

УДК 621.374.4

ОБЗОР ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ УМНОЖИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ (ЧАСТЬ 1)

Е.М. Савченко^{1,2,3}, Е.С. Дрозденко¹

¹АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27;

²ФГБОУ ВО РТУ МИРЭА, 119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78;

³АО «ГЗ «Пульсар», 105187, Москва, Окружной проезд, д. 27

Первая часть статьи посвящена вопросам зарождения и развития умножителей частоты с момента появления первых работ в области генерации радиотехнических сигналов для осуществления передачи информации. Рассматриваются электромагнитные, электровакуумные и твердотельные умножители частоты. Показаны базовые принципы умножения частоты сигнала, использующие характеристики нелинейных элементов с активным и реактивным сопротивлением.

Ключевые слова: умножение частоты, статический электромагнитный преобразователь, нелинейная ёмкость, нелинейное сопротивление, варактор, удвоитель частоты, СВЧ

Сведения об авторах: Савченко Евгений Матвеевич, к.т.н., savchenko@pulsarnpp.ru; Дрозденко Евгений Сергеевич, drozdenko@pulsarnpp.ru

OVERVIEW OF THE MAIN STAGES OF THE ORIGIN AND DEVELOPMENT OF RADIO ENGINEERING FREQUENCY MULTIPLIERS (PART 1)

E.M. Savchenko^{1,2,3}, E.S. Drozdenko¹

¹S&PE PuIsar JSC, 105187, Moscow, Okrzhnoy Pr., 27;

²Russian Technological University MIREA, 119454, Moscow, Vernadsky Ave., 78;

³GZ PuIsar JSC, 105187, Moscow, Okrzhnoy Pr., 27

The first part of the article is dedicated to the origin and development of frequency multipliers, starting with the appearance of the first publications in the field of radio signal generation for data transmission. Electromagnetic, electrovacuum and solid-state frequency multipliers are considered. The basic principles of signal frequency multiplication are shown using the characteristics of nonlinear elements with active and reactive resistance.

Keywords: frequency multiplication, static electromagnetic converter, nonlinear capacity, nonlinear resistance, varactor, frequency doubler, microwave

Authors: Savchenko Evgeniy Matveevich, Candidate of Engineering Sciences, savchenko@pulsarnpp.ru; Drozdenko Evgeniy Sergeevich, drozdenko@pulsarnpp.ru

Введение

Импортозамещающие разработки сверхвысокочастотной электронной компонентной базы [1, 2], а также создание их моделей для САПР [3, 4] в контексте цифровизации промышленности являются одной из важнейших задач, стоящих перед российской радиоэлектроникой. Одним из значимых классов СВЧ ЭКБ являются преобразователи частоты [5-7], частным случаем которых являются умножители частоты [8-10], использующиеся для формирования сложных радиотехнических сигналов [11]. С точки зрения дальнейшего развития этого направления важным является рассмотрение истории их возникновения и становления этого направления, а также систематизация и анализ накопленных результатов разработки и создания подобных устройств.

Появление умножителей частоты связано с развитием систем передачи электромагнитных колебаний. С конца XIX века сложилась следующая последовательность развития данных систем [12]:

- передатчики искрового типа (1895 год – использовался А.С. Поповым при демонстрации радиотелеграфа, совершенствовался до 1907 года);

- передатчики дугового типа (1903 год – впервые применён датским физиком Поульсенем в его радиостанции, но широкое распространение получает после 1912 года);

- машины высокой частоты (1906 год – построена первая машина Александерсона, широкое распространение получает после 1915 года вплоть до 1930 года);

- ламповые передатчики (отличались высоким КПД и гибким управлением при

генерировании высоких частот по сравнению с предыдущими тремя группами);

- полупроводниковые передатчики (обеспечили уменьшение размеров, увеличение КПД и повышение надёжности по сравнению с предыдущей группой).

Электромагнитные умножители частоты

Передатчики искрового типа имели на выходе затухающие колебания, во время работы создавали сильные помехи, к тому же передавать сигналы мощностью более 2 кВт с помощью передатчика искрового типа было практически сложно, т.к. во время разрядов выделялось большое количество тепла.

Вольтова дуга в передатчиках дугового типа позволяла получать незатухающие колебания большой мощности (например, до 1,2 МВт в 1922 году), но короткие волны такими передатчиками получить было невозможно.

В передатчиках на основе машины высокой частоты получаемые колебания приходилось пропускать через статические электромагнитные преобразователи (умножители) частоты, т.к. на выходе самой машины частота сигнала была относительно невелика. Первыми магнитными умножителями частоты были работы Эпштейна (патент 1902 года), Гольдшмидта (1908 год), проф. В. П. Вологодина (1920 год).

Эпштейн в 1902 году получил патент на метод удвоения частоты [13]. Устройство представляло собой трансформатор с подмагничиванием. Умножение частоты осуществлялось за счёт нелинейной характеристики трансформатора (зависимости

индуктивностей обмоток трансформатора от протекающего в них тока). Цепь нагрузки вторичной обмотки настраивалась в резонанс на вторую гармонику. Позже М. Жоли и В. Арко усовершенствовали схему Эпштейна. Схема Жоли-Арко приведена на рис. 1а. Вторичные обмотки соединены встречно, поэтому нечётные гармоники на выходе взаимно компенсируются, а чётные – складываются. Если во вторичную цепь включить резонансный контур, настроенный на вторую гармонику, возможно получить выходной сигнал с подавленными четвертой, шестой и т.д. гармониками, при этом мощность второй гармоники увеличится. Утроитель частоты приведён на рис. 1б.

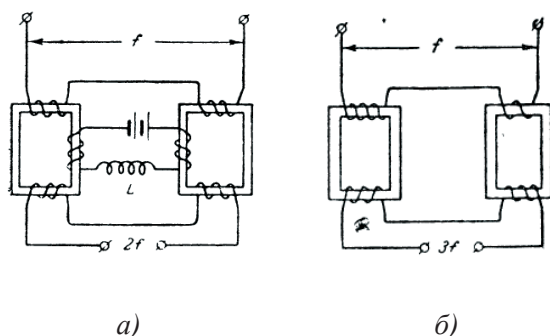


Рис. 1

Магнитный удвоитель частоты Жоли-Арко (а) и магнитный утроитель частоты Жоли-Валлори (б)

Гольдшмидт в 1915 году опубликовал статью [14], в которой привёл описания умножителей частоты на 2, 3 и 4 трансформаторного типа, в том числе удвоитель Жоли-Арко (рис. 1а). На практике Гольдшмидт реализовал именно трансформаторный тип умножителя [15].

Помимо описания умножителей частоты трансформаторного типа в статье [14], Гольдшмидт предлагает на основе

патента Петерсена [16] метод умножения частоты в целое число раз без использования трансформаторов. Статья Гольдшмидта [14] является первой работой, в которой впервые предложен (без реализации на практике) метод умножения частоты за счёт изменения ёмкости конденсаторов. Изначально Петерсен предложил схему машины высокой частоты на принципе изменения ёмкости конденсаторов, подключённых к источнику постоянного напряжения (рис. 2).

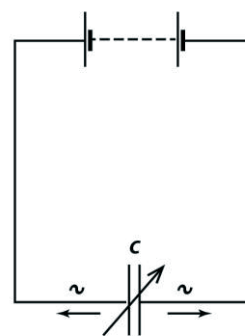


Рис. 2

Принцип работы машины Петерсена

Если циклически изменять ёмкость конденсатора в цепи постоянного напряжения (либо путём смещения обкладок друг относительно друга, либо путём изменения диэлектрической постоянной материала между обкладками), через конденсатор начнёт протекать ток с частотой изменения его ёмкости. Далее Гольдшмидт предлагает подключить к машине Петерсена ($R1$) вторую машину ($R2$), при этом частота и фаза вращения второй машины должны совпадать с частотой и фазой выходного сигнала первой машины (рис. 3). Подключение должно проводиться через катушку $L1$, номинал которой выбирается таким,

чтобы обеспечивался резонанс в цепи её установки ($\omega^2 LC = 1$).

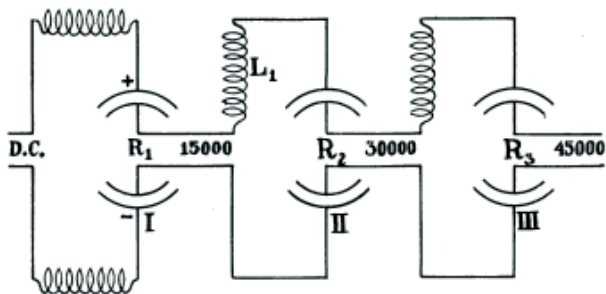


Рис. 3

Принцип работы умножителя Гольдсмитта, 1915 год

При условии синхронного вращения машины R_2 в поле с напряжённостью, создаваемой генератором R_1 , на выходе генератора R_1 возможно наблюдать сигнал удвоенной частоты. Пусть $\omega = 2\pi f_1$ – частота сигнала на выходе машины R_1 . Мгновенное значение напряжения на её выводах при этом равно:

$$u = U_m \sin \omega t.$$

Пусть $\theta = \omega t$ – угол поворота пластин машины R_2 относительно вертикали (рис. 3). Мгновенное значение разности потенциалов на выходе машины R_2 будет равно:

$$u = mU_m \sin \omega t \cos \omega t,$$

где m – некая постоянная.

И если обеспечить синхронное вращение пластин генератора R_2 относительно электрического поля, возникающего в его обкладках, то $\omega = \omega$, и напряжение на выходе машины R_2 будет равно:

$$u = \frac{m}{2} U_m \sin 2\omega t,$$

т.е. на выходе будет наблюдаться сигнал удвоенной частоты. К машине R_2 можно будет подключить следующую машину – R_3 , соответственно подобрав номинал индуктивности в её цепи.

Л. Дрейфус в своей работе [17] привёл метод расчёта второй гармоники напряжения умножителя Жоли-Арко при синусоидальном токе в первичной обмотке, но при отсутствии нагрузки. В работе проф. В.П. Вологодина и М.А. Спицына [18] приведён графический метод расчёта умножителей трансформаторного типа. Априори предполагается, что как входной, так и выходной токи синусоидальны. Сложность использования данного метода – в отсутствии заранее известного значения разности фаз входного тока и выходного тока полезной гармоники. В схемах с магнитными умножителями В.П. Вологдину удалось практически реализовать повышение рабочих частот до 45 кГц при полезной мощности $P = 120$ кВт.

В [13] приведено сравнение известных схем утроителей частоты магнитного типа. Как вывод: если возможно построение источника трёхфазного сигнала, то трёхфазный утроитель позволяет получить при прочих равных условиях амплитуду третьей гармоники большую, чем в остальных утроителях (рассматривались схемы Жоли, трёхтрансформаторная и однотрансформаторная схемы).

Важным в работах учёных и исследователей, занимающихся вопросами электромагнитных преобразователей частоты, является понимание первоначальной идеи о том, что для целей умножения колебаний необходимо исказить форму тока в цепи или напряжения на каком-либо элементе

цепи, т.е. необходимо сделать их несинусоидальными. Исторически сложилось так, что первым в использовании нелинейным элементом был трансформатор (насыщенный дроссель).

В работе [20] приводится систематизация и обобщение информации в части схем статических магнитных преобразователей частоты и их применения.

Электровакуумные умножители частоты

Разработка лампы мощностью 100 кВт с водяным охлаждением М.А. Бонч-Бруевичем в 1925 году позволила осуществить постепенный переход от искровых, дуговых и машинных передатчиков к ламповым передатчикам. С исторической точки зрения, начиная с 1930 года, основными радиотехническими умножителями частоты становятся схемы с использованием вакуумных ламп в качестве нелинейного элемента. И данная тенденция сохраняется вплоть до появления полупроводниковых устройств, после чего СВЧ умножители частоты начинают развиваться двумя направлениями: маломощные умножители на основе полупроводниковых диодов и мощные и сверхмощные – на основе ламп.

Умножение частоты в ламповом умножителе возможно вследствие несинусоидальной формы анодного тока, содержащего, кроме составляющей основной частоты, также составляющие высших гармоник, частоты которых кратны основной частоте. Настраивая анодный контур в резонанс на одну из этих кратных частот, можно при большой добротности контура выделить в нём практически в чистом виде колебания, частота которых кратна частоте

напряжения возбуждения, подаваемого на сетку лампы данного каскада. Принципиальная схема каскада умножения частоты приведена на рис. 4.

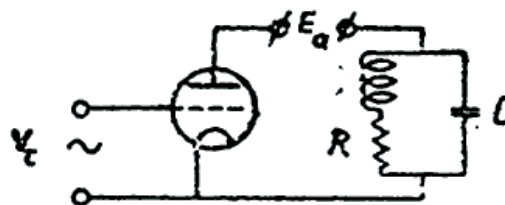


Рис. 4

Однокаскадный ламповый умножитель частоты, 1932 год

В [21] приведены примеры расчёта удвоителя и утроителя частоты на основе электронных ламп. КПД и полезная мощность, отдаваемые лампой в случае умножения частоты, значительно меньше, чем в случае работы той же лампы в усилительном режиме. Соответственно меньше и коэффициент усиления по мощности. В случае удвоения частоты полезная мощность в 1,5...2 раза меньше мощности при усилении [22].

Для класса умножителей частоты с колебательным контуром в нагрузке (для схем с любым типом одиночного нелинейного элемента), так называемых резонансных схем умножителей частоты, характерен принципиальный недостаток – данные схемы являются узкополосными. Если исключить выходной колебательный контур из цепи нагрузки, мощность первой гармоники будет сравнима либо будет больше мощности второй гармоники, даже если режим работы каскада будет соответствовать режиму умножения (например, углу отсечки $\theta = 60^\circ$ для лампового удвоителя).

Поэтому, если требуется построить широкополосный умножитель частоты, задачу решают на схемотехническом уровне – выбирают такое включение нелинейных элементов, при котором нет необходимости использовать резонансные контуры для выделения полезного сигнала. При этом резонансные контуры могут быть использованы для улучшения подавления паразитных гармоник.

Например, в [27] приведена схема умножителя частоты, выполненная на двух лампах и работающая по двухтактной схеме с параллельным включением анодов (рис. 5). В результате такого включения анодные токи нечётных гармоник разных ламп (в том числе и токи первой гармоники), сдвинутые в контуре относительно друг друга на 180° , взаимно уничтожаются. Токи чётных гармоник, наоборот, совпадают по фазе. Если резонансные контуры по входу и выходу схемы исключить, возможно построение широкополосной схемы.

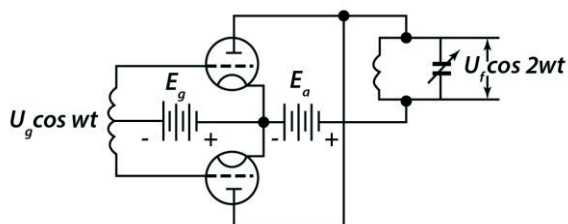


Рис. 5

Двухтактный удвоитель частоты с анодной связью, 1969 год

Твердотельные умножители частоты

Следует отметить, что работа Гольдшмидта [14] – один из первых источников, в котором рассматривалась возможность использования нелинейной ёмкости

при генерации гармоник. Далее способ умножения частоты с помощью нелинейной ёмкости будет использован в целом классе устройств на основе варикапов и диодов с накоплением заряда.

Так, в статье В.П. Вологодина [19] от 1946 года на фоне параллельно существующих направлений развития умножителей частоты уже на электронных лампах и магнитных умножителей предложен новый способ умножения частоты, отработанный на практике, – метод на основе градиента поля диэлектрика конденсатора (использование в качестве диэлектрика сегнетовой соли было предложено В.П. Вологдиным еще в 1928 году).

Можно отметить, что до использования метода градиента поля диэлектрика В.П. Вологдиным делались попытки создания умножителей частоты при помощи ртутных и ионных вентилях (1922 год), но работы остались незаконченными (позже, через 25 лет, американцы создали свои умножители на основе ртутных вентилях – экситроны).

Один из основных недостатков магнитных умножителей – малый КПД. Замена ферромагнетика диэлектриком была продиктована желанием избавиться от введения в рабочие контуры больших индуктивностей, требующих, особенно при пониженных частотах, больших и дорогих конденсаторных батарей. Опытным путём удалось получить нечётные гармоники вплоть до 37-й. Но у сегнетовой соли были свои недостатки (дорогое выращивание кристалла, узкий диапазон рабочих температур, хрупкость, малая теплопроводность). Переход на титанат бария позволил разрешить многие вопросы (рис. 6).

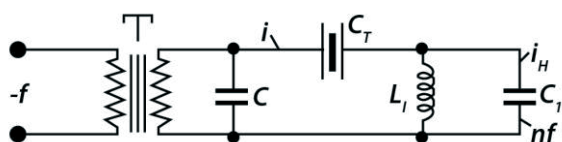


Рис. 6

Умножитель частоты на основе конденсатора с диэлектриком из титаната бария, 1946 год

На рис. 6 конденсатор C выполняет роль блокировочного (имеет малое сопротивление на умноженной частоте), а конденсатор C_T является нелинейным элементом с диэлектриком из титаната бария, с помощью которого происходит генерация гармоник. Ёмкость конденсатора C_T зависит от напряжения, поэтому при синусоидальном входном напряжении выходное будет несинусоидальным, помимо основной гармоники будут также содержаться и нечётные гармоники. Настраивая контур, состоящий из индуктивности L_1 и ёмкости C_1 , имеющей $\epsilon = \text{const}$, возможно при помощи этого контура выделить нужную гармонику.

Колебания в умножителе частоты (рис. 6) являются затухающими, т.к. возбуждение контура носит ударный характер, но эта проблема решается использованием многофазной схемы, которую В.П. Вологдин разработал ещё в 1930 году и также представил в своей работе [19]. Автор позиционирует новый метод умножения частоты для его использования не в радиотехнических целях, а в промышленных заводских установках, где используются высокие мощности (сварка током повышенной частоты, индукционный нагрев деталей, питание люминесцентных ламп и

двигателей повышенной скорости). Т.е. приоритет в 30-е и 40-е годы на использование в качестве нелинейного элемента для целей радиотехнических умножителей частоты оставался за лампами.

Следует отметить работу [26], в которой приведены расчёты к доказательству о невозможности генерации n -й гармоники с эффективностью более $1/n^2$ при использовании нелинейного резистора. Также в данной статье приведена мостовая схема выпрямителя на диодах, применяемая при удвоении частоты (рис. 7), так называемая балансная схема, которая является актуальной и в настоящее время.

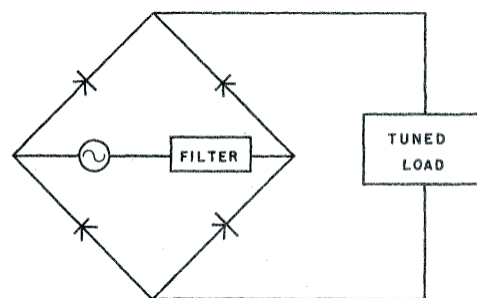


Рис. 7

Мостовая схема удвоителя частоты, 1958 год

Лисон анализирует выводы Пэйджа [26] о том, что для диодного умножителя (диодный умножитель, нелинейное сопротивление – синонимы) эффективность не может превысить значение $1/n^2$, и ссылается на работу Мэнли [30], в которой приводятся расчёты, доказывающие, что вся мощность, подводимая к идеальному реактивному сопротивлению (конденсатору с нелинейной зависимостью его ёмкости от прикладываемого напряжения), должна преобразовываться в мощность выходных гармоник, т.е. говорит о преимуществах

именно реактивного типа умножителей. Если обеспечить отсутствие паразитных гармоник на выходе умножителя (например, за счёт высокодобротных схем фильтрации), вся мощность входного сигнала перейдет в мощность выходной полезной гармоники без потерь. В статье [29] приводится название для нелинейного конденсатора – варактор. Данное название найдёт широкое употребление в дальнейших работах по умножителям частоты в последующие годы.

В работе Мэнли и Роу [30] приведён математический аппарат, в котором также возможно существование и отрицательного нелинейного реактивного элемента и приведены критерии неустойчивости при его наличии в схеме.

В 1958 году в статье [24] приведён анализ возможности использования полупроводниковых диодов, в том числе как СВЧ умножителей частоты. В частности, отмечено, что на основе нелинейной ёмкости диода возможно осуществлять генерацию гармоник вплоть до миллиметрового диапазона волн. В этом же году в статье [25] отмечается, что нелинейные свойства $p-n$ перехода были исследованы и использованы для преобразования частоты ещё во время 40-45-х годов. В выводах к данной статье говорится о том, что нелинейная ёмкость $p-n$ перехода может быть использована при построении усилителей и устройств преобразования частоты, при этом ожидается, что коэффициент шума будет относительно невысок. Для работы устройств на основе нелинейного сопротивления $p-n$ перехода, согласно статье [24], требуется пульсирующий ток. В работе В.П. Вологодина [19] также говорится

о том, что по мере увеличения остроты кривой тока через нелинейный элемент (речь в статье шла о нелинейной ёмкости), или, иначе говоря, при приближении кривой тока к виду, показанному на рис. 8, амплитуда гармоник стремится к постоянной величине.



Рис. 8

Ток в нелинейном устройстве при идеальной генерации гармоник, 1948 год

В 1959 году в статье [29] приводится подробный анализ построения умножителей частоты с помощью нелинейного конденсатора, в частности, обозначаются две возможные схемы его включения – с последовательным включением нелинейного элемента и с параллельным. При этом рассмотрены способы подавления нежелательных гармоник с помощью резонансных контуров на входе и выходе умножителя.

В работе [31] приводятся результаты, достигнутые при использовании нелинейного конденсатора в схеме повышающего преобразователя частоты (смесителя): с 460 МГц удалось получить сигнал на частоте 9375 МГц при усилении 21 дБ и коэффициенте шума 1,1 дБ.

В 1962 году в работе [32] приводится критический анализ идеальных расчётов Мэнли и Роу [30] в части эффективности умножителей частоты на варакторах.

Проведены расчёты и представлены экспериментальные данные, согласно которым удалось достигнуть эффективности в 70 % для утроителя и в 50 % для умножителя на 5.

Несмотря на то, что первый кристаллический диод (контакт металл-полупроводник) был использован в качестве детектора ещё в самом начале XX-го века, согласно проведённому анализу литературы, его нелинейные свойства в прямом включении не предлагалось использовать при создании умножителей частоты вплоть до момента практической реализации полупроводникового *p-n* перехода. В работах А.И. Берга по усилительным и генераторным устройствам, написанных в 1930-1932 гг., помимо ламповых схем другие методы умножения частоты не упоминаются. В работе В.П. Вологодина [19] нелинейный конденсатор с диэлектриком из титаната бария не ассоциировался с возможностью использования кристаллического диода для этих же целей. И только в 1948 году выходит статья А. Ван дер Зила [23], в которой он отмечает возможность реализации смесителя частоты (и умножителя – как его частного случая) на основе, в том числе, кристаллического диода.

В статье [28] объясняется понятие положительного и отрицательного нелинейного резистивного элемента. Положительный означает, что для всех значений тока и напряжения производная тока по напряжению будет всегда больше либо равна нулю.

Также в статье [28] приводится математический вывод невозможности генерации гармоник с помощью линейного сопротивления (производная тока по напряжению постоянна, вся мощность рассеивается на

полученном резисторе). В работе даются формулы расчёта мощности гармоник при подаче на нелинейный элемент двух сигналов, т.е. рассматривается режим смешения частот, а режим умножения – как частный случай смешения так же, как и в работе [23].

В работе А. Ван дер Зила [31], вышедшей в 1959 году и переведённой в СССР уже в 1961 году, обозначается область устройств, служащих при построении преобразователей частоты:

- нелинейные активные сопротивления (точечный диод, плоскостной диод, вакуумный диод – для данных устройств используется прямое включение);
- нелинейные четырёхполюсники (транзисторы, триоды, пентоды);
- нелинейные реактивные сопротивления (точечный диод и плоскостной диод – при инверсной схеме включения).

Также в работе [31] вводится показатель качества нелинейного конденсатора на основе плоскостного диода – его критическая частота:

$$2\pi f_{\text{кр}} CR = 1,$$

где C – значение ёмкости диода при включении по схеме с обратным смещением, R – паразитное сопротивление в схеме с прямым включением.

Заключение

В первой половине XX века сформировалось три базовых направления работ в области создания умножителей частоты: на основе нелинейного активного сопротивления, реактивного сопротивления и на основе нелинейного четырёхполюсника. Эти направления относятся к группе устройств умножения частоты на основе

искажения исходного сигнала. При этом в схемотехнических решениях устройств широко используются катушки индуктивности и трансформаторы. Важно отметить, что с повышением рабочей частоты умножителей до гигагерцового диапазона и с возможностью создания высокодобротных интегральных индуктивностей и трансформаторов [33] актуальным является использование рассмотренных способов построения умножителей частоты на новом техническом уровне.

Литература

1. Савченко, Е.М. Импортозамещающие разработки ОАО «НПП «Пульсар» в части СВЧ МИС и субмодулей / Е.М. Савченко, А.С. Будяков, А.В. Вагин, А.А. Пронин, А.В. Киров // *Материалы XIII научно-технической конференции «Пульсар-2014. Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА»*, 8-10 октября 2014, Москва. – М.: ОАО «НПП «Пульсар», 2014. – С. 119-123.
2. Савченко, Е.М. Перспективные разработки АО «НПП «Пульсар» в области СВЧ МИС и субмодулей / Е.М. Савченко, А.С. Будяков, М.В. Гладких // *Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции по обмену опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ – 2018)*, 17- 18 апреля 2018, Омск. – Омск: Изво ОмГТУ, 2018. – С. 242-247.
3. Савченко, Е.М. Основные подходы к разработке моделей аналоговой и СВЧ электронной компонентной базы для использования в САПР / Е.М. Савченко, П.В. Таран, А.В. Телец, С.А. Фурсов, А.Н. Щепанов // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. – 2018. – № 3 (250). – С. 32-43.
4. Будяков, А.С. Методы автоматизированного проектирования индуктивных элементов в интегральном исполнении / А.С. Будяков, Д.Н. Конев, Н.Н. Прокопенко, Е.М. Савченко // *Материалы VII научно-технической конференции «Пульсар-2008. Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА»*, 14-26 мая 2008, Москва. – М.: ФГУП «НПП «Пульсар», 2008. – С. 120-122.
5. Савченко, Е.М. Анализ основных направлений построения кремниевых интегральных СВЧ преобразователей частоты в монолитном исполнении / Е.М. Савченко, А.С. Будяков, А.В. Вагин // *Материалы XVI координационного научно-технического семинара по СВЧ технике*, 8-10 сентября 2009, Нижний Новгород. – С. 94-96. – URL:<https://docplayer.ru/54864260-Materialy-xvi-koordinacionnogo-nauchno-tehnicheskogo-seminara-po-svch-tehnike.html>. [электронный ресурс].
6. Будяков, А.С. Монолитные СВЧ интегральные схемы широкополосных преобразователей частоты на основе кремниевых диодов Шоттки для L, S и C диапазонов частот / А.С. Будяков, А.В. Вагин, Д.Г. Дроздов, С.А. Мельничук, А.А. Пронин, Е.М. Савченко // *Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ-2010): сборник докладов научно-технической конференции*. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – С. 40-43.
7. Будяков, А.С. Кремниевые СВЧ смесители на основе диодов Шоттки в монолитном и гибридном исполнении / А.С. Будяков, А.В. Вагин, А.Г. Васильев, С.А. Мельничук, Е.М. Савченко // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. – 2010. – № 2 (225). – С. 28-33.
8. Савченко, Е.М. Широкополосный интегральный СВЧ удвоитель частоты / Е.М. Савченко // *Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем*. – 2008. – № 1. – С. 297-300.
9. Савченко, Е.М. СВЧ ГИС умножителя частоты на основе технологии LTCC для S-диапазона частот / Е.М. Савченко, А.С. Будяков, С.А. Мельничук // *Материалы XI научно-тех-*

- нической конференции «Пульсар-2012. Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 17-19 октября 2012, Дубна. – М.: ФГУП «НПП «Пульсар», 2012. – С. 71-74.
10. Савченко, Е.М. Анализ методов создания умножителей частоты ВЧ и СВЧ диапазона частот / Е.М. Савченко, А.В. Вагин, М.В. Кондратьев, А.Д. Кузьмин // Материалы VII научно-технической конференции «Пульсар-2008. Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 7-8 октября 2008, Москва. – М.: ФГУП «НПП «Пульсар». – С. 43-45.
 11. Савченко, Е.М. Формирование СВЧ колебаний с применением СВЧ МИС умножителей частоты серии 1324 / Е.М. Савченко, А.С. Будяков, Е.С. Дрозденко, Д.А. Баландин, А.А. Пронин // Материалы XIV научно-технической конференции «Пульсар-2015. Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 7-9 октября 2015, Москва. – М.: ОАО «НПП «Пульсар». – С. 173-176.
 12. Берг, А. А.С. Попов и изобретение радио / А. Берг. – Л.: ОГИЗ, СОЦЭКГИЗ, 1935. – 102 с.
 13. Бессонов, Л.А. Электрические цепи со сталью / Л.А. Бессонов. – ГОСЭНЕРГОИЗДАТ, 1948. – 344 с.
 14. Alfred, N. Goldsmith radio frequency changers // Proceedings of the IRE. – 1915. – pp. 55-79.
 15. J. Zenneck Wireless telegraphy. – London: McGRAW-HILL BOOK, 1915. – 463 p.
 16. L. Dreyfus Die analytische theorie des statischen frequenz ver dopplers bel leer lauf. –1914. – т. 2. – 343 с.
 17. Вологдин, В.П. Генераторы высокой частоты / В.П. Вологдин, М.А. Спицын. – Москва; Ленинград, 1935.
 18. Вологдин, В.П. Новый генератор повышенных и высоких частот / В.П. Вологдин // Электричество. – 1946. – № 8. – С. 28-32.
 19. Рожанский, Л.Л. Статические электромагнитные преобразователи частоты / Л.Л. Рожанский. – Москва; Ленинград: Гос. энерг. изд-во, 1959. – 96 с.
 20. Берг, А.И. Теория и расчёт ламповых генераторов / А.И. Берг. – Москва; Ленинград: Гос. энерг. изд-во, 1932. – 434 с.
 21. Нейман, М.С. Курс радиопередающих устройств / М.С. Нейман. – М.: Советское радио, 1965. – 594 с.
 22. Van der Ziel, A. On the mixing properties of nonlinear condensers // Journal of Applied Physics. – 1948. –vol. 19. – no.11. – pp. 999-1006. –DOI: 10.1063/1.1698106.
 23. Uhler, A. The potential of semiconductor diodes in high-frequency communication // Proceedings of the IRE. – 1958. – vol.46. – no.6. – pp. 1099-1115. – DOI: 10.1109/JRPROC.1958.286892.
 24. Uhler, A. Shot noise in p-n junction frequency converters // The bell system technical journal. – 1958. – Vol.37. – no.4. – pp. 951-988.
 25. Page, C. H. Harmonic generation with ideal rectifiers // Proceedings of the IRE. – 1958. –Vol.46. – pp. 1738-1740.
 26. Дробов, С.А. Радиопередающие устройства / С.А. Дробов, С.И. Бычков. – М.: Советское радио, 1969. – 720 с.
 27. Pantell, Richard H. General power relationships for positive and negative nonlinear resistive elements // Proceedings of the IRE. – 1958. – vol.46. –no.12 – pp.1910-1913. – DOI: 10.1109/JRPROC.1958.286808.
 28. Leeson D.B., Weinreb S. Frequency multiplication with nonlinear capacitor – a circuit analysis // Proceedings of the IRE. – 1959. – vol.47. – no.12. – pp. 2076-2084.
 29. Manley J.M. , Rowe H.E. Some general properties of nonlinear elements.– Part I. General energy relations. // Proceedings of the IRE. – 1956. – vol.44. – no.7. –pp.904-913.
 30. Van der Ziel, Aldert Fluctuation phenomena in semi-conductors. – London: Butterworths Scientific Publications, 1959. – 168 p.
 31. Utsunomiya T. Shui Yuan Theory, design and performance of maximum efficiency variable reactance frequency multiplier // IRE Transactions on Electron Devices. – 1961. – vol.8. – no.2. – p.179.

32. Сапогин, В.Г. Интегральные индуктивности и трансформаторы аналоговых микросхем СВЧ диапазона / В.Г. Сапогин, С.Г. Крутчинский, Н.Н. Прокопенко, А.С. Будяков, Е.М. Савченко – Шахты: Южно-Российский государственный ун-т экономики и сервиса, 2010. – 273 с.

References

1. Savchenko E.M., Budyakov A.S., Vagin A.V., Pronin A.A., Kirov A.V. Research Outcome of S&PE Pulsar JSC for Import Substitution of MMIC and Sub-modules // Proceedings of XIII Scientific and Technical Conference “Pulsar-2014. Tverdotelnaya Elektronika, Slozhniye Funktsionalniye Bloki REA” [Pulsar-2014. Solid-state Electronics. Complex Functional Blocks of Radio-electronic Equipment] – Moscow: S&PE Pulsar JSC Publ., 2014. – pp.119 – 123.
2. Savchenko E.M., Budyakov A.S., Gladkikh M.V., Advanced Research of S&PE Pulsar JSC in the Field of MMIC and Sub-modules // Proceedings of VII All-Russian Scientific and Technical Conference on the Exchange of Experience in the Field of Creating Ultra-wideband Radio Electronic Systems (SVCh – 2018). – Omsk. OmGTU Publ., 2018. – pp.242-247.
3. Savchenko E.M., Taran P.V., Telets A.V., Fursov S.A., Shchepanov A.N. Main Approaches to the Design of Analog and Microwave Electronic Component Models for CAD Software // Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikoviyе pribory [Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices]. – 2018. –no.3 (250). – pp.32-43.
4. Budyakov A.S., Konev D.N., Prokopenko N.N., Savchenko E.M. Methods of Computer-aided Design of Inductive Elements in Integral Design // Proceedings of VII Scientific and Technical Conference “Pulsar-2008. Tverdotelnaya Elektronika, Slozhniye Funktsionalniye Bloki REA” [Pulsar-2008. Solid-state Electronics. Complex Functional Blocks of Radio-electronic Equipment]. – Moscow: S&PE Pulsar Publ., 2008. – pp.120-122.
5. Savchenko E.M., Budyakov A.S., Vagin A.V. Analysis of the Main Approaches to the Design of Silicon Microwave Monolithically Integrated Frequency Converters // Proceedings of XVI Coordinating Scientific and Technical Workshop in Microwave Engineering. – Nizhny Novgorod, 2009. – pp.94-96. – Available at: [URL: https://docplayer.ru/54864260-Materialy-xvi-koordinacionnogo-nauchno-tehnicheskogo-semi-nara-po-svch-tehnike.html](https://docplayer.ru/54864260-Materialy-xvi-koordinacionnogo-nauchno-tehnicheskogo-semi-nara-po-svch-tehnike.html).
6. Budyakov A.S., Vagin A.V., Drozdov D.G., Melnichuk S.A., Pronin A.A., Savchenko E.M. L, S and C-band Microwave Monolithic Integrated Circuits of Wideband Frequency Converters Based on Silicon Schottky Diodes // Proceedings of Scientific and Technical Conference on the Exchange of Experience in the Field of Design of Ultra-wideband Radio Electronic Systems (SVCh-2010). – Omsk: OmGTU Publ., 2010. – pp.40-43.
7. Budyakov A.S., Vagin A.V., Vasilyev A.G., Melnichuk S.A., Savchenko E.M. Silicon Microwave Monolithic and Hybrid Mixers on Schottky Diodes // Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikoviyе pribory [Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices]. – 2010. – no.2 (225). – pp.28-33.
8. Savchenko E.M. Wideband Microwave Integrated Frequency Doubler // Issues of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development. – 2008. – no.1. – pp. 297-300.
9. Savchenko E.M., Budyakov A.S., Melnichuk S.A. S-band Microwave HIC of LTCC Frequency Multiplier // Proceedings of XI Scientific and Technical Conference “Pulsar-2012. Tverdotelnaya Elektronika, Slozhniye Funktsionalniye Bloki REA” [Pulsar-2012. Solid-state Electronics. Complex Functional Blocks of Radio-electronic Equipment]. – Dubna: S&PE Pulsar Publ., 2012. – pp.71-74.
10. Savchenko E.M., Vagin A.V., Kondratyev M.V., Kuzmin A.D. Analysis of Methods for Designing RF and Microwave Frequency Multipliers // Proceedings of VII Scientific and Technical Conference “Pulsar-2008. Tverdotelnaya Elektronika, Slozhniye Funktsionalniye Bloki REA” [Pulsar-

2008. Solid-state Electronics. Complex Functional Blocks of Radio-electronic Equipment]. – Moscow: S&PE Pulsar Publ., 2008. – pp.43-45.
11. Savchenko E.M., Budyakov A.S., Drozdenko E.S., Balandin D.A., Pronin A.A. Formation of Microwave Oscillations Using Frequency Multiplier MMICs of 1324 Series // Proceedings of XIV Scientific and Technical Conference “Pulsar-2015. Tverdotelnaya Elektronika, Slozhniye Funktsionalniye Bloki REA” [Pulsar-2015. Solid-state Electronics. Complex Functional Blocks of Radio-electronic Equipment]. – Moscow: S&PE Pulsar Publ., 2015. – pp.173-176.
 12. Berg A. Alexander Popov and the Invention of the Radio. – L.:OGIZ, SOTsEKGIZ Publ., 1935. – p.102.
 13. Bessonov L.A. Electrical Circuits Containing Steel. – GOSENERGOIZDAT Publ., 1948. – p.344.
 14. Alfred, N. Goldsmith Radio frequency changers // Proceedings of the IRE. – 1915. – pp. 55-79.
 15. J. Zenneck Wireless Telegraphy. – London: McGRAW-HILL BOOK, 1915. – 463 p.
 16. L. Dreyfus Die analytische theorie des statischen frequenz ver dopplers bel leer lauf. –1914. – т. 2. – 343 c.
 17. Vologdin V.P., Spitsyn. High-Frequency Generator. – Moscow, Leningrad: 1935.
 18. Vologdin V.P. New Generator of Increased and High Frequencies // Elektrichestvo [Electricity]. – 1946. – no.8. – pp.28-32.
 19. Rozhanskiy L.L. Static Electromagnetic Frequency Converters. – Moscow, Leningrad: Gos.Energ. Publ., 1959. – 96 p.
 20. Berg A.I. Theory and Design of TWT Generators. Moscow, Leningrad. Gos.Energ. Publ. 1932. p.434.
 21. Neyman M.S. Course of Radio-transmitting Devices. – Moscow: Sovetskoe Radio Publ. , 1965. – 594 p.
 22. Van der Ziel, A. On the mixing properties of non-linear condensers // Journal of Applied Physics. – 1948. –vol. 19. – no.11. – pp. 999-1006. – DOI: 10.1063/1.1698106.
 23. Uhilir, A. The potential of semiconductor diodes in high-frequency communication // Proceedings of the IRE. – 1958. – vol.46. – no.6. – pp. 1099-1115. – DOI: 10.1109/JRPROC.1958.286892.
 24. Uhilir, A. Shot noise in p-n junction frequency converters // The bell system technical journal. – 1958. – vol.37. – no.4. – pp. 951-988.
 25. Page, C. H. Harmonic generation with ideal rectifiers // Proceedings of the IRE. – 1958. –vol.46. – pp. 1738-1740.
 26. Drobov S.A., Bychkov S.I. Radio-transmitting Devices. – Moscow: Sovetskoe Radio Publ., 1969. – 720 p.
 27. Pantell, Richard H. General power relationships for positive and negative nonlinear resistive elements // Proceedings of the IRE. – 1958. – vol.46. – no.12 – pp.1910-1913. – DOI: 10.1109/JRPROC.1958.286808.
 28. Leeson D.B., Weinreb S. Frequency multiplication with nonlinear capacitor – a circuit analysis // Proceedings of the IRE. – 1959. – vol.47. – no.12. – pp. 2076-2084.
 29. Manley J.M., Rowe H.E. Some general properties of nonlinear elements – Part I. General energy relations // Proceedings of the IRE. – 1956. – vol.44. – no.7. –pp.904-913.
 30. Van der Ziel, Aldert Fluctuation phenomena in semi-conductors. – London, Butterworths Scientific Publications, 1959. – 168 p.
 31. Utsunomiya T. Theory, design and performance of maximum efficiency variable reactance frequency multiplier // IRE Transactions on Electron Devices. – 1961. – vol.8. – no.2. – p.179.
 32. Sapogin V.G., Krutchinskiy S.G., Prokopenko N.N., Budyakov A.S., Savchenko E.M. Integrated inductances and transformers of microwave analog microchips. – Shakhty: South-Russian State University of Economics and Service Publ., 2010. – 273 p.