

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.396.2-047.58:004.42

Кухмар
Дмитрий Александрович

Моделирование сигналов, функциональных звеньев и реакций
в частотной области

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-45 80 01 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Научный руководитель

Ильинков Валерий Андреевич

кандидат технических наук, доцент

Минск 2019

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день системы инфокоммуникаций являются наиболее динамично развивающейся областью науки и техники, для которой характерно многообразие систем и устройств различного функционального назначения, совместное использование широкополосных и узкополосных сигналов, широкий диапазон применяемых рабочих частот, многообразие методов и устройств формирования, передачи, распределения, приема и обработки сигналов. Также область инфокоммуникационных технологий отличается использованием последних достижений информатики, радио- и микроэлектроники, а также сложностью и большим числом преобразований сигналов, что приводит к высоким требованиям к параметрам качества систем и устройств инфокоммуникаций.

В этих условиях существенно увеличилось значение расчетно-теоретического анализа характеристик устройств и систем телекоммуникаций и радиоэлектроники (СТР). В результате возникла материальная база для становления и быстрого развития математического моделирования. Появились реальные предпосылки для использования вычислительного эксперимента не только в качестве расчетно-теоретического сопровождения на стадии отработки технического устройства, но и при его проектировании, подборе и оптимизации его эксплуатационных режимов, анализе его надежности, а также при оценке возможностей форсирования характеристик и модернизации технического устройств.

Математическое моделирование – наиболее эффективное средство анализа и синтеза систем и устройств, поскольку оно существенно интенсифицирует процессы исследования и разработки, решает задачи, часто невыполнимые другими методами, значительно снижает материальные и временные затраты на проектирование и разработку сложных систем (устройств) при одновременном повышении их качества.

В настоящее время математическое моделирование реализуется с помощью программ (пакетов программ) структурнотехнического и схемотехнического моделирования. При этом применяются моделирующие программы, как общего применения, так и специализированные.

На сегодняшний день существует большое число различных программных комплексов математического моделирования. Они обладают рядом определенных особенностей и преимуществ, а именно:

- ускорение процессов анализа и синтеза;
- снижение материальных, интеллектуальных и временных затрат на создание сложных систем (устройств) инфокоммуникаций;
- повышение качества моделирования;

- представление результатов моделирования в визуальной форме;
- поддержка технологии объектно-ориентированного моделирования;
- возможность кастомизации библиотек блоков и элементов.

Несмотря на все особенности и достоинства существующих программных комплексов, они серьезно усложняют процедуру математического моделирования, требуют от исследователя, помимо хорошего знания физических процессов в моделируемой системе, также глубоких знаний по математике, теории цепей и сигналов, программированию, другим дисциплинам, что возможно в редких случаях. Учитывая это, актуальной является разработка многофункциональной программы, пригодной для математического моделирования различных систем инфокоммуникаций, не требующих от пользователя глубоких знаний по совокупности дисциплин. Весьма эффективно применение многофункциональной программы математического моделирования сигналов, функциональных звеньев и реакций в учебном процессе подготовки специалистов инфокоммуникационного профиля.

Целью магистерской диссертации является разработка автоматизированного программного комплекса математического моделирования, обеспечивающего: построение автоматизированных процедур формирования, преобразования и расчета частотно-временных характеристик моделей сигналов, звеньев, реакций; создание развитых библиотек математических моделей сигналов и линейных звеньев.

В соответствии с поставленной целью задачами магистерской диссертации являются:

- сравнительный анализ методов математического моделирования сигналов и функциональных звеньев СТР;
- сравнительный анализ программ математического моделирования сигналов и функциональных звеньев;
- разработка обобщенных математических моделей сигналов и линейных звеньев СТР;
- разработка алгоритмов преобразования математических моделей линейных звеньев СТР;
- совместное математическое описание сигналов, линейных звеньев и реакций СТР;
- разработка алгоритмов расчета частотных характеристик сигналов, линейных звеньев и реакций СТР;
- разработка многофункциональной программы моделирования сигналов, линейных звеньев и реакций в частотной области.

Объектом исследования являются функциональные звенья, сигналы и реакции СТР. Предметом исследования являются математические модели, алгоритмы и процедуры формирования, преобразования и расчета.

В работе использованы методы теории функций комплексного переменного, частотные и временные методы анализа звеньев и устройств систем телекоммуникаций, математическое моделирование, программные методы графического отображения математических моделей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель исследования – разработка автоматизированной программы математического моделирования, обеспечивающей: построение автоматизированных процедур формирования, преобразования и расчета частотных характеристик моделей сигналов, звеньев, реакций; создание развитых библиотек математических моделей сигналов и линейных звеньев.

Задачи исследования:

- сравнительный анализ методов математического моделирования сигналов и функциональных звеньев систем телекоммуникаций и радиоэлектроники;
- сравнительный анализ программ математического моделирования сигналов и функциональных звеньев;
- разработка обобщенных математических моделей сигналов и линейных звеньев систем телекоммуникаций и радиоэлектроники;
- разработка алгоритмов преобразования математических моделей линейных звеньев систем телекоммуникаций и радиоэлектроники;
- совместное математическое описание сигналов, линейных звеньев и реакций систем телекоммуникаций и радиоэлектроники;
- разработка алгоритмов расчета частотных характеристик сигналов, линейных звеньев и реакций систем телекоммуникаций и радиоэлектроники;
- разработка многофункциональной программы моделирования сигналов, линейных звеньев и реакций в частотной области.

Приоритетные направления научных исследований. Тема диссертационной работы соответствует пунктам 5 «Информатика и космические исследования» и 6 «Электроника и фотоника» приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 12 марта 2015 г. № 190. Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Личный вклад магистранта. Сравнительные анализы, выбор подходов, часть теоретической работы и вся экспериментальная работа выполнены лично магистрантом. Определение цели и задач исследования, часть теоретической работы, разработка алгоритмического аппарата и проверка результатов исследования проводились с научным руководителем, кандидатом технических наук, доцентом, В.А. Ильинковым. Диссертация проверена на плагиат, все заимствованные материалы имеют ссылки на литературные источники.

Апробация материалов исследования. Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, Беларусь 2018). Также материалы по теме диссертации опубликованы в 2 работах, в том числе одной статье в научном журнале и одной статье в сборнике материалов семинара. Общий объем опубликованных материалов составляет 12 стр.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к работе отражены актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, предмет и объект исследования, научная новизна и практическая значимость, определена ее методологическая основа.

В первом разделе работы проводился сравнительный анализ методов математического моделирования сигналов и функциональных звеньев в частотной и временной областях и на комплексной плоскости. Для сигналов была рассмотрена их классификация и в соответствие с ней – различные методы моделирования, такие как моделирование рядом Фурье, моделирование полиномами Лежандра, Чебышева, Лагерра и Эрмита, моделирование на основе преобразования Фурье. Для линейных звеньев были определены их свойства в зависимости от типа звена, а также рассмотрены различные способы моделирования: во временной области, в частотной области, метод разностных рекуррентных соотношений и метод на основе операционного исчисления. В конце раздела были определены общие требования к математическому описанию сигналов и функциональных звеньев. Рассмотренные в этом разделе методы математического моделирования в целом отвечают сформулированным требованиям, но с определенными ограничениями. В связи с этим, а также со спецификой проектирования современных ИКС, актуальным является использование единого метода описания сигналов и звеньев на основе единой операторной передаточной функции.

Во втором разделе проводился сравнительный анализ программ математического моделирования сигналов и функциональных звеньев. Все существующие на сегодняшний день программы (пакеты программ)

математического моделирования по сложности выполняемых задач можно разделить на две категории:

– программы общего применения – данные программы в основном применяются для моделирования задач и приложений в различных областях науки и техники;

– специализированные программы – данные программы предназначены для моделирования систем и устройств радиоэлектроники и телекоммуникаций на функциональном и схемотехническом уровнях.

В разделе были рассмотрены наиболее известные примеры программных пакетов из обеих категорий, выделены их достоинства и недостатки. Анализ показал, что разрабатываемая многофункциональная программа должна иметь развитый диалоговый режим работы и обязательно содержать в своем составе модули частотных характеристик и их расчета в частотной области, а также модуль «Оперативная библиотека звеньев и сигналов». Такая структура моделирующей программы позволит до минимума сократить объем черновой подготовительной работы, обычно весьма существенный при моделировании систем инфокоммуникаций.

В третьем разделе разрабатывались обобщенные математические модели сигналов и линейных звеньев. В качестве основного метода моделирования, отвечающего всем рассмотренным ранее требованиям, было выбрано описание на комплексной плоскости – операторной передаточной функцией $K_Z(p)$. С помощью данного метода были разработаны модель линейных звеньев специального вида (1), а также обобщенная модель сигнала (2):

$$K_Z(p) = \frac{A_Z(p)}{C_Z B_Z(p)} = \frac{\prod_{x=1}^{N_{Z3}} (p + a_{Z3x})^{n_{Z3x}} \prod_{y=1}^{N_{Z4}} (p^2 + 2a_{Z4y}p + a_{Z4y}^2 + \omega_{Z4y}^2)^{n_{Z4y}}}{C_Z \prod_{s=1}^{N_{Z1}} (p + a_{Z1s})^{n_{Z1s}} \prod_{l=1}^{N_{Z2}} (p^2 + 2a_{Z2l}p + a_{Z2l}^2 + \omega_{Z2l}^2)^{n_{Z2l}}}, \quad (1)$$

$$S_i(p) = \frac{A_i(p)}{C_i B_0(p)} = \frac{\prod_{x=1}^{N_{i3}} (p + a_{i3x})^{n_{i3x}} \prod_{y=1}^{N_{i4}} (p^2 + 2a_{i4y}p + a_{i4y}^2 + \omega_{i4y}^2)^{n_{i4y}}}{C_i \prod_{s=1}^{N_{01}} (p + a_{01s})^{n_{01s}} \prod_{l=1}^{N_{02}} (p^2 + 2a_{02l}p + a_{02l}^2 + \omega_{02l}^2)^{n_{02l}}}. \quad (2)$$

Использование описания линейных звеньев в форме (1) и описания сигналов в форме (2) позволит удовлетворить все требования, предъявляемые к математическому описанию линейных звеньев и сигналов, описанные ранее.

В четвертом разделе были разработаны алгоритмы преобразования математических моделей линейных звеньев на основе операторной функции (1). Были описаны такие операции как денормирование, транспонирование в ФВЧ, ПФ и ЗФ, а также перемножения моделей. В результате был сделан вывод о том, все операции что приводят к совпадающим по форме передаточным функциям в виде (1). Это обеспечивает построение автоматизированных процедур формирования, преобразования и расчета частотно-временных характеристик моделей, создание развитых библиотек математических моделей (не)минимально-фазовых линейных звеньев.

В пятом разделе было разработано совместное математическое описание сигналов, линейных звеньев и реакций на комплексной плоскости и в частотной области. Совместное использование моделей (1), (2) и операционного метода позволило ввести в рассмотрение базовую операторную функцию специального вида

$$R_{00}(p) = \frac{A(p)}{CB(p)} = \frac{\prod_{x=1}^{N_3} (p + a_{3x})^{n_{3x}} \prod_{y=1}^{N_4} (p^2 + 2a_{4y}p + a_{4y}^2 + \omega_{4y}^2)^{n_{4y}}}{C \prod_{s=1}^{N_1} (p + a_{1s})^{n_{1s}} \prod_{l=1}^{N_2} (p^2 + 2a_{2l}p + a_{2l}^2 + \omega_{2l}^2)^{n_{2l}}}, \quad (3)$$

основываясь на которой было предложено совместное математическое описание (на комплексной плоскости) в виде

$$R(p) = \left(R_{2Z}(p)e^{-pt_2} - R_{1Z}(p)e^{-pt_1} \right) \left(1 - e^{-pT} \right)^{-1} \quad (4)$$

Детальная реализация обобщенной модели (4) позволяет создать единый математический алгоритм и на его основе автоматизированную процедуру расчета частотных характеристик (АЧХ, ФЧХ, ХРЗ, ХГВЗ) линейных звеньев, амплитудных и фазовых спектров сигналов и реакций.

В шестом разделе были разработаны алгоритмы расчета частотных характеристик сигналов, линейных звеньев и реакций систем телекоммуникаций и радиоэлектроники. Исходя из свойств (3), выполняя необходимые преобразования получили функции, описывающие ЧХ на частотах ω , которым соответствуют точки $p = j\omega$ на мнимой оси комплексной плоскости:

$$R_T(\omega) = \left(R_{TR}^2(\omega) + R_{TI}^2(\omega) \right)^{1/2}$$

$$\theta_T(\omega) = \begin{cases} \arctg \frac{R_{TI}(\omega)}{R_{TR}(\omega)} + \begin{cases} 0 \\ 2\pi \end{cases}, & \begin{cases} R_{TR}(\omega) > 0, R_{TI}(\omega) > 0 \\ R_{TR}(\omega) > 0, R_{TI}(\omega) < 0 \end{cases} \\ \begin{cases} \pi / 2 \\ 3\pi / 2 \end{cases}, & \begin{cases} R_{TR}(\omega) = 0, R_{TI}(\omega) > 0 \\ R_{TR}(\omega) = 0, R_{TI}(\omega) < 0 \end{cases} \\ 0, & R_{TI}(\omega) = 0, R_{TR}(\omega) \geq 0 \\ \arctg \frac{R_{TI}(\omega)}{R_{TR}(\omega)} + \pi, & R_{TR}(\omega) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Исходя из полученных функций и свойств (3) был разработан единый алгоритм расчета частотных характеристик сигналов, звеньев и реакций, который позволяет моделировать помимо частотных характеристик, также энергетические характеристики сигналов и реакций.

В седьмом разделе велась разработка многофункциональной программы моделирования сигналов, линейных звеньев и реакций в частотной области. Вначале были разработаны блок-схемы программы-оболочки и программ-процедур: денормирования, транспонирования ФНЧ в ФВЧ, ПФ и ЗФ, вычисления произведения моделей, расчета частотных характеристик. Затем были сформулированы требования и разработаны структуры стационарной и оперативной библиотек моделей. После был разработан интерфейс программы, соответствующий всем ранее определенным требованиям (см. рисунок 1).

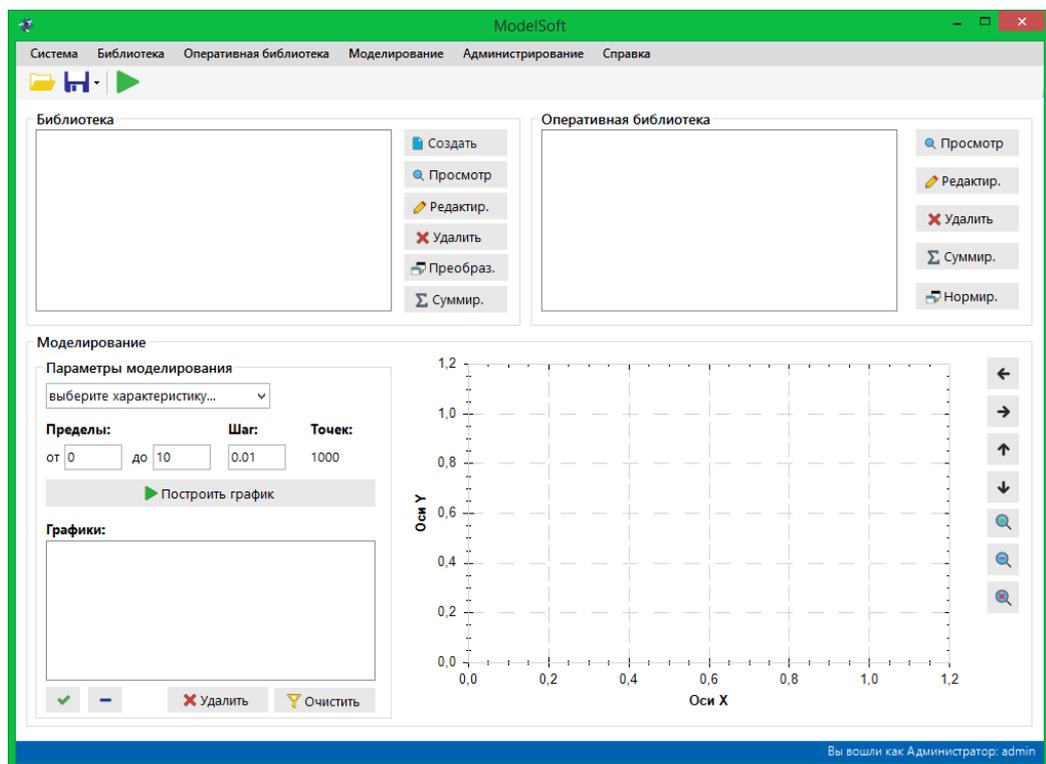


Рисунок 1 – Интерфейс программы (главное окно)

Для проверки программы были промоделированы частотные характеристики линейных звеньев, сигналов и реакций. Примеры характеристик представлены на рисунке 2.

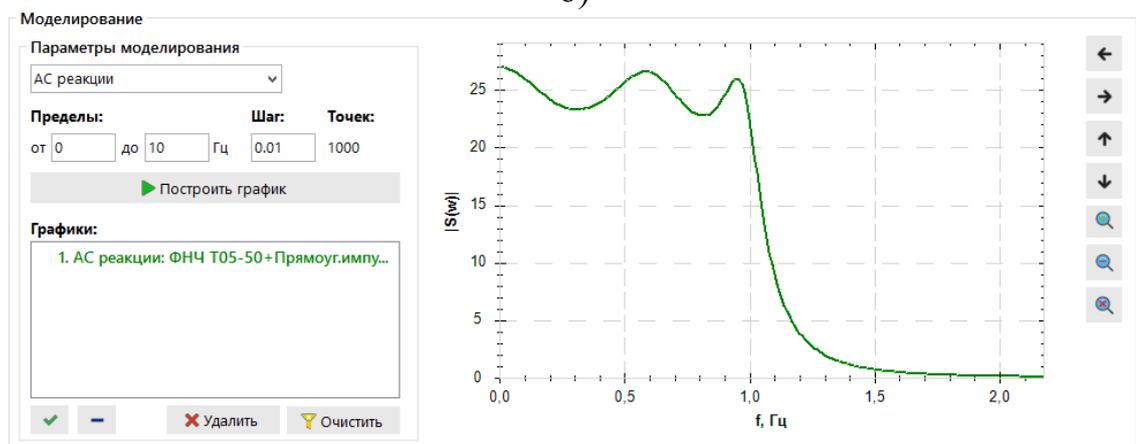
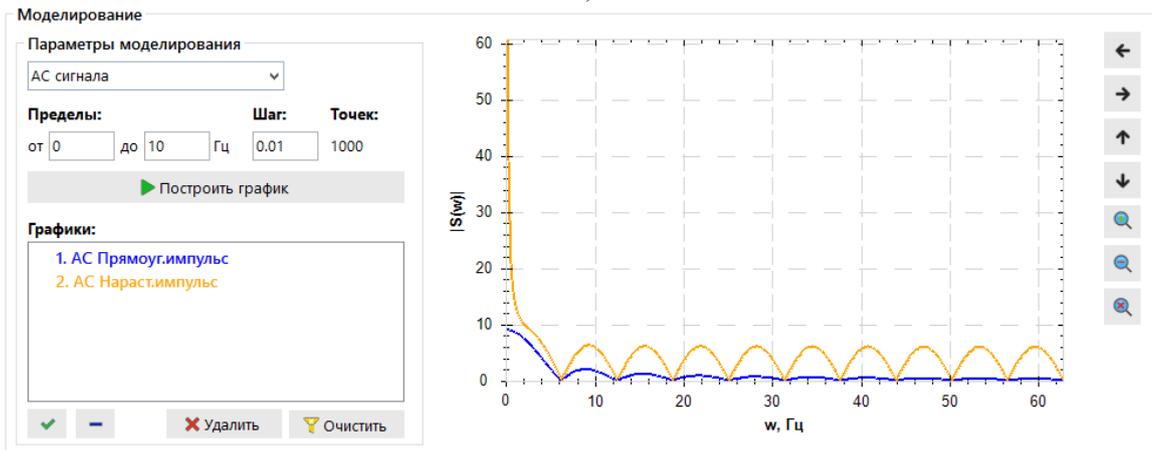
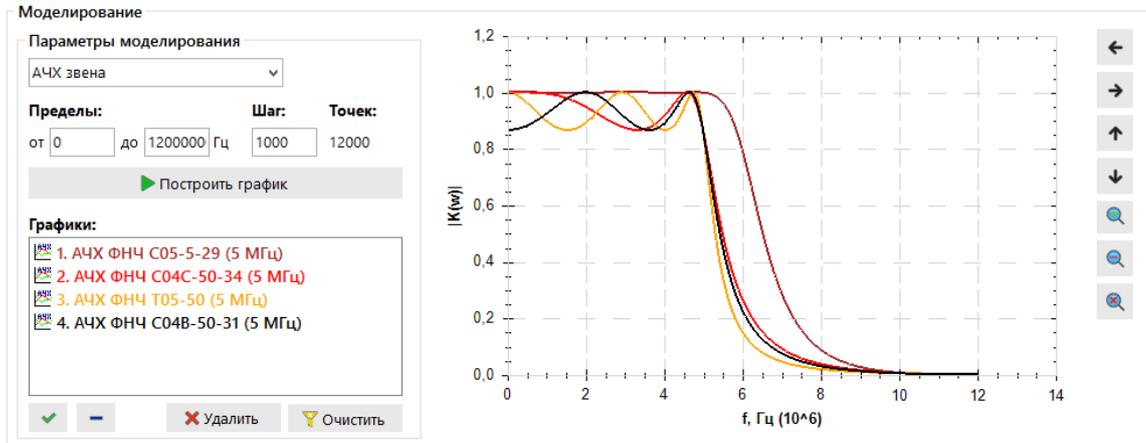


Рисунок 2 – Примеры частотных характеристик различных моделей: а – АЧХ ФНЧ; б – АС сигналов; в – АС реакции

Исходя из полученных результатов было доказано, что моделирующая программа работает со всеми необходимыми библиотеками линейных звеньев и сигналов и, соответственно, пригодна для использования в учебном процессе и в научных исследованиях.

В заключении подведены итоги проведенного исследования, подтверждены значимость и актуальность выбранной темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы над магистерской диссертацией был проведен сравнительный анализ методов математического моделирования сигналов и функциональных звеньев СТР, в результате которого были сформированы требования к математическому описанию сигналов и функциональных звеньев.

Далее был проведен сравнительный анализ программ математического моделирования сигналов и функциональных звеньев, в котором были выявлены недостатки и характерные особенности существующих программ моделирования, а также определены требования к разрабатываемому ПО.

На основании существующих методов математического моделирования сигналов и функциональных звеньев были разработаны обобщенных математических моделей линейных звеньев (общего и специального вида) и сигналов, позволяющие удовлетворить всем требованиям, предъявляемые к математическому описанию линейных звеньев и сигналов, сформулированных ранее.

Согласно разработанным обобщенным моделям линейных звеньев были разработаны алгоритмы преобразования данных моделей. Разработанные алгоритмы позволяют преобразовывать звенья таким образом, чтобы после преобразования они по виду совпадали с исходной моделью, что дает возможность быстро и эффективно преобразовывать модели, а также обеспечивает построение автоматизированных процедур формирования, преобразования и расчета частотно-временных характеристик моделей, создание развитых библиотек математических моделей (не)минимально-фазовых линейных звеньев.

Исходя из описанных ранее математических моделей линейных звеньев и сигналов, было разработано совместное математическое описание сигналов, линейных звеньев и реакций. Детальная реализация обобщенной модели позволяет создать единый математический алгоритм и на его основе автоматизированную процедуру расчета частотных характеристик линейных звеньев, амплитудных и фазовых спектров сигналов и реакций.

На основе разработанного совместного математического описания сигналов, линейных звеньев и реакций были разработаны алгоритмы расчета

частотных характеристик сигналов, линейных звеньев и реакций. Помимо частотных характеристик они позволяют рассчитывать также энергетические характеристики сигналов и реакций, включая энергию (мощность) и относительную долю энергии (мощности) в любом исследуемом диапазоне частот. Последнее важно для оценки электромагнитной совместимости.

Согласно всем вышеописанным алгоритмам были разработаны блок-схема программы-оболочки и блок-схемы программ-процедур многофункциональной программы моделирования линейных звеньев, сигналов и реакций в частотной области, стационарная и оперативная библиотеки линейных звеньев и сигналов. На основе их разработана моделирующая программа (на языке программирования C#), пригодная для использования в учебном процессе и в научных исследованиях.

В ходе работы над диссертацией за основу брались только оптимальные решения, способные обеспечить лучшее соотношение между требуемыми техническими характеристиками, затратами на разработку и внедрение и доступностью системы.

Исходя из всего вышеописанного, можно сделать вывод о том, что цель и задачи диссертации, поставленные в введении, выполнены в полном объеме.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1–А. Беленкевич Н.И., Ильинков В.А., Кухмар Д.А. Моделирование сигналов, линейных звеньев и реакций систем телекоммуникаций и радиоэлектроники в частотной области / Н.И. Беленкевич // Доклады БГУИР. – 2018. – №4 (114). – С. 29–36.

2–А. Кухмар Д.А. Разграничение прав доступа в образовательном программном обеспечении / Д.А. Кухмар // Телекоммуникации: сети и технологии алгебраическое кодирование данных и безопасность. Материалы международного научно-технического семинара. – Минск.: БГУИР, ноябрь-декабрь 2018.– С. 98–101.