

УДК 658.012:681.324; 621.375.133

И.Б. Широков, доцент, канд. техн. наук

Д.В. Лялюк, студент

И.Ф. Филиппов, студент

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, СевНТУ, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: shirokov@ieee.org

ОДНОПОРТОВЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ТРАНЗИСТОРНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Рассмотрены этапы проектирования и моделирования однопортового резонансного транзисторного усилителя, состоящего из полевого транзистора и резонансного колебательного контура. Приведены результаты испытаний усилителя. Предложена методика расчёта конструктивных индуктивностей генератора Хартли, эквивалентного по своей структуре рассмотренному однопортовому усилителю. Проанализированы преимущества применения данного усилителя в активных транспондерах системы радиочастотной идентификации.

Ключевые слова: *однопортовый усилитель, полевой транзистор, положительная обратная связь, регенеративный усилитель, система радиочастотной идентификации.*

В настоящее время повсеместным является применение в радиотехнических системах активных и пассивных приёмопередающих устройств — транспондеров. Наиболее широкое применение транспондеры находят в динамично развивающейся технологии радиочастотной идентификации RFID (Radio Frequency Identification), которая обеспечивает автоматическую идентификацию объектов и дистанционное считывание данных, хранящихся в памяти транспондеров (RFID-меток).

Технология RFID применяется в промышленности, системах контроля и управления доступом, при проведении транспортных и бытовых платежей. Посредством RFID также возможно позиционирование перемещающихся объектов в реальном масштабе времени.

В составе многочисленных видов современных активных транспондеров используются разнообразные типы радиочастотных и микроволновых усилителей, позволяющих увеличить дальность действия RFID-системы, а также существенно снизить мощности сигналов, излучаемых считывателями (интеррогаторами) [1]. Характеристики усилителя напрямую определяют качественные параметры как самого транспондера, так и всей системы в целом. Качественные частотные и низкие шумовые характеристики, высокий коэффициент усиления, стабильность работы, малый уровень потребляемой и излучаемой мощности — все это является важнейшими свойствами усилителей, определяющими успешность внедрения и применения RFID-системы.

Таким образом, при построении различного вида транспондеров, крайне необходимым является наличие простого, стабильного и надёжного усилителя, не нуждающегося в дополнительных настройках в процессе его эксплуатации. В ряде применений, важной особенностью усилителя, входящего в состав транспондера, является наличие единственного порта ввода/вывода. Другими словами, усиленная (отражённая) волна должна сниматься с той же клеммы, что и падающая, принимаемая антенной транспондера. Подобный однопортовый транзисторный усилитель был хорошо изучен, и описан, например, в [2].

Целью данной работы является разработка простого высокостабильного однопортового резонансного транзисторного усилителя, не требующего специальной настройки, и работающего как в микроволновом, так и в радиочастотном диапазонах длин волн.

В настоящей работе описан модифицированный вариант однопортового усилителя [3], являющегося по своей структуре эквивалентом генератора Хартли (Hartley Oscillator), построенного по схеме индуктивной трехточки. Принципиальная схема однопортового резонансного транзисторного усилителя показана на рисунке 1 [3].

Работает устройство следующим образом. Входной сигнал $u_i(t)$ поступает на отвод конструктивной индуктивности L_p , «холодный» вывод которой соединен с общим проводом, а «горячий» — соединен с первым затвором полевого транзистора. Этот сигнал (напряжение) вызывает модуляцию проводимости канала полевого транзистора VT , что, в свою очередь, вызывает модуляцию тока, протекающего под действием источника питания от стока транзистора к его истоку. При этом в последовательной колебательной системе, образованной конструктивной индуктивностью L_p и емкостями переходов затвор-исток и затвор-сток, возбуждаются колебания, синфазные с входным напряжением.

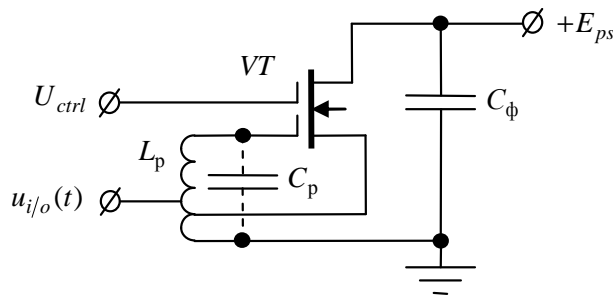


Рисунок 1 – Принципиальная схема отражательного регенеративного однопортового резонансного транзисторного усилителя

За счет непосредственного подключения истока полевого транзистора VT к одному из отводов конструктивной индуктивности L_p , в цепи затвор-исток полевого транзистора возникает сильная положительная обратная связь по току, и на отводе индуктивности осуществляется синфазное сложение сигналов при выполнении условия баланса фаз в замкнутом кольце обратной связи. Положение данного отвода выбирается с точки зрения соответствия входного/выходного сопротивления усилителя, которое должно быть согласовано с волновым сопротивлением фидера. Очевидно, что усиление схемы наблюдается в том случае, если амплитуда отраженной волны будет больше, чем амплитуда падающей. Максимальной величины усиления схема достигает при резонансе колебательной системы.

Разделяют отраженную и падающую волну с помощью циркулятора или направленного ответвителя. Вместе с тем, возможно непосредственное подключение однопортового усилителя к приемо-передающей антенне, что является наиболее благоприятным вариантом при построении транспондеров RFID, поскольку в данном случае упрощается конструкция и снижается общая стоимость.

Под действием управляющего напряжения U_{ctrl} изменяется крутизна передаточной характеристики полевого транзистора, таким образом обеспечивается регулировка коэффициента усиления в процессе его эксплуатации.

Конденсатор C_ϕ шунтирует сток полевого транзистора с общим проводом по переменному току. Применение резонансного конденсатора C_p , показанного пунктирной линией, позволяет производить подстройку усилителя в определенных частотном диапазоне. Однако, его использование приводит к снижению коэффициента усиления, поскольку добротность резонансной системы в этом случае падает.

Рекомендуется использование именно двухзатворного полевого транзистора, но при необходимости данный усилитель можно реализовать и на однозатворном полевом транзисторе. В этом случае необходимо предусмотреть использование дополнительных элементов — развязывающих резисторов и конденсаторов, а также дополнительного источника управляющего напряжения.

Необходимо отметить, что для данной схемы не допускается выполнение баланса амплитуд, что может привести к самовозбуждению усилителя. Баланс фаз, как было сказано ранее, для осуществления положительной обратной связи является обязательным условием работы, и он выполняется автоматически на любой частоте за счет автотрансформаторного подключения индуктивности.

Разработан простейший алгоритм расчёта индуктивностей микроволнового усилителя на однозатворном полевом транзисторе. В качестве усилительного элемента использовался малошумящий полевой транзистор NE3210S01 с n-каналом фирмы NEC. Необходимо отметить, что точный расчет влияния всех паразитных составляющих, обеспечивающих в совокупности с внешними резонансными цепями положительную обратную связь, за счет которой происходит синфазное сложение и усиления микроволновых сигналов, является довольно трудоемкой задачей. Поэтому экспериментально было установлено, что оптимальным, с точки зрения отсутствия генерации схемы в рабочем режиме, а так же получения максимального коэффициента усиления в диапазоне частот от 200 МГц до 2,2 ГГц коэффициентом включения индуктивности является $p_{opt} = 0,684$, причем

$$p = \frac{L_1}{L_1 + L_2},$$

где L_1 и L_2 — индуктивности сегментов общей конструктивной индуктивности.

Приведём решение конкретной задачи. Примем входное сопротивление источника сигнала равным 50 Ом, и крутизну передаточной характеристики полевого транзистора постоянной. Тогда номиналы индуктивностей можно рассчитать по приближенной формуле

$$L = \frac{1 - p_{opt}}{(2\pi f)^2 (C_{gs} + C_{gd})} - \frac{L_g L_s}{L_g + L_s},$$

где $L = L_1 + L_2$ — суммарная индуктивность; p_{opt} — оптимальный коэффициент включения индуктивности; f — необходимая рабочая частота; C_{gs}, C_{gd} — паразитные емкости переходов затвор-исток, затвор-сток соответственно; L_g, L_s — паразитные индуктивности затвора и истока соответственно.

Зная суммарную индуктивность L , а также оптимальный коэффициент включения p_{opt} , можем определить параметры частотозадающих элементов L_1 и L_2 . Выбранный коэффициент $p = 0,684$, в идеальном случае, обеспечивает усиление микроволнового сигнала вплоть до (28...33) дБ, а номиналы индуктивностей L_1 и L_2 определяются с точностью до долей наногенри.

На рисунке 2 показана частотная зависимость коэффициента усиления микроволнового однопортового регенеративного усилителя, рассчитанного по предложенной методике при различных коэффициентах включения конструктивной индуктивности (при фиксированной суммарной индуктивности).

Для предотвращения генерации следует изначально определить критический режим работы усилителя, после чего один из его параметров (крутизну характеристики транзистора, коэффициент включения индуктивности) изменить, например, на 10%. Подобным образом обеспечивается стабильная работа усилителя в широком диапазоне дестабилизирующих факторов, с учётом разброса параметров электронных компонентов при его массовом производстве.

Аналогичный подход дает возможность проектировать однопортовые транзисторные усилители и в радиочастотном диапазоне длин волн. Ниже приведены результаты симуляции и экспериментальные исследования однопортового резонансного транзисторного усилителя, работающего на не лицензируемой частоте 433 МГц, предназначенной, в том числе, и для использования в частных системах RFID.

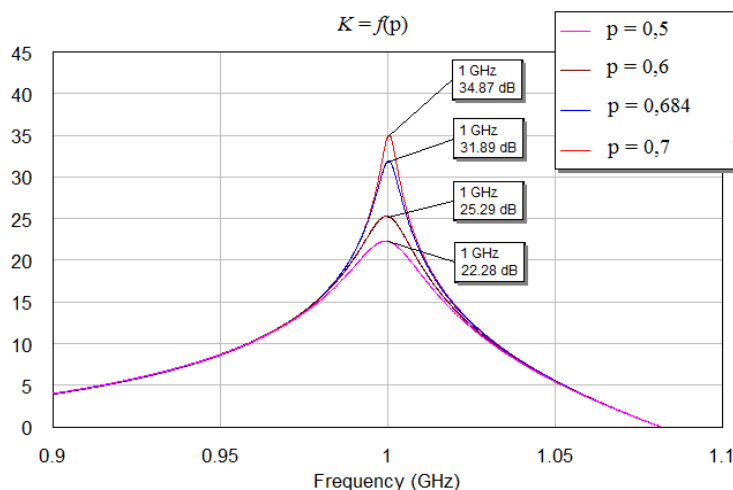


Рисунок 2 — Зависимость коэффициента усиления усилителя от коэффициента включения конструктивной индуктивности при постоянной суммарной индуктивности L

В качестве активного элемента был выбран двухзатворный полевой транзистор BF998 фирмы NXP Semiconductors. Средой симуляции являлся пакет AWR Microwave Office 2009 при дополнительном использовании соответствующей SPICE-модели активного элемента, поставляемой производителем. Эмулируемая модель однопортового усилителя показана на рисунке 3.

В качестве материала подложки усилителя был выбран стандартный двухсторонний стеклотекстолит типа FR-4, которому присущ ряд недостатков по сравнению, например, с материалом ФАФ-4, однако для рабочего частотного диапазона (400...500 МГц) свойства выбранного материала оказались удовлетворительными. Топология печатной платы усилителя показана на рисунке 4.

Конструктивная индуктивность усилителя была выполнена в виде микрополосковой линии передачи. При определённых условиях такая линия эквивалентна катушке индуктивности с отводами. Для разделения падающей и отраженной волн при симуляции использовался идеализированный циркулятор без вносимых потерь и развязкой в -50 дБ. Напряжение питания E_{ps} было выбрано 8 В, а управляющее напряжение U_{ctrl} варьировалось от 0 до 5 В. Результаты симуляции работы усилителя в программном пакете Microwave Office 2009 показаны на рисунке 5.

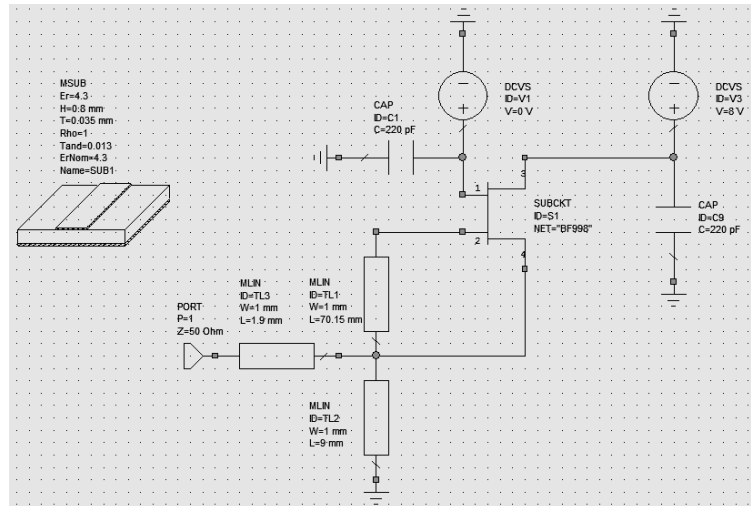


Рисунок 3 — Эмулируемая схема однопортового резонансного транзисторного усилителя в пакете Microwave Office

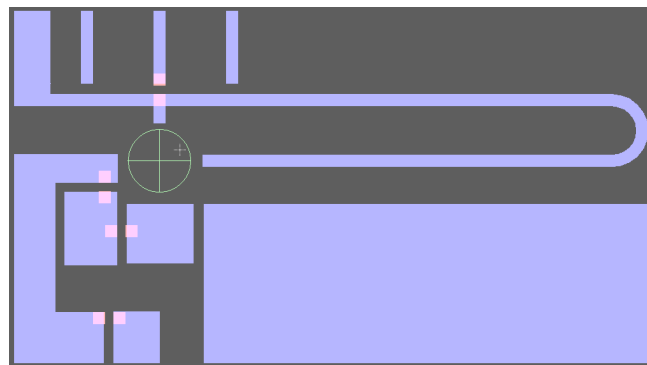


Рисунок 4 — Топология печатной платы однопортового резонансного транзисторного усилителя

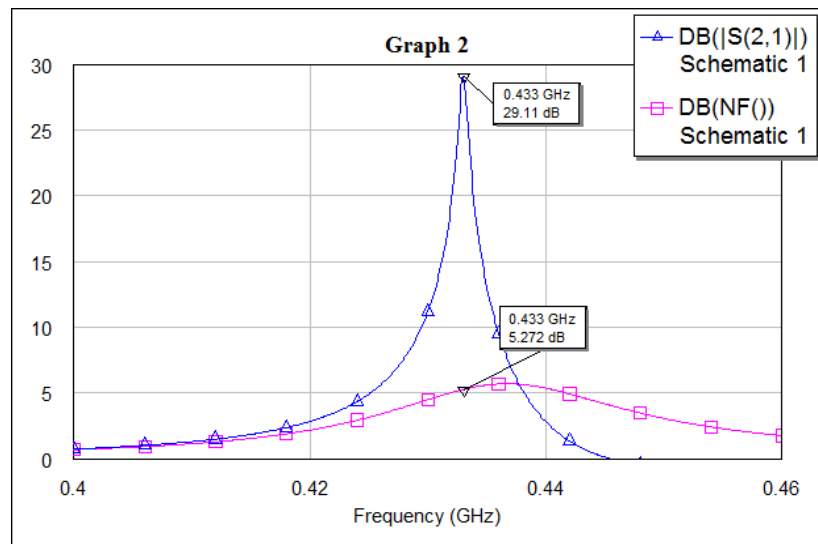


Рисунок 5 — Зависимости коэффициента передачи и коэффициента шума усилителя от частоты

Из рисунка 5 видно, что коэффициент усиления достигает величины 29 дБ при коэффициенте шума в 5,3 дБ на выбранной частоте. Полоса пропускания на уровне -3 дБ составляет 2 МГц или 0,5%. Полученный результат не является предельно достижимым, принимая во внимание возможность использования более современной элементной базы, например, полевого СВЧ транзистора NE3210S01, для которого был приведен расчёт индуктивностей усилителя. Транзистор NE3210S01 обладает лучшими техническими характеристиками, и требует меньшего напряжения питания, порядка (1...3) В. Производя симуляцию работы усилителя на указанном полевом транзисторе, можно получить стабильное усиления

вплоть до 40 дБ при уровне шумов не более 2 дБ, что успешно подтвердилось при непосредственном тестировании изготовленных прототипов усилителей.

На рисунке 6 показан внешний вид резонансного однопортового усилителя, настроенного на частоту 433 МГц, в процессе его тестирования. Усилитель был выполнен на отечественном полевом транзисторе типа КП327А, являющегося приблизительным аналогом транзистора ВФ998.

Измерения проводились с помощью стандартного измерителя КСВ и ослабления типа Р2-102. При проведении измерений использовалась следующая методика. На выходе генератора измерительной установки устанавливался определённый уровень мощности падающей волны, после чего к выходу измерительного моста устройства присоединялся короткозамыкатель. Таким образом, уровень мощности отражённой волны оказывался равным уровню мощности падающей. Согласно справочным данным измерителя, данный уровень составлял примерно 0 дБм, принимая во внимание наличие внешнего 10 дБ фиксированного аттенюатора. После чего короткозамыкатель отсоединялся, и к выходу измерительного моста устройства подсоединялся аттенюатор с фиксированным ослаблением 20 дБ, уже к выходу которого подсоединялся короткозамыкатель. Таким образом, ослабление отражённой волны на входе измерительного моста составляло 40 дБ, принимая во внимание то, что через один и тот же аттенюатор проходит как падающая, так и отражённая волны. Затем короткозамыкатель повторно отсоединялся и к выходу аттенюатора подсоединялся однопортовый резонансный транзисторный усилитель. Превышение уровня отражённой волны отметки -40 дБ означало наличие усиления сигнала.



Рисунок 6 — Внешний вид усилителя

Диапазон частот индикатора был установлен в пределах от 380 МГц до 480 МГц, со шкалой частот в 10 МГц/дел. По оси Y была установлена шкала 5 дБ/дел. Значение управляющего напряжения, подаваемого на второй затвор полевого транзистора составляло 1,5 В, а потребляемый усилителем ток составлял 2 мА при напряжении питания 9 В. На рисунке 7 показаны результаты экспериментальных измерений коэффициента усиления изготовленного усилителя.



Рисунок 7 — Вид экспериментальной частотной характеристики усилителя на экране индикаторного устройства

Достигнутое усиление составляло приблизительно 30 дБ (-10 дБ от изначально установленного уровня мощности сигнала при наличии 20 дБ фиксированного аттенюатора). Полоса пропускания усилителя составляла 2 МГц по уровню -3 дБ или около 0,5 %. Полученные данные говорят о высоком соответствии теоретических и экспериментальных исследований. Небольшое расхождение в форме резонансной кривой теоретических и экспериментальных данных обусловлено, на наш взгляд, несколько различными типами транзисторов, используемых при симуляции и практической реализации.

Таким образом, были разработаны два варианта однопортового резонансного транзисторного усилителя, по своей структуре напоминающие давно известную схему генератора Хартли, но в нашем

случає, працюючого в режимі посилення радіосигналів при повному відсутстві генерації сигналів. Дані рекомендації по вибору елементної бази усилителя, розрахуку індуктивностей схеми, а також налаштуванню та експлуатації пристрою. При практичній реалізації усилителя досягнуті високі технічні показники (коефіцієнт посилення, енергопотреблення, шуми і пр.) в умовах його стабільної роботи. К достоїнствам розробленого усилителя слід віднести простоту конструкції і повне відсутство процесу налаштування. Більше того, використання однопортового усилителя разом з зовнішнім циркулятором відкриває хороші перспективи для заміни традиційних двупортових транзисторних усилителів, володіючих гіршими електричними параметрами.

Оскільки для однопортової схеми достатньо складно отримати однозначні результати при обчисленні її S-параметрів, які, безумовно, розроблялись для стандартних схем проходних усилителів, що містять клемму для подачі і зняття сигналів, а також приймаючи до уваги той факт, що робота в режимі повного відображення корисного сигналу ($|S_{11}| \gg 1$) ставить на перший план питання узгодження усилителя з підводимою до нього лінійною передачею, і виконання компенсації можливих відображень в вхідному тракту, які можуть викликати його самовозбудження, то завданнями подальших досліджень будуть являтися пошук і обґрунтування нових технічних рішень, що дозволять розв'язати вище описані проблеми з одночасним збереженням всіх описаних позитивних якостей однопортової схемної реалізації.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Shirokov I.B. The Multitag Microwave RFID System with Extended Operation Range / I.B. Shirokov // *Chipless and Convention Radio Frequency Identification: Systems for Ubiquitous Tagging*. — Hershey PA.: IGI Global, 2012. — P. 197–217.
2. Venguer A.P. Low Noise One-Port Microwave Transistor Amplifier / A.P. Venguer, J.L. Medina, R.A. Chávez, A. Velázquez // *Microwave and Optical Technology Letters*. — 2002. — Vol. 33. — No 3. — P. 100–104.
3. Пат. № 102751 Україна, МПК H03F 3/189, H03F 3/19, H03F 3/04. Однопортовий резонансний транзисторний підсилювач Широкова / І.Б. Широков; заявник та патентовласник І.Б. Широков.— № а201114351; заявл. 05.12.2011; опубл. 12.08.2013, Бюл. № 15.

Поступила в редакцію 27.08.2013 г.

Широков І.Б., Лялюк Д.В., Філіппов І.Ф. Однопортовий резонансний транзисторний підсилювач

Розглянуті етапи проектування та моделювання, наведені результати випробувань однопортового резонансного транзисторного підсилювача, що складається з польового транзистора і резонансного коливального контуру. Наведено алгоритм розрахунку індуктивностей генератора Хартлі, що за своєю структурою є еквівалентним розглянутому однопортовому підсилювачу. Проаналізовані переваги застосування даного підсилювача у складі активних транспондерів системи радіочастотної ідентифікації.

Ключові слова: однопортовий підсилювач, польовий транзистор, позитивний зворотній зв'язок, регенеративний підсилювач, система радіочастотної ідентифікації.

Shirokov I.B., Lyalyuk D.V., Filippov I.F. One-port resonant transistor amplifier

The stages of design and simulation are considered. The test results of one-port resonant transistor amplifier which consists of a field-effect transistor and a resonant circuit are shown. The algorithm of calculating the inductance of the generator Hartley, which in its structure is an equivalent to a one-port amplifier, is shown. The advantages of using this amplifier in the active transponder for radio frequency identification system are analyzed.

Keywords: one-port amplifier, field-effect transistor, positive feedback, a regenerative amplifier, radio frequency identification system.