широкополосных СВЧ-фазовращателей [6].

В настоящей работе предлагается подход к созданию широкополосных СВЧ-устройств таких, как полосно-пропускающие фильтры (ППФ) и направленные ответвители (НО), который основан на использовании нефостеровских квази-постоянных реактивностей, представляющих собой комбинацию положительной индуктивности и отрицательной емкости, или наоборот.

### Нефостеровские квази-постоянные реактивности

Учитывая, что активные индуктивности и емкости могут принимать как положительные, так и отрицательные значения, рассмотрим соединение положительной индуктивности ( $L$ ) и отрицательной емкости ( $-C$ ), имеющих на частоте  $\omega_0$  одинаковое реактивное сопротивление  $X_0 = \omega_0 L = -1/(\omega_0(-C))$ . Очевидно, что суммарное реактивное сопротивление двухполюсника при последовательном соединении элементов равно  $X_s(\omega_0) = 2X_0$ , а при их параллельном соединении –  $X_p(\omega_0) = X_0/2$ .

Согласно (1), частотная зависимость реактивного сопротивления цепи в случае последовательного и параллельного соединения элементов соответственно имеет вид:

$$X_s(\omega) = X_L(\omega) + X_{-C}(\omega) = X_0(\omega/\omega_0 + \omega_0/\omega), \quad (3)$$

$$X_p(\omega) = \frac{X_L(\omega) \cdot X_{-C}(\omega)}{X_L(\omega) + X_{-C}(\omega)} = \frac{X_0}{(\omega/\omega_0 + \omega_0/\omega)}. \quad (4)$$

На частоте  $\omega$  отклонение реактивного сопротивления цепи по отношению к его значению на частоте  $\omega_0$  составляет

$$\Delta X_{s,p}(\omega) = \frac{X_{s,p}(\omega) - X_{s,p}(\omega_0)}{X_{s,p}(\omega_0)} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Определив полосу частот, как  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ , и центральную частоту, как  $\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2}$ , получим, что отклонение реактивного сопротивления цепи на краях полосы частот шириной в одну октаву ( $\omega_2/\omega_1 = 2$ ) равно:  $\Delta X_s(\omega\sqrt{2}/2) = \Delta X_s(\omega\sqrt{2}) = 6,1\%$  и  $\Delta X_p(\omega\sqrt{2}/2) = \Delta X_p(\omega\sqrt{2}) = 5,7\%$ . Для полосы частот шириной в две октавы ( $\omega_2/\omega_1 = 4$ ) отклонение реактивного сопротивления на краях полосы составляет:  $\Delta X_s(\omega/2) = \Delta X_s(2\omega) = 25\%$  и  $\Delta X_p(\omega/2) = \Delta X_p(2\omega) = 20\%$ . Таким образом, реактивное сопротивление цепи слабо зависит от частоты, и в широкой полосе частот цепь характеризуется квази-постоянной эквивалентной реактивностью.

Аналогичный результат имеет место при последовательном или параллельном соединении отрицательной индуктивности ( $-L$ ) и положительной емкости ( $C$ ) с  $X_0 = \omega_0(-L) = -1/(\omega_0 C)$ . Отличие состоит только в знаке суммарного реактивного сопротивления цепи. Его абсолютное значение – такое же, как в рассмотренном выше случае.

На практике нефостеровские отрицательные индуктивности и емкости реализуются с помощью ОКИ на биполярных или полевых транзисторах [2, 3]. При их использовании необходимо анализировать устойчивость цепей, нелинейные и шумовые характеристики.

### Широкополосные СВЧ-устройства на квази-постоянных реактивностях

Классические Т- и П-образные схемы инверторов сопротивления/проводимости, состоящие из положительных и отрицательных реактивных элементов [7], характеризуются сравнительно узкой рабочей полосой частот по уровню входного коэффициента отражения. Вместе с тем, известно эквивалентное представление идеального инвертора сопротивления/проводимости (Рис. 2-а) с бесконечно-широкой рабочей полосой частот в виде Т- или П-образной схемы на основе частотно-независимых реактивностей (Рис. 2-б и -в).

Использование квази-постоянных реактивностей позволяет обеспечить функционирование инвертора в ограниченной, но достаточно широкой полосе частот в сравнении с классическими схемами. На Рис. 2-г приведены частотные характеристики инвертора сопротивления с коэффициентом инверсии  $K = 50$  Ом, выполненного по классической схеме (пунктирные линии) и на квази-постоянных реактивностях (сплошные линии). Относительная рабочая полоса частот по уровню входного коэффициента отражения  $-20$  дБ в первом случае составляет 20%, а во втором – превышает 90%. Коррекция значения  $X_0$  позволяет перераспределить отклонение реактивного сопротивления в полосе частот симметрично относительно номинального значения 50 Ом и тем самым дополнительно расширить рабочую полосу частот инвертора до 140% (штрих-пунктирные линии на Рис. 2-г).

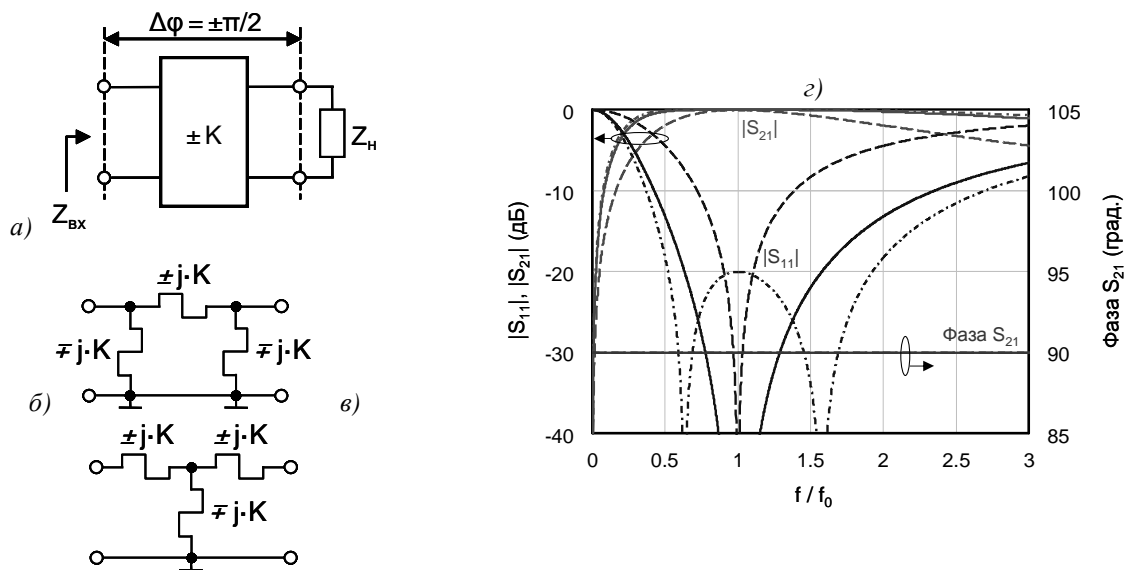


Рис. 2.

На базе широкополосных инверторов сопротивления/проводимости можно создавать широкополосные СВЧ-фильтры. На Рис. 3-а изображена схема трехзвенного ППФ, в которой используются два инвертора проводимости. П-образная схема инвертора на квази-постоянных реактивностях показана на Рис. 3-б. Расчетные характеристики ППФ с полосой пропускания  $\Delta f = 3,1\text{--}10,6$  ГГц (130%) представлены на Рис. 3-в.

Рабочая полоса частот шлейфного НО может быть существенно расширена путем замены четвертьволновых отрезков линий передачи инверторами сопротивления/проводимости на квази-постоянных реактивностях. На Рис. 4 приведены эквивалентная схема и теоретические характеристики двухшлейфного НО с рабочей полосой частот 220% по уровню коэффициента отражения и развязки  $-20$  дБ.

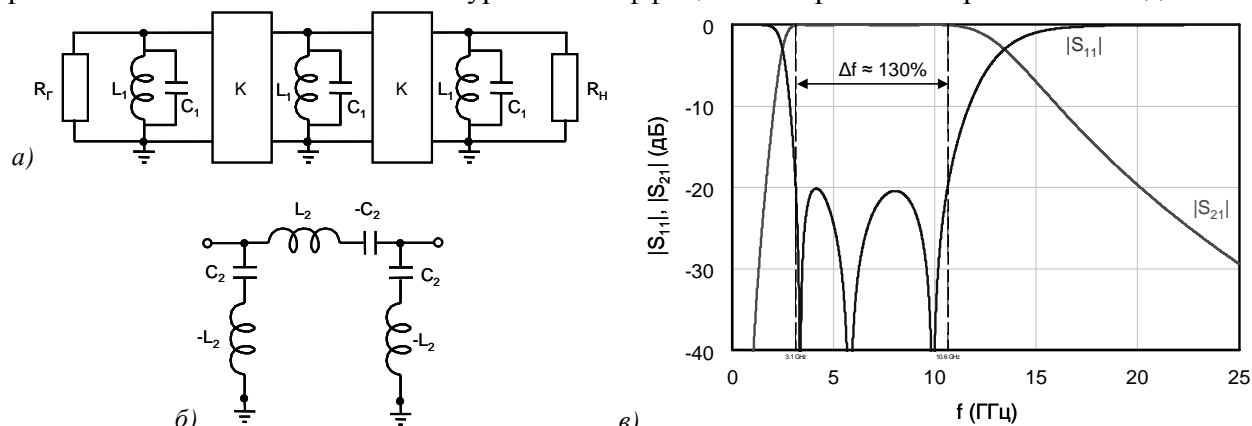


Рис. 3.

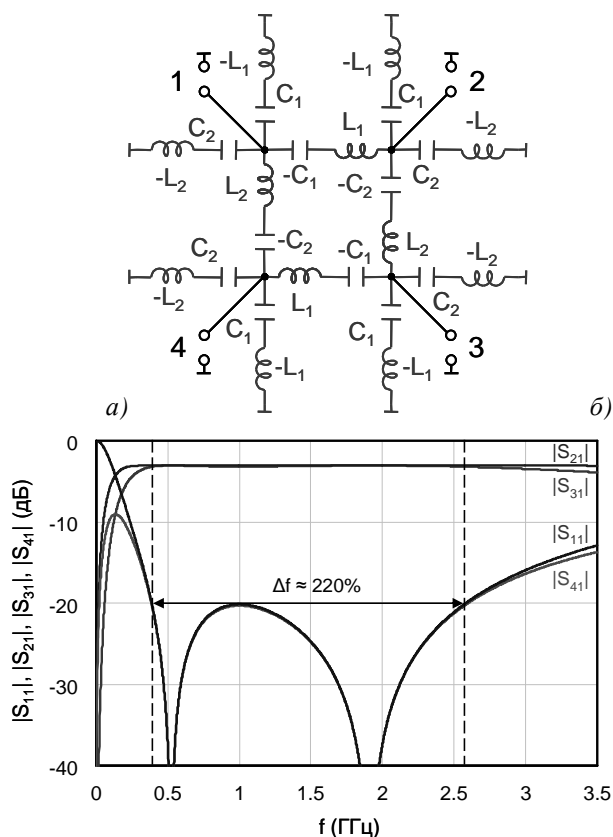


Рис. 4

## Экспериментальная верификация

На Рис. 5-а показана полная эквивалентная схема практической реализации параллельно-включенной квази-постоянной реактивности, представляющей собой последовательное соединение положительной индуктивности и отрицательной емкости. Кроме пары полевых транзисторов, индуктивности  $L$  и емкости  $C$ , которая преобразуется в отрицательную, эквивалентная схема содержит элементы цепей питания и развязки. Тестовая структура была реализована на печатной плате с применением компонентов поверхностного монтажа (Рис. 5-б). Использовались полевые транзисторы NE3210S01 фирмы NEC. Частотная зависимость мнимой части входного импеданса тестовой структуры в режиме выключенного ОКИ, когда емкость  $C$  – положительна, представлена на Рис. 5-в. После включения ОКИ, емкость  $C$  преобразуется в отрицательную, и частотная зависимость мнимой части входного импеданса приобретает вид, показанный на Рис. 5-г. Пунктирные линии соответствуют результатам моделирования, сплошные линии – представляют экспериментальные данные. Во включенном режиме тестовая структура демонстрирует квази-постоянную реактивность в полосе частот шириной в две октавы (0,5–2,0 ГГц).

### Заключение

Показано, что при определенных условиях цепи, состоящие из положительных и нефостеровских отрицательных индуктивных и емкостных элементов, обладают квази-постоянным реактивным сопротивлением в широкой полосе частот. С использованием нефостеровских квази-постоянных реактивностей можно создавать широкополосные инверторы сопротивления/проводимости, на основе которых в свою очередь могут быть созданы широкополосные фильтры и направленные ответвители.

Авторы благодарят проф. И.Б. Вендик за плодотворное обсуждение.

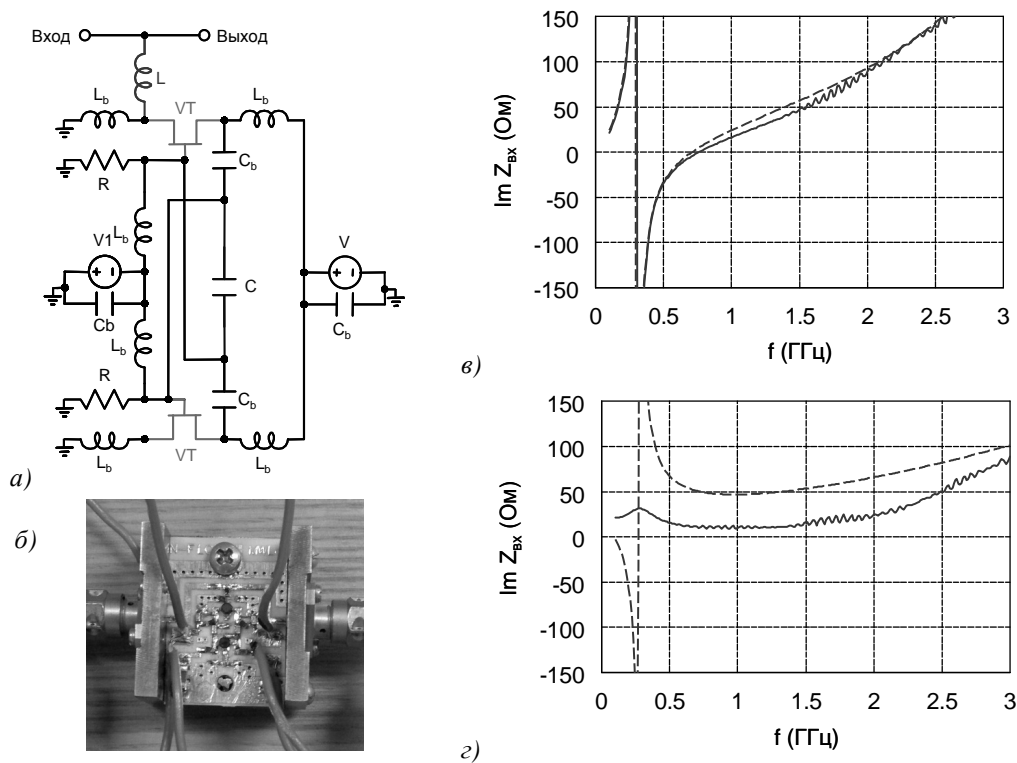


Рис. 5

## Библиографический список

1. Foster, R. M. A reactance theorem [Text] / R. M. Foster // Bell Systems Technical Journal. – 1924. – V.3. – P.259-267.
2. Linvill, J. G. Transistor negative impedance converters [Text] / J. G. Linvill // Proc. IRE. – 1953. – V.41. – P.725-729.
3. Sussman-Fort, S. E. Non-Foster impedance matching of electrically-small antennas [Text] / S. E. Sussman-Fort, R. M. Rudish // IEEE Trans. Antennas and Propagation. – 2009. – V.57, N.8. – P.2230-2241.
4. Mirzaei, H. Squint-free leaky-wave radiation with non-Foster artificial transmission lines [Text] / H. Mirzaei, G. V. Eleftheriades // Proc. of 5th Int. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Barcelona, Spain. – 2011. – P.24-26.
5. Hrabar, S. An update of progress in non-Foster metamaterials [Text] / S. Hrabar, I. Krois, I. Bonic, A. Kirichenko // Proc. of 5th Int. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Barcelona, Spain. – 2011. – P.307-309.
6. Kholodnyak, D. A frequency independent phase inverting all-pass network suitable for a design of ultra-wideband 180° phase shifters [Text] / D. Kholodnyak, V. Turgaliev, A. Rusakov, K. Zemlyakov, I. Vendik // Proc. of 41st European Microwave Conference, Manchester, UK. – 2011. – P.643-646.
7. Маттей, Д. Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи [Текст] / Д. Л. Маттей, Л. Янг, Е. М. Т. Джонс. – Т.2. – М.: Связь, 1972. – 495 С.