

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента, доктора технических наук, профессора**

**Томашевича Сергея Викторовича**

**о диссертационной работе Березняка Анатолия Федоровича**

**«Синтез и реализация интегральных схем твердотельных СВЧ переключателей с контролируемым уровнем нелинейных искажений дециметрового и сантиметрового диапазона длин волн», представленную на соискание учёной степени**

**кандидата технических наук по специальности**

**05.12.04 - «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»**

### **Актуальность темы диссертационной работы**

СВЧ переключатели входят в состав приемопередающих трактов современных беспроводных инфокоммуникационных и радиолокационных систем. Так, в высокочастотной части тракта сигнал, поступающий в антенну (или из антенны), проходит через антенный СВЧ переключатель, параметры которого оказывают существенное влияние на динамический диапазон всей системы в целом.

В настоящее время признается, что в приемном тракте динамический диапазон пары «арсенид галлиевый СВЧ переключатель/малощумящий усилитель» шире динамического диапазона аналогичной пары, выполненной по технологии «кремний-на-изоляторе (КНИ)». Часть передающего тракта, изготовленная на полупроводниках группы материалов АЗВ5 (GaAs и GaN), останется недостижимой по плотности излучаемой мощности для технологии КНИ. Развивающаяся технология КНИ предназначается, в основном, для СВЧ части смартфона 5-го поколения и окупается при больших сериях производства изделий. Очевидно, что потребность в приемопередающих модулях радиолокационных систем, в том числе дециметрового и сантиметрового диапазонов, значительно меньше потребности в смартфонах (что увеличивает себестоимость производства), а требования к динамическому диапазону и передаваемой мощности существенно выше. Разрешить данное противоречие позволяют технологии на основе полупроводников группы АЗВ5. Таким образом, проблема проектирования и изготовления входной/выходной части (т.е. антенного переключателя) СВЧ МИС приемопередающих модулей дециметрового и сантиметрового диапазона длин волн по-прежнему остается актуальной.

Учитывая вышесказанное, диссертационная работа Березняка А.Ф. посвященная синтезу и реализации интегральных схем твердотельных СВЧ переключателей с

контролируемым уровнем нелинейных искажений дециметрового и сантиметрового диапазона длин волн, является актуальной и востребованной в практическом плане.

### **Структура диссертационной работы**

Структура диссертационной работы соответствует традиционному стилю представлений результатов научно-исследовательской работы. В первой главе рассмотрены и проанализированы основные сведения теории СВЧ переключателей, технологии изготовления твердотельных СВЧ переключателей, схемотехники твердотельных СВЧ переключателей, области применения твердотельных СВЧ переключателей; а также сформулированы цель и задачи работы. Основные теоретические выкладки и разработка методики синтеза МИС СВЧ переключателя на полевых транзисторах группы АЗВ5 представлены во второй главе. Автором предлагается методика синтеза МИС СВЧ переключателя, основанная на методике синтеза фильтров частот, исключая эмпирическую стадию определения требуемых параметров (в частности – ширины затворов) транзисторов. Предлагается аналитический расчет зависимости ширины затвора последовательного и параллельного транзистора в Г-образном СВЧ переключателе в зависимости от требуемой развязки и вносимых потерь. Представлена пошаговая методика синтеза МИС СВЧ переключателя с одного входа на  $n$  выходов (SPnT). Третья глава посвящена методике оценки нелинейных параметров МИС СВЧ переключателя на основе полевых транзисторов группы АЗВ5. Выбраны параметры для оценки нелинейных искажений синтезированного СВЧ переключателя. Показано, что оценивать нелинейные свойства полевых транзисторов следует по двум параметрам  $ИПЗ$  (точка пересечения интермодуляционных искажений третьего порядка):  $ИПЗ_{on}$  для транзистора в состоянии «включено» и  $ИПЗ_{off}$  для транзистора в состоянии «выключено». Предложена квазилинейная компактная модель полевого транзистора для оценки нелинейных искажений. Разработан метод аналитической оценки нелинейных параметров МИС СВЧ переключателя по нелинейным параметрам квазилинейной компактной модели полевого транзистора. Представлена пошаговая методика оценки нелинейных параметров МИС СВЧ переключателя. Четвертая глава посвящена практической части работы и отражает этапы синтеза и реализации монолитных интегральных схем СВЧ переключателей на основе полупроводников группы АЗВ5, результаты экспериментальных измерений, а также содержит анализ полученных результатов. В заключении представлены основные выводы по работе. Диссертационная работа написана четким научно-техническим языком, в целом – последовательно и логично изложена, аккуратно оформлена.

### **Научная новизна диссертационной работы**

Научная новизна диссертационной работы, в основном, заключается в следующем:

- 1) Впервые предложено рассматривать СВЧ переключатель как эквивалентную схему параметрического (переключаемого) частотного фильтра, что позволяет использовать методы синтеза частотных фильтров для синтеза СВЧ переключателей.
- 2) Предложено проводить синтез СВЧ переключателя с использованием теории синтеза частотно-избирательных устройств по общему ФНЧ-прототипу для двух режимов функционирования «включено»/«выключено» СВЧ переключателя.
- 3) Предложено использовать для синтеза прототипа СВЧ переключателя аппроксимирующую функцию, нормированную не по частоте среза, а по максимальной рабочей частоте СВЧ переключателя при допустимой неравномерности АЧХ в полосе пропускания прототипа, равной минимальной развязке СВЧ переключателя.
- 4) Предложено ввести новые удельные нелинейные параметры полевых транзисторов, не зависящие от ширины затвора транзистора, которые используются для оценки точки пересечения интермодуляционных составляющих 3-го порядка синтезируемого СВЧ переключателя.

### **Достоверность и обоснованность полученных результатов**

Достоверность результатов исследований, проведенных автором диссертационной работы, подтверждается:

- полнотой и глубиной анализа трудов отечественных и зарубежных авторов, характеризующих современное состояние в исследуемой предметной области;
- корректным использованием методов анализа и синтеза линейных электрических цепей;
- использованием современных средств моделирования;
- высокой степенью согласованности результатов теоретических исследований и проведенных экспериментов;
- достаточной полнотой отражения основных положений и выводов диссертаций в авторских публикациях;
- апробацией и практической реализацией основных результатов диссертационного исследования.

### **Практическая ценность результатов диссертационной работы**

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

- 1) Синтезирована и изготовлена МИС SPDT СВЧ переключателя С диапазона частот по технологии DrHEMT05 АО «Светлана-Рост».

2) Синтезирована и изготовлена МИС SPDT СВЧ переключателя X диапазона частот по технологии WIN\_PD2500 с многозатворными транзисторами фирмы WIN Semiconductors.

### **Оценка диссертационной работы и ее завершенности в целом**

Анализ содержания диссертации позволяет отметить её целостность и завершенность. Объем и оформление диссертации соответствуют требованиям к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук. Стиль изложения материала диссертации и автореферата отвечает нормам научной лексики.

По поставленным целям и задачам исследования, основному содержанию и полученным результатам диссертационная работа соответствует научной специальности 05.12.04 - «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Автореферат диссертации составлен и оформлен в соответствии с требованиями, предъявляемыми к авторефератам диссертаций, и в полной мере передает основное содержание работы.

### **По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:**

1. В главе 1 подробно не рассмотрены примеры СВЧ переключателей последнего поколения, например, переключатели, применяемые в смартфонах 5-го поколения, лишь упомянуты.

2. В главе 2 отсутствуют примеры решения задач параметрического синтеза при оптимизации по стохастическим критериям с использованием многовариантного анализа, что важно при применении новых технологий, например, GaN, с высокой дисперсией параметров.

3. В главе 4, подраздел 4.1.2, только перечислены фрагменты участия диссертанта в подготовке технологического процесса. В виду важности работ по подготовке технологического монитора и методик измерения электрофизических параметров, необходимых для PDK, подраздел 4.1.2 следовало бы написать более подробно.

4. На рисунках во второй и третьей главе изображение резисторов не соответствует ГОСТам Российской Федерации.

5. Таблица 3.2 выступает за рамки, предназначенные для сопровождаемого текста.

6. В подразделе 3.2.3 отсутствует нумерация формул.

7. В диссертации и в автореферате не приведены схемы измерений вносимых потерь и развязки СВЧ переключателей.

8. Приведенные на черно-белых рисунках графики теоретических и экспериментальных результатов трудно читаемы.

9. В работе присутствует ряд опечаток, или несогласованных обозначений, которые, однако, не искажают смысловую нагрузку. Например, на стр. 57, таблица 2.3, в записях десятичных дробей используется точка; знак умножения используется то как × (стр. 60), то как \* (стр. 67).

Указанные недостатки не снижают научный уровень диссертационной работы, а полученные результаты дают основание для положительной оценки проделанной работы.

### Заключение

Диссертация **Березняка Анатолия Федоровича «Синтез и реализация интегральных схем твердотельных СВЧ переключателей с контролируемым уровнем нелинейных искажений дециметрового и сантиметрового диапазона длин волн»**, удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО СПбПУ», утвержденным приказом №795 от 28.05.2020 (пункты 2.1-2.8), предъявляемым к кандидатским диссертациям, поскольку является научно-квалификационной работой, в которой содержится изложение новых научно обоснованных технических решений и разработок, имеющих существенное значение для развития страны, а ее автор - **Березняк Анатолий Федорович** - заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Официальный оппонент

профессор кафедры радиосистем и обработки сигналов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича" (СПбГУТ)



Томашевич Сергей Викторович,  
доктор технических наук, профессор

Контактные данные:

Почтовый адрес: 193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1

Телефон: (812) 305-12-13 e-mail: [tomashevich.s.v@gmail.com](mailto:tomashevich.s.v@gmail.com)

«28» 09 2020 года



С.В. Томашевича  
ЗАВЕРЯЮ  
Администрация административно-кадрового  
управления СПбГУТ  
А.Л. Зверев  
09 20 20