

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.373.52:3.018.3

Яковчук  
Александр Сергеевич

**«Анализ гармонических составляющих автогенераторов методом  
медленно меняющихся амплитуд и фаз»**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-39 80 01 «Радиосистемы и радиотехнологии»

---

Научный руководитель  
Титович Николай Алексеевич  
Кандидат технических наук, доцент

---

Минск 2021

## ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой частью возбудителей передатчиков, гетеродинов приемников, измерительной, телевизионной аппаратуры и ряда других устройств являются генераторы колебаний. В современных условиях в связи с повышенными требованиями к габаритам и весу аппаратуры, её надежности наибольшее распространение получили твердотельные генераторы, выполненные на полупроводниковых элементах. С появлением большого многообразия полупроводниковых диодов, транзисторов, стало возможным разрабатывать схемы и конструкции генераторов, удовлетворяющих самым разнообразным требованиям: мощные, высокостабильные, работающие в широком диапазоне частот. В современных многокаскадных передатчиках выходная мощность задающих генераторов не играет существенную роль. Основное внимание уделяется повышению стабильности частоты. Наряду с этим следует отметить все более жесткие ограничения на уровни побочных излучений генераторов.

Различают следующие виды побочных колебаний: возникающие в процессе формирования основного колебания, обусловленные паразитной модуляцией, шумовые, паразитные, интермодуляционные. В целом ряде случаев наибольшие уровни обладают излучения, возникающие при формировании сигнала несущей частоты и кратные ей гармонические составляющие. Именно поэтому при проектировании схем генераторов требуется принимать необходимые меры по их подавлению. Основным методом подавления является выбор схемы и параметров цепей согласования. Для более успешного решения этой задачи при проектировании генератора важно проводить оценку уровней гармонических составляющих, выявлять зависимость их от параметров схемы активного элемента. Это позволит в значительной мере упростить решение вопроса подавления этих колебаний в последующих каскадах.

Как известно, измерение уровней гармонических составляющих является довольно сложной задачей, особенно для генераторов, работающих в диапазоне СВЧ. В связи с этим актуальным становится вопрос разработки методик оценки этих колебаний другими, более простыми методами, связанными с измерениями на частотах близких к основной.

Целью данной диссертации является разработка методики оценки уровней гармонических составляющих транзисторных автогенераторов с помощью аналитических соотношений, а также определение их уровней по результатам экспериментальных исследований.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы магистерской диссертации.** При разработке современных радиоэлектронных средств все более жесткие требования предъявляются к уменьшению уровней их побочных излучений. Для приемопередающих устройств важно нормировать паразитные колебания, возникающие в процессе генерирования и формирования радиосигнала. Анализ показывает, что наибольшие уровни имеют помехи с частотой, кратной частоте основного несущего колебания – гармонические составляющие.

**Объект исследования:** транзисторные автогенераторы.

**Предмет исследования:** уровни гармонических составляющих автогенераторов, возникающие при формировании ВЧ и СВЧ колебаний основной частоты.

**Задачи исследования:**

- анализ методов расчета уровней гармонических составляющих. Оценка достоинств и недостатков известных методов;
- описание и обоснование выбора метода медленно меняющихся амплитуд;
- составление нелинейного дифференциального уравнения транзисторного автогенератора;
- аппроксимация характеристик транзисторов с целью определения параметров нелинейного дифференциального уравнения;
- расчет уровней гармонических составляющих методом медленно меняющихся амплитуд;
- сравнение полученных результатов с результатами эксперимента.

**Цель работы:** разработка методики оценки уровней гармонических составляющих автогенераторов с помощью аналитических соотношений, а также определение их уровней по результатам экспериментальных исследований.

## Краткое содержание работы

В первой главе проведен анализ большого объема литературы, отмечены достоинства и недостатки существующих методов анализа параметров автогенераторов.

Во второй главе обоснованы преимущества метода медленно меняющихся амплитуд для расчета уровней их гармонических составляющих.

В третьей главе проведен анализ ряда схем транзисторных автогенераторов и показано, что любая из них может быть описана нелинейным дифференциальным уравнением с малым положительным параметром в правой части.

В четвертой главе проведена аппроксимация характеристик транзисторов с целью определения параметров нелинейного дифференциального уравнения и показано, что точность расчета уровней гармонических составляющих в значительной степени определяется точностью аппроксимации нелинейной зависимости транзистора автогенератора. При этом наиболее удобной для анализа является аппроксимация степенным полиномом.

В пятой главе проведен расчет уровней гармонических составляющих методом медленно меняющихся амплитуд.

В шестой главе проведен анализ полученных результатов и предложена методика уменьшения уровней гармонических составляющих автогенераторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке методики оценки уровней гармонических составляющих автогенераторов для анализа использован метод медленно меняющихся амплитуд. Он является более точным по сравнению с широко применяющимся квазилинейным методом, т.к. не использует линеаризации нелинейных характеристик, и более простым по сравнению с методом математического моделирования, т.к. за счет понижения порядка нелинейного дифференциального уравнения не требует больших вычислительных затрат. Анализ различных схем автогенераторов показал, что любую из них можно описать нелинейным дифференциальным уравнением с малым положительным параметром. На основании решения данного уравнения получены аналитические выражения для расчета уровней второй-пятой гармоник.

При оценке уровней гармонических составляющих схемы автогенератора с фиксированной частотой настройки 5,815 ГГц установлено, что величины гармоник в меньшей степени зависят от изменения параметров колебательной системы и схемы. Наибольшее влияние на величину гармонических составляющих оказывает нелинейность вольтамперной характеристики транзистора, что в первую очередь определяется напряжением смещения рабочей точки. Изменения смещения с 0,7 до 0,73 В приводит к уменьшению уровня второй гармоники на 11 дБ, третьей – на 14 дБ, четвертой – на 63 дБ, пятой – на 57 дБ. При анализе наихудшего случая расчетные уровни гармонических составляющих составили соответственно - 40,-43,-61, и -72 дБ.

В связи с тем, что результаты расчетов главным образом определяются нелинейностью характеристики прибора, важное значение имеет вопрос её точной аппроксимации. С этой целью проведен анализ методов аппроксимации вольтамперных характеристик, для решения задачи выбраны наиболее точная и удобная из них: аппроксимация полиномом пятой степени с определением коэффициентов по способу наименьших квадратов.

На основании проведенных исследований разработана расчетно-экспериментальная методика оценки уровней гармонических составляющих, которая на основе знания добротности, коэффициентов аппроксимации нелинейной характеристики активного элемента и уровня амплитуды основного колебания генератора позволяет просто и достаточно точно определить уровни гармоник.

Анализ показал, что расчетные значения уровней гармонических составляющих СВЧ-генератора качественно совпадают с результатами

измерений, и с учетом погрешности измерений имеют одинаковые порядки; использование аппроксимации экспоненциальным полиномом позволяет повысить точность.

Разработанные методики оценки уровней гармоник могут быть использованы при анализе различных схем транзисторных автогенераторов.

Для снижения уровней высших гармоник в спектре выходного сигнала автогенератора предложено при выборе активного элемента генератора и его рабочей точки использовать методику оценки восприимчивости транзисторов к воздействию СВЧ-помех.

Библиотека БГУИР

## Список опубликованных работ

1. Яковчук А.С. Использование детекторного эффекта для настройки транзисторных автогенераторов / Титович Н. А., Яковчук А.С. // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020 : материалы Республиканской научно-практической конференции, Минск, 28-29 октября 2020 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В.А. Богуш [и др.]. – Минск : БГУИР, 2020 – С.31-34

2. Яковчук А. С. Анализ гармонических составляющих транзисторных автогенераторов / Яковчук А. С. // Радиотехника и электроника: сборник тезисов докладов 56-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, апрель-май 2020 года / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2020 - С. 248-249.

Библиотека БГУИР