

## Отзыв

официального оппонента о диссертации Беленкевич Натальи Ивановны «Методы, модели и системы моделирования сигналов и линейных звеньев систем радиоэлектроники», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

**1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите, со ссылкой на область исследования паспорта соответствующей специальности, утвержденного ВАК.** Представленная работа соответствует паспорту специальности 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (Раздел III.1 Областей исследования), отрасли – технические науки.

**2. Актуальность темы диссертации.** Современные технологии моделирования электронных цепей и устройств имеют значительные возможности по определению их характеристик без применения физической реализации в процессе разработки новых радиотехнических устройств с использованием как структурно-технического, так и схмотехнического моделирования.

К настоящему времени разработано весьма значительное количество программных средств, позволяющих моделировать цепи и сигналы, многообразные по сложности, реализуемых оценок их свойств, объемов и доступности используемых исходных данных, точности, физическим ограничениям. Несмотря на это многообразие, реализованные пакеты прикладных программ обладают существенными недостатками, к числу которых относятся

- неразвитость библиотек моделей сигналов и цепей в широком диапазоне частот, структур, возможностей учета паразитных реактивностей;
- отсутствие возможности автоматизации процедур формирования составных моделей реальных устройств;
- ограниченная точность моделирования;
- сложность процедур подготовки исходных данных для моделирования;
- связанные с этим значительные временные затраты на выполнение работ.

Устранение перечисленных недостатков стало бы значительным шагом в деле расширения функциональных пакетов моделирования сигналов и линейных цепей, автоматизации процессов моделирования с использованием их развитых библиотек в широком диапазоне условий.

Устранению перечисленных недостатков в определенной степени и посвящена диссертационная работа Беленкевич Н.И.

Для строгости следует подчеркнуть, что, по-видимому, создание абсолютно универсального пакета программ подобного рода, учитывающего все возможные нюансы условий работы, структур и параметров радиотехнических цепей и сигналов особенно с учетом нелинейных свойств активных элементов, не следует ожидать даже в относительно отдаленной перспективе. Однако движение в этом направлении является весьма перспективным, что и определяет актуальность темы диссертации.

**3. Степень новизны результатов диссертации и научных положений, выносимых на защиту.** В диссертации получены следующие ключевые результаты.

- На базе операторной дробно-рациональной функции специального вида предложена совместная математическая модель (на комплексной плоскости), которая, в отличие от известных, задает все типы применяемых при моделировании континуальных детерминированных сигналов, линейных звеньев и реакций, обеспечивает необходимые преобразования моделей сигналов и звеньев, создание развитых библиотек их математических моделей.

- Построены математические модели используемых при моделировании преобразований операторных передаточных функции минимально- и неминимально-фазовых линейных звеньев (нормирование, денормирование, реактансные преобразования, перемножение и нормализация). Доказано, что при всех преобразованиях получается дробно-рациональная функция того же вида, что и преобразуемая. Это обеспечивает формирование моделей звеньев с различными видами частотных характеристик, включая фильтры с несколькими полосами пропускания или (и) задерживания. Это и определяет новизну построенных моделей.

- На базе предложенного описания сигналов, звеньев и реакций (СЗР) с помощью классического операционного метода впервые построены единые математические модели частотных характеристик СЗР, в том числе характеристик периодических и непериодических сигналов и реакций в устранимых особых точках на частотной оси. На их основе разработан новый математический алгоритм расчета всех частотных и энергетических характеристик СЗР: АЧХ, ФЧХ линейных звеньев; амплитудных и фазовых спектров непериодических и периодических сигналов и соответствующих им реакций; энергии и относительной доли энергии для непериодических сигналов, мощности и относительной доли мощности для периодических

сигналов в любом исследуемом диапазоне частот. Последнее важно для оценки электромагнитной совместимости систем радиоэлектроники.

- На базе предложенного описания СЗР с помощью модифицированного операционного метода построена единая математическая модель СЗР во временной области, которая, в отличие от известных, является результатом разложения по конечной неортогональной системе собственных функций звена и воздействия и представляет любую из временных характеристик (импульсную и переходную характеристики линейного звена, периодические и непериодические сигналы и соответствующие им реакции) точным аналитическим выражением из конечного числа слагаемых. Это устраняет проблемы оценки точности и сходимости решения. Модель позволяет исключить из общей погрешности моделирования погрешность самого метода, оставив только вычислительную погрешность (выполнения элементарных арифметических операций и вычисления элементарных функций в используемой системе программирования).

- Впервые проведен сравнительный количественный анализ точности моделирования методом ДПФ (предложенная единая математическая модель СЗР во временной области является точной). Получены количественные оценки ошибок наложения спектров и наложения реакций, сформулированы рекомендации по корректному выбору точек дискретизации по времени и частоте.

- Проведен содержательный анализ этапов математического и физического моделирования сигналов и линейных звеньев. Основываясь на нем и полученных (в главах 2-4 диссертации) результатах синтезирована оригинальная структура программно-аппаратного комплекса (ПАК) в виде совокупности системы математического моделирования, системы генерирования сигналов и реакций, системы подготовки формального описания, библиотеки виртуальных систем, системы измерения и контроля. Определены структура и свойства упомянутых систем. Разработан и внедрен в учебный процесс (в качестве обучающего) упрощенный вариант предлагаемого ПАК. Показаны возможности его эффективного применения в следующих областях: проектирование и разработка систем радиоэлектроники; информационно-измерительные системы и комплексы; системы и устройства генерирования сигналов; подготовка (переподготовка) специалистов в области систем радиоэлектроники и смежных областях.

На основании изложенного утверждаю, что перечисленные ключевые результаты работы являются новыми.



**4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Положения диссертации, выносимые на защиту, обладают необходимыми свойствами.

Обоснованность и достоверность математических моделей, задающих различные виды детерминированных сигналов, линейных звеньев и реакций, моделей нормирования сигналов с различными частотными характеристиками определяется достоверностью и строгостью их математических описаний.

Математические модели временных и частотных характеристик, описывающих свойства линейных звеньев, реакций и сигналов также не вызывают сомнений в силу корректности их описания.

Достоверность методов и систем генерирования стабильных электрических сигналов, обеспечивающих постоянную относительную нестабильность их частотных параметров подтверждена Патентами Республики Беларусь и также не вызывает сомнений.

**5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию.** Представленная Беленкевич Н.И. диссертация имеет выраженные научное и практическое значение.

Научная значимость заключается в разработке простых математических описаний линейных звеньев и сигналов, отличающихся как высокой точностью описания, так и простотой их моделирования.

Прикладная значимость работы определяется тем, что ее реализация является шагом в направлении эффективного и точного моделирования линейных радиотехнических звеньев и сигналов, позволяющих одновременно упростить и повысить точность проектирования радиотехнических устройств.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых отечественных пакетов прикладных программ расчета временных и частотных параметров сигналов, звеньев и реакций (СЗР), весьма полезных при проектировании новых радиотехнических устройств и систем. Полагаю, что результаты работы являются основой нового пакета прикладных программ анализа СЗР.

**6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.** Результаты работы являются опубликованными в достаточной мере: 8 статей в изданиях, соответствующих п. 19 Положения ВАК, из которых три статьи опубликованы без соавторов. 15 статей опубликованы в сборниках материалов научных конференций, 3 тезиса докладов научных конференций.

Отражение опубликованных работ в диссертации, пунктах, выносимых на защиту и в заключении по работе представлено ниже:

1. Глава 1 – 13 публикаций (1-А–6-А, 9-А, 12-А, 23-А, 26-А–29-А), из них 6 публикаций пункта 19 Положения ВАК (1-А–6-А).

2. Глава 2 – 2 публикации (1-А, 6-А), из них 2 публикации пункта 19 Положения ВАК (1-А, 6-А).

3. Глава 3 – 2 публикации (7-А, 8-А), из них 2 публикации пункта 19 Положения ВАК (7-А, 8-А).

4. Глава 4 – 7 публикаций (2-А–4-А, 26-А–29-А), из них 3 публикации пункта 19 Положения ВАК (2-А–4-А).

5. Глава 5 – 17 публикаций (5-А, 10-А–25-А), из них 1 публикация пункта 19 Положения ВАК (5-А).

*Опубликованность по пунктам положений, выносимых на защиту – по пункту 19 Положения ВАК*

1. Положение 1 – 1 публикация (6-А)

2. Положение 2 – 2 публикации (1-А, 6-А)

3. Положение 3 – 1 публикация (8-А)

4. Положение 4 – 1 публикация (7-А)

5. Положение 5 – 3 публикации (2-А–4-А)

*Опубликованность по заключению диссертационной работы*

1. 3 публикации (6-А, 9-А, 12-А), из них 1 публикация пункта 19 Положения ВАК (6-А).

2. 2 публикации (1-А, 6-А), из них 2 публикации пункта 19 Положения ВАК (1-А, 6-А).

3. 1 публикация (8-А), из них 1 публикация пункта 19 Положения ВАК (8-А).

4. 1 публикация (7-А), из них 1 публикация пункта 19 Положения ВАК (7-А).

5. 7 публикаций (2-А–4-А, 26-А–29-А), из них 3 публикации пункта 19 Положения ВАК (2-А–4-А).

6. 16 публикаций (5-А, 10-А–13-А, 15-А–19-А, 21-А–26-А), из них 1 публикация пункта 19 Положения ВАК (5-А).

**7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.** Оформление диссертации требованиям ВАК соответствует. Диссертация и автореферат написаны грамотным языком, доходчиво. Содержание автореферата диссертации соответствует.

## 8. Замечания по диссертации

1) в п.п.5 научной новизны (с.8 диссертации) и с.4 автореферата говорится о двух методах и системе генерирования стабильных сигналов известной формы, которые, в отличие от известных, обеспечивают одинаковую относительную нестабильность несущей частоты, равную относительной нестабильности частоты задающего генератора и далее по тексту. Этот вывод является практически неверным, поскольку имеется множество известных решений с этими свойствами. Строго говоря, неизвестны другие свойства.

Реально, например, во многих современных РЛС с истинной внутренней когерентностью, все радиосигналы и импульсные последовательности формируются из единственного стабилизированного источника сигнала (clock generator). При этом известно, что относительная нестабильность частот этих сигналов (как радиосигналов, так и импульсных последовательностей), строго равна относительной нестабильности частоты clock generator. Поэтому утверждение «... в отличие от известных...» является неверным. Говоря о вариациях относительной нестабильности в диапазоне 1...1000МГц в 1, 2, 3, 21 и 200 раз, автор умалчивает о наличии в альтернативных решениях нескольких дополнительных автономных генераторов радиосигналов, которые, по-видимому, и являются ответственными за вариации относительной нестабильности.

2) Хотя автор и не претендует на моделирование нелинейных звеньев радиотехнических устройств, отсутствие их в перечне возможно моделируемых СЗР ограничивает практическую значимость работы, поскольку практически исключает возможность учета их активных элементов.

**9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.** Соискатель Беленкевич Н.И. обладает нужной для присуждения ученой степени кандидата технических наук квалификации.

**10. Заключение.** Диссертация Беленкевич Н.И. соответствует требованиям гл. 3 Положения ВАК, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук за следующие результаты:

- совместную математическую модель сигналов, звеньев и реакций на комплексной плоскости, построенную на базе операторной дробно-рациональной функции специального вида, которая, в отличие от известных моделей, задает все типы применяемых при моделировании континуальных



детерминированных сигналов, линейных звеньев и реакций, полно описывает их частотно-временные свойства и характеристики, обеспечивает необходимые преобразования моделей сигналов и звеньев, создание развитых библиотек их математических моделей;

– математические модели используемых при моделировании преобразований операторных передаточных функций минимально-фазовых и неминимально-фазовых линейных звеньев, таких как нормирование, денормирование, реактансные преобразования, перемножение и нормализация, которые, в отличие от известных, обеспечивают при всех преобразованиях и их сочетаниях получение модели линейного звена в виде дробно-рациональной функции специального вида и позволяют сформировать модели звеньев с различными видами частотных характеристик, в том числе с несколькими полосами пропускания или (и) задерживания;

– единые математические модели частотных характеристик сигналов, звеньев и реакций, которые, в отличие от известных, описывают амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики всех типов линейных звеньев, амплитудные и фазовые спектры непериодических и периодических сигналов и соответствующих им реакций (в том числе в устранимых особых точках на частотной оси), обеспечивают вычисление энергии и относительной доли энергии для непериодических сигналов, мощности и относительной доли мощности для периодических сигналов в любом исследуемом диапазоне частот;

– единую математическую модель временных характеристик сигналов, звеньев и реакций, которая, в отличие от известных, является результатом разложения по неортогональной системе собственных функций звена и воздействия, представляет любую из временных характеристик (импульсную и переходную характеристики линейного звена, периодические и непериодические сигналы и соответствующие им реакции) в виде конечной суммы слагаемых – в замкнутом виде, благодаря чему обеспечивается предельная точность моделирования из-за отсутствия погрешности метода.

Официальный оппонент

Директор РНПУП «Центр радиотехники НАН Беларуси»

Доктор технических наук профессор

С.М. Костромицкий

*Подпись Костромицкого С.М. удостоверяю*  
*Спец. по кадрам*  
*Ознакомлена (Феленкевич Н.В.)*  
*19.02.2024*

