

**Е.Н. Воробьев<sup>1</sup>, А.Э. Баскакова<sup>1</sup>, В.М. Тургалиев<sup>1</sup>, Д.В. Холодняк<sup>1</sup>,  
Ш. Кюн<sup>2</sup>, Р. Штефан<sup>2</sup>, К. Блау<sup>2</sup>, М.А. Хайн<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>2</sup> Технический университет г. Ильменау, Германия

## **Подходы к реализации активных перестраиваемых индуктивностей**

*Рассматриваются различные подходы к реализации электрически перестраиваемых индуктивностей на основе транзисторных цепей с обратной связью и с использованием нефостеровской отрицательной индуктивности. Показано, что перестройка индуктивности может осуществляться как за счет изменения рабочей точки транзистора, так и при помощи варикапов, емкость которых изменяется под действием приложенного напряжения.*

**Ключевые слова:** перестраиваемая индуктивность, нефостеровские элементы, отрицательная индуктивность

Перестраиваемые СВЧ-устройства, в частности фильтры, в которых в качестве управляющих элементов используются только конденсаторы с переменной емкостью, имеют ограниченный диапазон перестройки. Помимо этого изменение емкостей схемы при фиксированных значениях индуктивностей приводит к рассогласованию и изменению ширины рабочей полосы частот устройства в процессе перестройки центральной частоты. Для устранения имеющихся ограничений и создания новых перестраиваемых СВЧ-устройств с расширенными функциональными возможностями необходимо наряду с перестраиваемыми емкостями использовать перестраиваемые индуктивности. В работе рассматриваются различные подходы к реализации электрически перестраиваемых индуктивностей на основе активных цепей.

Известны транзисторные схемы с цепью обратной связи, состоящей из резистора и реактивного элемента, которые могут быть использованы в качестве активной индуктивности (рис. 1, а). Емкостно-резистивная или индуктивно-резистивная цепь обратной связи определяет индуктивный характер реактивного сопротивления схемы [1], [2]. Подход к реализации перестраиваемой индуктивности основан на управлении крутизной проходной характеристики транзистора ( $S$ ), которая определяется как отношение изменения тока на выходе к изменению напряжения на входе схемы. Значение эквивалентной индуктивности схемы обратно пропорционально крутизне проходной характеристики транзистора:  $L_{eff} \sim S^{-1}$ .

Для обеспечения работы схемы в качестве индуктивности с высокой добротностью необходимо выполнение ряда условий [1], одним из которых является высокое входное сопротивление транзистора  $R_{in}$ . Входное сопротивление реальных транзисторов сравнительно мало, что обуславливает низкую добротность такой перестраиваемой индуктивности. С целью увеличения добротности реального индуктивного элемента можно последовательно к базе/затвору транзистора включить резистор  $R_{add}$ . На рис. 1, б показан график отношения добротности схемы с дополнительным резистором ( $Q$ ) к добротности такой же схемы без использования резистора ( $Q_0$ ) в зависимости от сопротивления резистора

$R_{add}$ . Введение дополнительного резистора также позволяет увеличить диапазон перестройки индуктивности при значениях  $S < 0,1$  (рис. 1, в), однако добротность индуктивности при этом снижается (рис. 1, г).

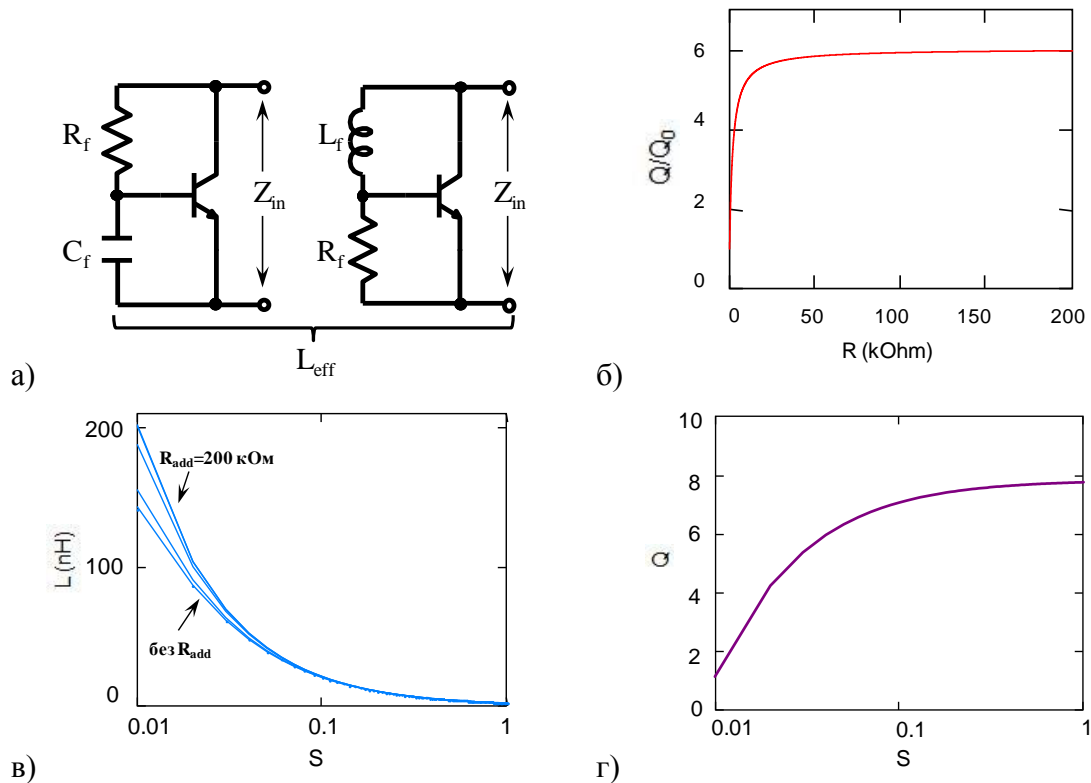


Рисунок 1.

На рис. 2, а показана полная эквивалентная схема перестраиваемой индуктивности, реализованной на основе полевого транзистора NE3210S01, с дополнительным резистором, включенным последовательно к затвору, и с цепями подачи смещения. Параметры элементов эквивалентной схемы:  $R_f = 20$  кОм,  $C_f = 20$  пФ,  $R_{add} = 20$  кОм,  $L_b = 10$  мкГн. Перестройка значений индуктивности схемы осуществлялась за счет управления током  $I_{ds}$  в диапазоне от 50 мА до 100 мА при постоянном напряжении на затворе  $V_{gs} = 0.18$  В. Частотная зависимость входного импеданса, полученная путем схемотехнического моделирования в программном пакете AWR Microwave Office, представлена на рис. 2, б. Перестраиваемая индуктивность работает в частотном диапазоне до 70 МГц. На частоте 53 МГц, где добротность максимальна, индуктивность имеет диапазон перестройки  $\pm 10$  нГн (рис. 2, в), что соответствует  $\pm 6\%$ . При этом добротность составляет  $5.5 \pm 0.5$ , т.е. изменение добротности не превышает  $\pm 10\%$  (рис. 2, г).

По схеме конвертора отрицательного импеданса (КОИ) на биполярных или полевых транзисторах (рис. 3, а) [3], [4], можно реализовать нефостеровскую отрицательную индуктивность  $(-L)$  с реактивным сопротивлением  $X_0(-L) = \omega_0(-L) = -\omega_0 L$ . Значение эквивалентной отрицательной индуктивности такой схемы прямо пропорционально номиналам входящих в нее элементов:  $(-L) \sim R_1 R_2 C_L$ . При использовании в качестве  $C_L$  переменной емкости (варикапа) она преобразуется КОИ в перестраиваемую отрицательную

индуктивность. Последовательное соединение положительной индуктивности  $L_1$  и нефостеровской перестраиваемой отрицательной индуктивности ( $-L_2$ ) реализует перестраиваемую положительную индуктивность, если  $L_1 > L_2$  (рис. 3, б).

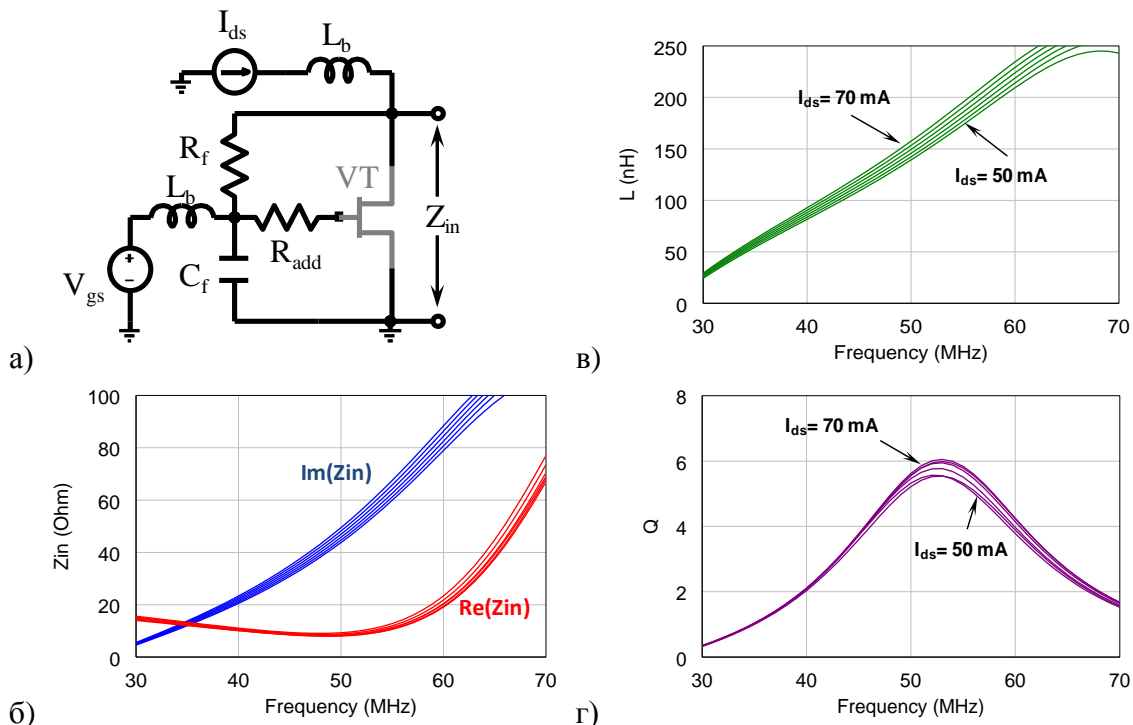


Рисунок 2.

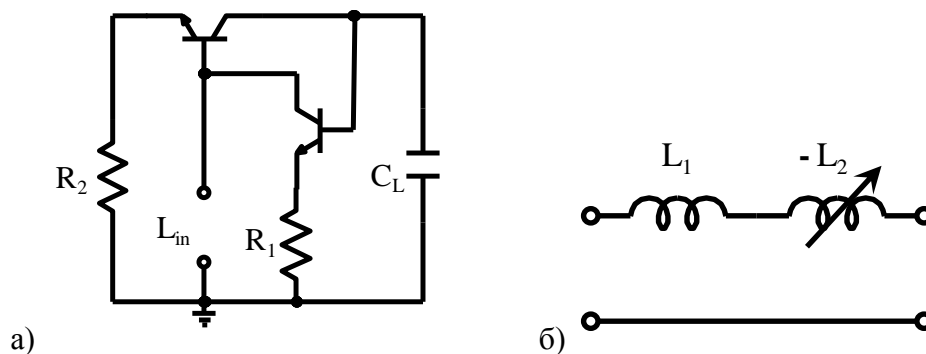


Рисунок 3.

Эквивалентная схема нефостеровской перестраиваемой индуктивности содержит два биполярных транзистора BFG57, варикап SMV1232 и RC-цепи подачи смещения. Значение емкости варактора изменяется от  $C_{var, max} = 4.15$  пФ до  $C_{var, min} = 0.72$  пФ при изменении напряжения в пределах 0–15 В соответственно. Анализ устойчивости схемы нефостеровской перестраиваемой индуктивности по критерию нормированной детерминантной функции (НДФ) показал, что схема является устойчивой, так как годограф НДФ не охватывает начало координат (рис. 4, а). Результаты схемотехнического моделирования частотной зависимости входного импеданса нефостеровской перестраиваемой индуктивности представлены на рис. 4, б. В рабочей полосе частот (50–200 МГц) перестройка эквивалентной индуктивности

схемы составляет  $\pm 15$  нГн, что соответствует  $\pm 6\%$  (рис. 4, в). Добротность перестраиваемой индуктивности лежит в диапазоне 16–48 (рис. 4, г).

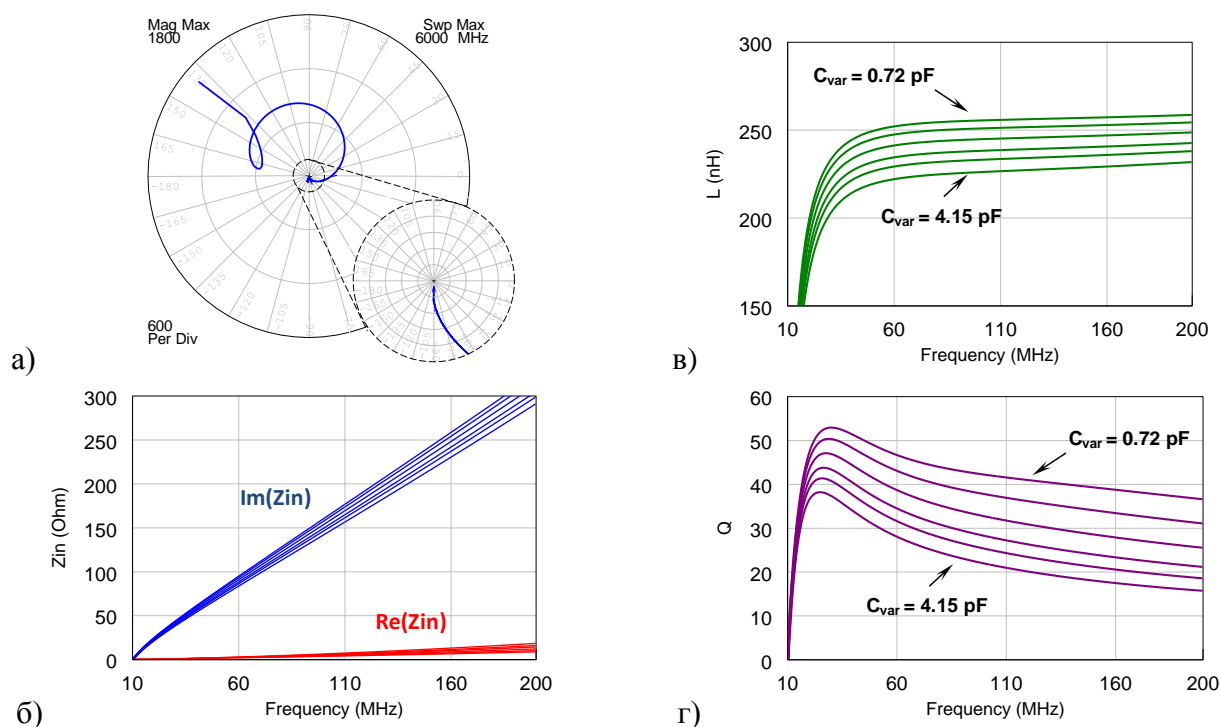


Рисунок 4.

Оба рассмотренных подхода позволяют реализовать активную электрически перестраиваемую индуктивность. Схема нефостеровской перестраиваемой индуктивности является широкополосной и обеспечивает большее значение добротности. В свою очередь, схема на основе транзистора с цепью обратной связи проще с точки зрения практической реализации, т.к. включает в себя меньше элементов.

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

#### Библиографический список

1. Kühn, S. Transistor-based Electrically Tuneable Reactance Circuits for Metamaterial Transmission Lines / S. Kühn, R. Stephan, K. Blau, M. A. Hein // Proc. of 8th German Microwave Conf., Aachen, Germany. – 2014. – P.1-4.
2. Kühn, S. Passive Reciprocal Electronic Tuneable Inductances / S. Kühn, R. Stephan, K. Blau, M. A. Hein // Proc. of 9th German Microwave Conf., Nuremberg, Germany. – 2015. – P.
3. Linvill, J.G. Transistor negative impedance converters / J. G. Linvill // Proc. IRE. – 1953. – V.41. – P.725-729.
4. 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.