

УДК 621.391.83:621.376

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ И ЗВЕНЬЕВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Беленкевич Н.И., Ильинков В.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь, belenkevich@bsuir.by

Аннотация. Рассмотрены этапы математического и физического моделирования сигналов и звеньев систем радиофизики, радиоэлектроники и телекоммуникаций, предложена структура программно-аппаратного комплекса моделирования, разработаны его основные подсистемы. Рассмотрено применение комплекса в учебном процессе, разработан проект унифицированной учебной лаборатории моделирования сигналов и систем.

Ключевые слова. Комплекс, моделирование, сигнал, звено, характеристика, программа.

Системы радиофизики, радиоэлектроники и телекоммуникаций (СРПТ) представляют наиболее динамичную область науки и техники. Основным инструментом их проектирования и разработки – математическое и физическое моделирование [1]. Известные средства моделирования обладают следующими существенными недостатками [1, 2]: отсутствие развитых библиотек моделей сигналов и звеньев; отсутствие автоматизированных процедур формирования, преобразования моделей и расчета частотных, временных, энергетических характеристик и, как следствие, недостаточная для многих приложений точность моделирования; большой объем подготовительной работы; значительное время моделирования (средства математического моделирования); недостаточная для многих применений точность моделирования из-за отсутствия источников требуемого множества сигналов (воздействий) различной формы в широком диапазоне частот (времен); весьма значительные материальные затраты (средства физического моделирования).

Оптимальным решением указанных недостатков является применение относительно недорогих программно-аппаратных комплексов (ПАК) математического и физического моделирования (на структурно-техническом уровне) сигналов и функциональных звеньев. Содержательный анализ недостатков средств моделирования показывает, что для их устранения такой ПАК должен обладать следующими свойствами [1]: иметь развитые библиотеки математических моделей сигналов и линейных звеньев; иметь автоматизированные процедуры формирования и преобразования моделей сигналов и звеньев; иметь эффективную автоматизированную процедуру моделирования частотных и энергетических характеристик сигналов, звеньев и реакций (СЗР), а также аналогичную моделирования временных характеристик СЗР; генерировать множество сигналов и реакций различных типов и форм в широком диапазоне частот (времен); реализовывать в реальном масштабе времени виртуальные физические модели исследуемых звеньев и устройств. Такой ПАК, помимо области проектирования и разработки СРПТ, может успешно применяться также в составе информационно-измерительных систем и комплексов, в качестве самостоятельных устройств генерирования сигналов,

в учебном процессе подготовки специалистов в области СРПТ. С учетом изложенного, создание ПАК с приведенными свойствами представляет актуальную и сложную научно-техническую задачу.

Математическое и физическое моделирование свойств сигналов и звеньев СРПТ предусматривает выполнение следующих этапов:

формирование и преобразование математических моделей минимально-фазовых и неминимально-фазовых линейных звеньев;

формирование и преобразование математических моделей простых и составных (компонентных, композитных) сигналов (воздействий);

расчет, количественный и качественный анализ характеристик математических моделей СЗР в частотной области (амплитудных и фазовых спектров сигналов и реакций, частотных характеристик (АЧХ, ФЧХ, ХРЗ и ХГВЗ) звеньев, мощности (энергии) сигналов и реакций в заданной полосе частот);

расчет, количественный и качественный анализ математических моделей характеристик СЗР во временной области (временных характеристик сигналов и реакций, импульсной и переходной характеристик звеньев) (этапы математического моделирования);

формирование физических моделей – генерирование в реальном масштабе времени (по результатам математического моделирования во временной области) сигналов (воздействий) и реакций;

измерение, количественный и качественный анализ характеристик физических моделей СЗР в частотной и временной областях (этапы физического моделирования).

Предлагается структура такого ПАК [1], обеспечивающего выполнение всех этапов математического и физического моделирования (рисунок 1). ПАК содержит в себе: систему 1 математического моделирования, библиотеку 2 виртуальных систем, систему 3 подготовки формального описания, ПЭВМ 4, систему 5 генерирования сигналов и реакций, систему 6 измерения и контроля.

Система математического моделирования. Ядром всего ПАК является система математического моделирования, которую по указанным ниже причинам целесообразно разрабатывать в виде многофункциональной программы математического моделирования сигналов и звеньев СРПТ.

Известно, математическое моделирование свойств сигналов и звеньев СРРТ отличают: многообразие и сложность моделей сигналов (воздействий) и моделей звеньев; большой объем черновой подготовительной работы; сложность процедуры и большой объем вычислений при нахождении частотно-временных характеристик, зависящие от применяемых моделей и метода моделирования. Отмеченные особенности серьезно усложняют математическое моделирование, требуют от исследователя, помимо хорошего знания физических процессов в моделируемой системе, также глубоких знаний по математике, теории цепей и сигналов, программированию и другим дисциплинам, что возможно в редких случаях. Учитывая изложенное, актуальной является разработка так называемых многофункциональных программ (МП) математического моделирования сигналов и звеньев, которые не требуют от пользователя глубоких знаний по совокупности дисциплин и, значит, предназначены для широкого круга специалистов в области СРРТ.



Рисунок 1 – Структура ПАК моделирования сигналов и звеньев СРРТ

Последующий анализ показывает, что подобная МП математического моделирования сигналов и звеньев должна иметь развитый диалоговый режим работы и обязательно содержать в своем составе следующие модули [1]: стационарную и оперативную библиотеки моделей сигналов; стационарную и оперативную библиотеки моделей линейных звеньев; модуль формирования моделей модулированных сигналов; модуль преобразования моделей линейных звеньев; модуль расчета частотных характеристик; модуль расчета временных характеристик. Такая структура моделирующей программы позволяет до минимума сократить объем черновой подготовительной работы, обычно весьма существенный при моделировании СРРТ, а саму процедуру математического моделирования многократно упростить и свести к выполнению четырех этапов: формирование и преобразование математических моделей минимально-фазовых и неминимально-фазовых линейных звеньев; формирование и преобразование математических моделей простых и составных (компонентных, композитных) сигналов; расчет, количественный и качественный анализ характеристик СЗР в частотной области; расчет, количественный и качественный анализ характеристик СЗР во временной области. Каждый из упомянутых этапов обеспечивается с помощью соответствующих модулей МП. Общение пользователя с программой осуществляется через программу-оболочку, имеющую выход на все мо-

дули. Для удобства работы и сокращения времени моделирования некоторые модули взаимодействуют друг с другом напрямую, минуя программу-оболочку.

Стационарная библиотека звеньев предназначена для хранения математических моделей (не)минимально-фазовых линейных звеньев с различными частотными характеристиками. Модели звеньев в ней задаются операторной передаточной функцией $K_z(p)$ в форме базовой функции $R_{00}(p)$ комплексного переменного специального вида [2], обеспечивающей совместное описание СЗР

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

Такое представление: описывает с высокой точностью (не)минимально-фазовые линейные звенья практически с любыми видами АЧХ и ФЧХ (ФНЧ, ФВЧ, ПФ, ЗФ, фильтры с несколькими полосами пропускания или задерживания, фазовые контуры, фильтры с элементами фазовой коррекции); соответствует по форме (нормированным) операторным передаточным функциям так называемых ФНЧ-прототипов, содержащихся в различных справочных пособиях (использование последних устраняет сложную процедуру аппроксимации и нахождения корневых характеристических полиномов); обеспечивает построение эффективных алгоритмов преобразования моделей и расчета частотно-временных характеристик. С учетом изложенного стационарная библиотека хранит в себе параметры нормированных операторных передаточных функций ФНЧ-прототипов (коэффициентов базовой функции $R_{00}(p)$). Она предполагает наиболее удобный для пользователя страничный принцип организации, где каждая страница дополнительно содержит общие сведения о фильтре: тип фильтра, значения рабочих параметров. Стационарная библиотека реализует следующие процедуры: ручной и автоматический ввод параметров моделей звеньев; формирование операторных передаточных функций; графо-аналитическое представление звеньев – визуальное отображение операторной передаточной функции, общего вида частотных характеристик и дополнительных сведений о фильтре.

Модуль преобразования моделей звеньев реализует следующие процедуры: нормирование/денормирование модели; реактансное преобразование ФНЧ→ФВЧ первой степени; реактансные преобразования ФНЧ→ПФ и ФНЧ→ЗФ второй степени; перемножение и нормализация моделей [2]. Совместное применение стационарной библиотеки и модуля преобразования позволяет сформировать математическую модель линейного звена практически с любой формой частотных характеристик.

Стационарная библиотека сигналов предназначена для хранения математических моделей так называемых базовых сигналов [2] – простых сигналов, построенных на основе одной образующей функции $\varphi(t)$ (рисунок 2). Линейной суперпозицией базовых сигналов образуется требуемый составной (периодический, непериодический финитный, непериодиче-

ский бесконечно протяженный) компонентный или композитный сигнал. Базовые сигналы (рисунок 2) задаются на комплексной плоскости с помощью операторных функций $S_0(p)$, $S_1(p)$ и $S_2(p)$ в форме базовой функции $R_{00}(p)$ [2]

$$\varphi_{iT}(t) = \begin{cases} \varphi(t), & [(i-1)(i-2)t_1/2, t_1 + (i-1)^2(t_2 - t_1)] \\ 0, & (-\infty, (i-1)(i-2)t_1/2) \cup [t_1 + (i-1)^2(t_2 - t_1), \infty) \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha_i(t) = \begin{cases} \varphi(t), & [i(2-i)t_1 + i(i-1)t_2/2, \infty) \\ 0, & (-\infty, i(2-i)t_1 + i(i-1)t_2/2) \end{cases}$$

$$\Phi_i(t) = \begin{cases} \varphi_{iT}(t), & [0, T) \\ \varphi_i(t+T), & (-\infty, \infty) \end{cases}$$

$$0 \leq t_1 < t_2 \leq T, i = 0, 1, 2;$$

$$\Phi_{0T}(t) \Leftrightarrow \bar{\Phi}_{0T}(p) = S_2(p)e^{-pt_2} - S_1(p)e^{-pt_1}, \quad (3)$$

$$\Phi_{1(2)T}(t) \Leftrightarrow \bar{\Phi}_{1(2)T}(p) = S_{1(2)}(p)e^{-pt_{1(2)}} - S_0(p),$$

$$\alpha_0(t) \Leftrightarrow \bar{\alpha}_0(p) = -S_0(p) = -\lim_{t_1 \rightarrow 0} S_1(p) = -\lim_{t_2 \rightarrow 0} S_2(p),$$

$$\alpha_{1(2)}(t) \Leftrightarrow \bar{\alpha}_{1(2)}(p) = -S_{1(2)}(p)e^{-pt_{1(2)}},$$

$$\Phi_{0(1,2)}(t) \Leftrightarrow \bar{\Phi}_{0(1,2)}(p) = \bar{\Phi}_{0(1,2)T}(p)(1 - e^{-pT})^{-1}.$$

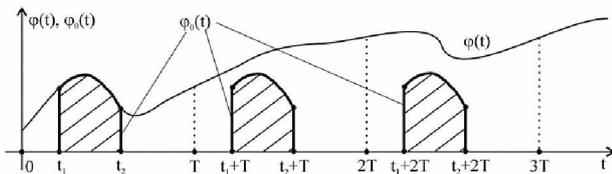


Рисунок 2 – Воздействия $\varphi(t)$, $\varphi_0(t)$

Такое представление не накладывает ограничений на вид моделируемых сигналов, обеспечивает необходимые преобразования их математических моделей и создание развитой библиотеки последних, оптимально согласуется с описанием звеньев. Стационарная библиотека сигналов, как и аналогичная звеньев, предполагает страничный принцип организации, где каждая страница дополнительно содержит общие сведения о сигнале: тип сигнала, значения амплитудных, временных, частотных и фазовых параметров. Библиотека реализует следующие процедуры: ввод параметров моделей сигналов; формирование лапласовских изображений; графо-аналитическое представление сигналов – визуальное отображение лапласовского изображения, временной реализации и общих сведений о сигнале.

Модуль формирования моделей модулированных сигналов предназначен для преобразования лапласовских изображений исходных (относительно низкочастотных) модулирующих сигналов в лапласовские изображения (высокочастотных) модулированных сигналов при различных видах модуляции. Модуль реализует процедуры формирования изображений и графо-аналитического представления модулированных сигналов.

Оперативные библиотеки звеньев и сигналов существенно индивидуальны. Они создаются каждым исследова-

вателем в начале цикла моделирования и обычно недоступны другим пользователям МП. При этом оперативная библиотека звеньев реализует процедуры формирования математических моделей конкретных звеньев и графо-аналитического представления их характеристик, а оперативная библиотека сигналов – процедуры формирования математических моделей конкретных составных (композиционных, компонентных) модулирующих и модулированных сигналов и графо-аналитического представления характеристик последних. В процессе работы пользователь, просматривая стационарные библиотеки (доступные ему только в режиме чтения), выбирает необходимые ему модели звеньев, базовых сигналов и заносит их в оперативные библиотеки. Далее, используя обозначенные выше возможности оперативных библиотек и (при необходимости) других модулей МП, автоматически синтезируются математические модели необходимых пользователю сигналов и линейных звеньев.

Модуль расчета частотных характеристик обеспечивает третий этап математического моделирования: расчет, количественный и качественный анализ характеристик математических моделей СЗР в частотной области. Он выполняет следующие процедуры [4]: расчет амплитудных и фазовых спектров сигналов и реакций, а также частотных характеристик звеньев; расчет энергетических характеристик (мощности, энергии) сигналов и реакций в заданной полосе частот; графическое представление результатов.

Модуль расчета временных характеристик обеспечивает четвертый этап математического моделирования: расчет, количественный и качественный анализ характеристик математических моделей СЗР во временной области. Он выполняет следующие процедуры [5]: расчет временных характеристик сигналов и реакций, импульсной и переходной характеристик звеньев; графическое представление результатов; формирование массивов отсчетных значений сигналов, реакций и временных характеристик звеньев (для системы генерирования сигналов и реакций).

Система генерирования сигналов и реакций. Система генерирования сигналов и реакций, входящая в структуру ПАК (рисунок 1), обеспечивает пятый этап математического и физического моделирования линейных свойств сигналов и звеньев СРРТ, а именно: формирование физических моделей – генерирование в реальном масштабе времени (по отсчетным значениям, образуемым в модуле расчета временных характеристик МП) сигналов (воздействий) и реакций. Функции системы генерирования выполняет высокочастотная широкодиапазонная широкополосная автономная трехканальная система одновременного генерирования двух относительно низкочастотных (в диапазоне до 70 МГц) модулирующих и одного высокочастотного (в диапазоне до 1000 МГц) модулированного сигналов различной формы [3]. Причем, в качестве низкочастотных могут выступать либо два сигнала различной формы и разных (в общем случае некратных) периодов (частот) повторения, либо два



одинаковых сигнала, смещенных по времени (фазе). Отмеченные особенности существенно расширяют возможности физического моделирования.

Система измерения и контроля. Система измерения и контроля (рисунок 1) обеспечивает шестой (заключительный) этап математического и физического моделирования СРРТ: измерение, количественный и качественный анализ характеристик физических моделей СЗР в частотной и временной областях. Она включает в себя осциллограф, анализатор спектра, частотомер и, при необходимости, другие измерительные приборы (в расширенном варианте).

Система подготовки формального описания. Наличие рассматриваемой системы в составе ПАК позволяет: многократно уменьшить объем черновой подготовительной работы; формализовать и ускорить техническое оформление результатов моделирования; создавать виртуальные физические модели исследуемых систем. Как известно, в окончательном виде формальное описание представляет собой структурную (функциональную) схему и совокупность математических моделей, описывающих сигналы на входах и выходах всех структурных компонентов и системы в целом. Учитывая изложенное, система подготовки формального описания реализует следующие процедуры: быстрое построение и графическое отображение структурной (функциональной) схемы моделируемой системы; задание моделей сигналов (воздействий, реакций) во всех точках структурной схемы; текстовое описание свойств каждого структурного компонента; формирование массивов отсчетных значений (для системы 5 генерирования) и графическое отображение сигналов. Дополнительное привлечение системы 5 генерирования позволяет сформировать (в каждой точке структурной схемы) в реальном масштабе времени соответствующий электрический сигнал (воздействие, реакцию), то есть в совокупности реализовать виртуальную физическую модель исследуемой системы.

Библиотека виртуальных систем. Библиотека 2 предназначена для хранения разработанных и доступных пользователям проектов виртуальных физических моделей различных СРРТ.

Как показано выше, помимо области проектирования и разработки СРРТ, ПАК может успешно применяться в процессе подготовки специалистов. Качественная подготовка специалистов в области СРРТ требует больших материальных, интеллектуальных и временных затрат. В настоящее время она дополнительно усложняется моральным и физическим старением существующей материально-технической базы, обновление которой по финансовым причинам весьма затруднительно. Ослабить негативное влияние этого процесса пытаются все большим применением методов и средств математического моделирования. Однако такой подход в обучении сопровождается ухудшением практических навыков и резким увеличением времени адаптации молодых специалистов к задачам производства. Для совмещения хорошей теоретической и практической подготовки будущих специалистов необходимо на всем протяжении

учебного процесса широко использовать, помимо математического, также физическое моделирование. Последнее означает, что студенты радиоэлектронных, радиофизических и инфокоммуникационных специальностей должны: постоянно работать с электрическими сигналами разных типов, форм, видов модуляции и диапазонов частот; свободно владеть методами и средствами измерения их параметров в частотной и временной областях на входе/выходе реальных функциональных звеньев. Устаревшая материально-техническая база делает физическое моделирование практически невозможным. Поэтому весьма перспективно применение предлагаемого ПАК математического и физического моделирования сигналов и звеньев в качестве обучающего программно-аппаратного комплекса (ОПАК) в учебном процессе подготовки (переподготовки) специалистов в области СРРТ и смежных областях.

Полноформатная аппаратная и программная реализация предлагаемого ПАК требует больших материальных и интеллектуальных ресурсов. Учитывая изложенное, в БГУИР на кафедре инфокоммуникационных технологий (ИКТ) разработан и внедрен в учебный процесс в качестве обучающего комплекса упрощенный вариант предлагаемого ПАК. В структуре разработанного ОПАК отсутствует система подготовки формального описания. В качестве системы генерирования сигналов и реакций используется генератор сигналов сложной формы Г6-45/1 – совместная разработка кафедры ИКТ и ОАО «Амкор-Белвар». Система математического моделирования, входящая в ОПАК, для упрощения реализована в виде двух самостоятельных программ: программы моделирования частотных характеристик (ЧХ); программы моделирования временных характеристик (ВХ). При этом программа моделирования ЧХ частично совмещает функции оперативной библиотеки звеньев, модуля преобразования моделей звеньев и модуля расчета ЧХ предлагаемой МП. Она реализует следующие процедуры: формирование моделей конкретных звеньев; нормирование/денормирование модели; реактансное преобразование ФНЧ→ФВЧ первой степени; реактансные преобразования ФНЧ→ПФ и ФНЧ→ЗФ второй степени; перемножение моделей; расчет частотных характеристик (АЧХ, ФЧХ, ХРЗ, ХГВЗ) звеньев; графическое представление результатов. Программа моделирования ВХ частично совмещает функции оперативной библиотеки сигналов, оперативной библиотеки звеньев и модуля расчета ВХ предлагаемой МП. Она реализует следующие процедуры: формирование моделей конкретных сигналов; формирование моделей конкретных звеньев; расчет сигналов и реакций; графическое представление результатов; формирование массивов отсчетных значений сигналов и реакций (для системы генерирования ОПАК).

Выполненные процедуры моделирования конкретных сигналов и звеньев показывают достаточно большие возможности разработанного ОПАК, благодаря чему он эффективно используется в учебном процессе кафедры инфокоммуникационных техно-



логий БГУИР [1]. Семейство из семи ОПАК образует учебно-лабораторную базу учебной лаборатории моделирования систем и успешно применяется в учебном процессе по дисциплинам «Моделирование систем инфокоммуникаций», «Основы теории сигналов», «Основы теории фильтрации», «Телевидение и отображение информации».

Накопленный опыт проведения занятий и исследований по дальнейшему применению ОПАК в учебном процессе позволяют утверждать следующее.

1. Реализация лабораторных работ на базе ОПАК, обеспечивающего и математическое, и физическое моделирование сигналов и звеньев СРРТ, переводит обучение на новый технологический уровень, повышает мотивацию студентов, их теоретическую и практическую подготовку.

2. На базе ПАК сравнительно просто реализовать виртуальные физические модели сложных и разнообразных по свойствам систем и устройств. Это делает возможным и весьма целесообразным использование ОПАК: для создания фронтальных циклов лабораторных работ по совокупности дисциплин специальностей СРРТ (для студентов первой ступени); для постановки физических экспериментов в научных исследованиях; в учебном процессе студентов второй ступени (магистрантов) для усиления их теоретической и практической подготовки.

3. Целесообразно наличие в составе ОПАК системы подготовки формального описания (рисунок 1). При ее наличии пользователь (преподаватель), обладающий минимальными знаниями в области алгоритмизации и программирования, может подготовить в предельно короткие сроки фронтальный цикл лабораторных работ по конкретной дисциплине.

4. С целью оптимизации учебного процесса и экономии материальных ресурсов логично создание на основе ОПАК унифицированных учебных лабораторий (УУЛ) моделирования сигналов и систем.

Отвечая на последнее, разработан технический проект УУЛ [1], которая обладает следующими возможностями:

подготовка и проведение фронтальных циклов лабораторных работ по совокупности дисциплин специальностей СРРТ (в формате один студент на одно учебно-лабораторное место (УЛМ));

подготовка и проведение циклов практических занятий по совокупности дисциплин специальностей

СРРТ (в формате два студента на одно учебно-лабораторное место);

подготовка и проведение научно-технических семинаров, занятий и консультаций с аспирантами и магистрантами.

Техническое оснащение лаборатории состоит из 15 ОПАК и одного технического комплекса преподавателя, образующих в совокупности локальную вычислительную сеть. Технический комплекс преподавателя включает: сервер (основа сети); проектор и документ-камеру (обеспечивают проведение полноценных практических занятий); DVD-проигрыватель и две цифровые фотокамеры (источники испытательных (исследуемых) сигналов, моно- и 3D-изображений).

В заключение полезно оценить потенциальный объем основного рынка ОПАК. В настоящее время в Российской Федерации функционируют, по минимальной оценке, около сотни университетов (факультетов), где возможно и целесообразно применение подобных ОПАК. При этом каждый такой факультет содержит не менее двух-трех кафедр. На каждой кафедре необходимо иметь, минимально, две УУЛ, каждая из которых содержит не менее 10 – 15 ОПАК.

Литература

1. Комплекс моделирования сигналов и систем / Н.И. Беленкевич [и др.] – Компоненты и технологии. – 2017. – № 5.
2. Беленкевич, Н.И. Совместное математическое описание сигналов, линейных звеньев и реакций систем телекоммуникаций и радиоэлектроники / Н.И. Беленкевич, В.А. Ильинков. – Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2017. – № 4.
3. Ильинков, В.А. Метод и система генерирования сигналов различной формы в широком диапазоне частот / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич. – Электро-связь. – 2013. – № 9.
4. Беленкевич, Н.И. Моделирование сигналов, линейных звеньев и реакций систем телекоммуникаций и радиоэлектроники в частотной области / Н.И. Беленкевич, В.А. Ильинков, Д.А. Кухмар. – Доклады БГУИР. – 2018. – № 4 (114).
5. Беленкевич, Н.И. Математическое моделирование сигналов, линейных звеньев и реакций систем телекоммуникаций и радиоэлектроники во временной области / Н.И. Беленкевич, В.А. Ильинков. – Доклады БГУИР. – 2021. – том 19 (7).

THE SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR MODELLING OF SIGNALS AND LINKS AND ITS USE IN THE ADUCATIONAL PROCESS

N.I. Belenkevich, V.A. Ilyinkov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus, belenkevich@bsuir.by

Abstract. The stages of mathematical and physical modeling of signals and links of radiophysics, radio electronics and telecommunications systems are considered, the structure of the software and hardware modeling complex is proposed, and its main subsystems are developed. The use of the complex in the educational process has been considered, and a project for a unified educational laboratory for modeling signals and systems has been developed.

Keywords. Complex, modeling, signal, link, characteristic, program.