



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.391.83:681.5

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

В.А. ИЛЬИНКОВ, Ю.С. МОЙСИЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 29 ноября 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. На основе предложенной библиотеки вспомогательных функций разработана специальная процедура формирования отсчетных значений множества сигналов систем телекоммуникаций и радиоэлектроники (СТР), которая обеспечивает простоту и удобство применения, существенно расширяет возможности моделирования сигналов. Построена операторная модель реакции произвольной линейной системы на составной трапецеидальный (периодический, непериодический финитный) сигнал. Построена математическая модель (во временной области) реакции линейной системы на множество сигналов СТР, отличающихся по форме, времени существования и способу задания. Разработан единый алгоритм математического моделирования линейных искажений сигналов СТР. В соответствии с последним разработана удобная для использования программа математического моделирования множества сигналов СТР во временной области, представляющая исследуемую реакцию в графическом (с возможностью масштабирования по осям), табличном и файловом видах.

Ключевые слова: сигнал, звено, реакция, моделирование, комплексная плоскость, временная область.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ильинков В.А., Мойсевич Ю.С. Расширение возможностей моделирования сигналов систем телекоммуникаций и радиоэлектроники. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 5-13.

EXPANDING THE POSSIBILITIES OF MODELING SIGNALS OF TELECOMMUNICATIONS AND RADIOELECTRONICS SYSTEMS

VALERI A. ILYINKOV, YURY S. MAISIYEVICH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 29 November 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The special procedure for the formation of reference values for a set of signals from telecommunication and radioelectronic systems (STR) has been developed based of the proposed library of auxiliary functions, which provides simplicity, ease of use and significantly expands the possibilities of signal modeling. An operator model of the response of an arbitrary linear system to a composite trapezoidal (periodic, non-periodic finite) signal is constructed. The mathematical model (in the time domain) of the linear system reaction to a set of the STR signals has been built, varying in form, time of existence, and method of assignment. The unified algorithm for mathematical modeling of linear distortions of the STR signals has been developed. In accordance with the latter, an ease of use of the program for mathematical modeling of the STR signal set in the time domain has been developed, representing the investigated reaction in graphical (with the ability to scale along the axes), tabular, and file forms.

Keywords: signal, link, response, modeling, complex plane, time domain.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Ilyinkov V.A., Maisiyevich Y.S. Expanding the Possibilities of Modeling Signals of Telecommunications and Radioelectronics Systems. Doklady BGUIR. 2022; 20(4): 5-13.

Введение

Стремительное развитие систем телекоммуникаций и радиоэлектроники (СТР) предполагает математическое моделирование (ММ) в качестве основного метода проектирования. ММ интенсифицирует анализ и синтез, решает задачи, невыполнимые (часто) другими методами, многократно снижает затраты по созданию сложных систем при одновременном повышении их качества. При этом различают структурно- и схемотехническое ММ, выполняемое на уровнях структурной и принципиальной схем [1–7].

Важный компонент структурно-технического моделирования – ММ линейных искажений. На его основе разрабатывают обоснованные требования к частотным и временным характеристикам отдельных функциональных блоков и системы в целом. С учетом многообразия СТР при ММ линейных искажений применяют множество различных по форме (гармонические, импульсные; униполярные, биполярные; простые, составные), времени существования (периодические; непериодические финитные; непериодические бесконечно протяженные) и способам задания (аналитический; табличный; из файла) континуальных детерминированных сигналов [8–11]. Это приводит к необходимости использования разных методов и программ ММ, что дополнительно усложняет процедуру моделирования и весьма неудобно на практике.

Цель работы – разработка удобного для применения алгоритма ММ линейных искажений множества сигналов СТР, отличающихся по форме, времени существования и способу задания. Для решения задачи необходимо разработать: процедуру формирования отсчетных значений моделируемого сигнала; математические модели (на комплексной плоскости и во временной области) реакции произвольной линейной системы на составной трапецеидальный сигнал.

Процедура формирования отсчетных значений моделируемого сигнала

Суть процедуры состоит в формировании множества отсчетных значений

$$\varphi_n = \overline{\varphi(n\Delta t)} \quad (n = 0, N-1, N = T / \Delta t) \quad (1)$$

моделируемого сигнала и последующем сохранении их в одномерном массиве данных $D_n = \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n, \varphi_{n+1}, \dots, \varphi_{N-1}$. Понятно, что содержание процедуры напрямую зависит от способа задания сигнала.

Процедура формирования при аналитическом способе задания. Сравнительный анализ показывает [8–11], что наиболее сложными для аналитического описания являются составные сигналы, отдельное подмножество которых составляют сигналы аналоговых и цифровых видов модуляции. С учетом изложенного моделируемый составной сигнал $\varphi(t)$ представляется линейной суперпозицией M сигналов, задаваемых сложными функциями

$$\varphi(t) = \sum_{m=1}^M \varphi_m^{III} \left[\varphi_{m1}^I(\varphi_{m1}^I(t)) + \varphi_{m2}^I(\varphi_{m2}^I(t)) + \varphi_{m3}^I(\varphi_{m3}^I(t)) \right], \quad (2)$$

где $\varphi_m^{III}(t)$ – функции третьего (высшего) уровня; $\varphi_{m1}^I(t)$, $\varphi_{m2}^I(t)$, $\varphi_{m3}^I(t)$ – функции второго уровня; $\varphi_{m1}^I(t)$, $\varphi_{m2}^I(t)$, $\varphi_{m3}^I(t)$ – функции первого (низшего) уровня.

Последующий анализ разновидностей используемых при ММ составных сигналов показывает, что все они аналитически описываются формой (2), если в качестве компонентов $\varphi_m^I(t) - \varphi_m^{III}(t)$ применять соответствующие элементы из предлагаемой библиотеки вспомогательных функций (табл. 1). Областью определения вспомогательных функций $f_i(t)$ ($i = \overline{1,15}$) является интервал $[t_{1i}, t_{2i}]$, причем $0 \leq t_{1i} < t_{2i} < T$. За пределами указанного интервала значения функций равны нулю.

Программная реализация процедуры предполагает, что пользователю представляется форма (2). Он задает необходимые значения параметров M (количество сигналов) и N (количество отсчетных значений, например $N = 1000$), выбирает из библиотеки соответствующую функцию $\varphi_{11}^I(t)$ и рассчитывает N отсчетных значений $\varphi_{11}^I(n\Delta t)$ ($n = \overline{0, N-1}$; $\Delta t = T / N$). Далее выбирается функция $\varphi_{11}^I(t)$ и рассчитываются значения $\varphi_{11}^I(n\Delta t)$, при этом в качестве аргумента функции $\varphi_{11}^I(t)$ используются значения $\varphi_{11}^I(n\Delta t)$ функции $\varphi_{11}^I(t)$. Аналогично выбираются и рассчитываются значения $\varphi_{12}^I(n\Delta t)$, $\varphi_{12}^I(n\Delta t)$, $\varphi_{13}^I(n\Delta t)$, $\varphi_{13}^I(n\Delta t)$. Далее выбирается функция $\varphi_1^{III}(t)$ и рассчитываются значения $\varphi_1^{III}(n\Delta t)$, являющиеся отсчетными значениями $\varphi_1(n\Delta t)$ сигнала $\varphi_1(t)$. Понятно, аргументом t функции $\varphi_1^{III}(t)$ в точке $t = n\Delta t$ выступает сумма значений $\varphi_{11}^I(n\Delta t)$, $\varphi_{12}^I(n\Delta t)$ и $\varphi_{13}^I(n\Delta t)$. По аналогичной схеме рассчитываются значения $\varphi_2(n\Delta t) - \varphi_M(n\Delta t)$ сигналов $\varphi_2(t) - \varphi_M(t)$. Суммированием значений $\varphi_1(n\Delta t) - \varphi_M(n\Delta t)$ образуется необходимая последовательность отсчетных значений воздействия $\varphi(t)$, сохраняемых в виде одномерного массива данных D_n .

Таблица 1. Библиотека вспомогательных функций
Table 1. Library of auxiliary functions

Вид вспомогательной функции Auxiliary function type	Вид вспомогательной функции Auxiliary function type
$f_1(t) = a_1 t^3 + a_2 t^2 + a_3 t + d + a_4 \sqrt{t} + a_5 \sqrt[3]{t}$	$f_{10}(t) = a \operatorname{ctg}(bt + c) + d$
$f_2(t) = at^{-1} + d$	$f_{11}(t) = a \arcsin(bt) + c$
$f_3(t) = ae^{ct} + d$	$f_{12}(t) = a \arccos(bt) + c$
$f_4(t) = a^{ct} + d$	$f_{13}(t) = a \operatorname{arctg}(bt) + c$
$f_5(t) = a \ln(bt + c) + d$	$f_{14}(t) = a \operatorname{arcctg}(bt) + c$
$f_6(t) = a \lg(bt + c) + d$	$f_{15}(t) = 0$
$f_7(t) = a \sin(bt + c) + d$	$f_{16}(t) = a \int_0^t f(t) dt \equiv a \frac{\Delta t}{2} \sum_{k=1}^N (f(k\Delta t) + f((k-1)\Delta t))$
$f_8(t) = a \cos(bt + c) + d$	
$f_9(t) = a \operatorname{tg}(bt + c) + d$	$f_{17}(t) = \emptyset$

Выбор функций I–III уровней выполняется из присутствующей в программе библиотеки вспомогательных функций $f_i(t)$ ($i = \overline{1,17}$), предлагаемой пользователю в виде табл. 1. Функции $f_1(t) - f_{15}(t)$ используются в качестве функций I–III уровней, функции $f_{16}(t)$, $f_{17}(t)$ – II–III уровней. Выбор требуемой вспомогательной функции $f_i(t)$ достигается активацией соответствующей строки табл. 1, при этом пользователю предоставляется форма, позволяющая ввести необходимый набор параметров.

Выбор элемента $f_{15}(t)$ библиотеки означает, что значения этой функции в точках $n = \overline{0, N-1}$ принимаются равными нулю. Выбор элемента $f_{17}(t)$ (пустое множество), например,

в качестве функции $\varphi_{12}^I(t)$, означает, что значения $\varphi_{12}^I(n\Delta t)$ принимаются равными значениям соответствующей функции меньшего порядка (в данном случае $\varphi_{12}^I(n\Delta t) = \varphi_{12}^I(n\Delta t)$).

В качестве примера рассмотрим радиосигнал с частотой, изменяющейся по линейному закону [8, 9] (так называемый сигнал ЛЧМ), определяемый на интервале $[0, T)$ и описываемый выражением $\varphi(t) = U_m \cos\left(2\pi f_c t + \Phi_0 + 2\pi \int_0^t (\Delta f / T) t dt\right)$, где f_c – опорная частота; Δf – приращение частоты; Φ_0 – начальная фаза. Следуя предлагаемой процедуре, он представляется в виде (см. (2)) $\varphi(t) = \varphi_1^{III} \left[\varphi_{11}^I(\varphi_{11}^I(t)) + \varphi_{12}^I(\varphi_{12}^I(t)) + \varphi_{13}^I(\varphi_{13}^I(t)) \right]$, где $\varphi_{11}^I(t) = f_1(t)$, $\varphi_{11}^{II}(t) = f_{17}(t)$, $\varphi_{12}^I(t) = f_1(t)$, $\varphi_{12}^{II}(t) = f_{15}(t)$, $\varphi_{13}^I(t) = f_{16}(t)$, $\varphi_{13}^{II}(t) = f_{17}(t)$, $\varphi_1^{III}(t) = f_8(t)$. Очевидно, выбирая необходимое значение параметра M и соответствующие вспомогательные функции, можно задать в аналитическом виде любые составные сигналы, включая множество сигналов аналоговых и цифровых видов модуляции.

Процедура формирования при табличном способе задания. Программная реализация процедуры предусматривает, что пользователь задает число N отсчетных значений, после чего моделирующая программа предоставляет ему шаблон таблицы из N строк для ввода отсчетных значений. Пользователь вводит последовательность значений $\varphi_n = \varphi(n\Delta t)$, которые по выполнению операции «Ввод» образуют одномерный массив D_n .

Процедура формирования при способе задания из файла. При задании из файла для расширения возможностей моделирования и повышения удобства применения пользователю необходимо обеспечить возможность:

- использования файлов данных, содержащих одномерный массив $D_k = \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k, \xi_{k+1}, \dots, \xi_K$ данных с любым количеством K отсчетных значений (в общем случае $K \neq N$; N – количество отсчетных значений формируемого массива $D_n = \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n, \varphi_{n+1}, \dots, \varphi_{N-1}$);

- промежуточного образования из массива D_k усеченного массива $D_k^I = \xi_{K_1}, \xi_{K_1+1}, \dots, \xi_{K_2-1}, \xi_{K_2}$ ($1 \leq K_1 < K_2 \leq K$; $K_2 - K_1 \leq N - 1$);

- формирования требуемого массива D_n посредством дополнения (слева, справа) массива D_k^I необходимым количеством нулевых значений;

- изменения положения (сдвига) в массиве D_n элементов, соответствующих элементам массива D_k^I .

С учетом изложенного программная реализация процедуры предусматривает, что пользователь обращается к имеющемуся файлу данных, содержащему одномерный массив D_k с количеством членов K ($K \neq N$), и открывает его. Далее последовательно вводятся численные значения параметров N (количество элементов массива D_n), K_1 и K_2 (номера граничных элементов массива D_k , соответствующих массиву данных D_k^I) и N_1 (номер элемента массива D_n , соответствующего нижнему граничному элементу ξ_{K_1} массива D_k^I ; $N_1 \leq N - K_2 + K_1 - 1$). По выполнению операции «Ввод» осуществляется автоматическое формирование массива D_n , элементы φ_n которого по алгоритму

$$\varphi_n = \begin{cases} \xi_{n+K_1-N_1}, & N_1 \leq n \leq N_1 + K_2 - K_1 \\ 0, & 0 \leq n < N_1, N_1 + K_2 - K_1 < n \leq N - 1 \end{cases} \quad (3)$$

образуются из соответствующих элементов ξ_k массива D_k .

Варьируя значениями параметров K_1, K_2 и N_1 , можно из имеющегося массива D_k данных «вырезать» требуемую часть и поместить ее (с необходимым сдвигом по положению) в состав образуемого массива D_n отсчетных значений φ_n .

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что разработанная процедура обеспечивает формирование отсчетных значений множества сигналов СТР при аналитическом, табличном и файловом способах их задания, характеризуется простотой и удобством применения, существенно расширяет возможности моделирования сигналов.

Операторная математическая модель реакции линейной системы на составной трапецидальный сигнал

Для систематизации последующего изложения отметим, что известны различные системы классификации множества сигналов СТР [1, 8–11]. Наиболее общей является классификация по: способу задания на осях «амплитуда – время» (континуальные, дискретные, квантованные, цифровые); времени существования (периодические, непериодические финитные, непериодические бесконечно протяженные); согласованию с каналом (модулирующие, модулированные); форме (гармонические, импульсные; униполярные, биполярные; простые, составные). При этом к простым (составным) относят сигналы, описываемые одной (двумя и более) образующими аналитическими функциями $\varphi(t)$. При моделировании линейных искажений в качестве воздействий используют [1] простые непериодические финитные $\varphi_{0(1,2)T}(t)$, простые периодические $\varphi_{0(1,2)}(t)$ и простые бесконечно протяженные $\alpha_{0(1,2)}(t)$ сигналы (рис. 1, а).

Значения сигналов $\varphi_{0T}(t)$, $\varphi_{1(2)T}(t)$, $\alpha_0(t)$ и $\alpha_{1(2)}(t)$ на интервалах соответственно $[t_1, t_2)$, $[0, t_{1(2)})$, $[0, \infty)$ и $[t_{1(2)}, \infty)$ равны значениям образующей функции $\varphi(t)$, принимают нулевые значения за пределами указанных интервалов. Сигналы $\varphi_{0(1,2)}(t)$, определяемые на бесконечном интервале $(-\infty, \infty)$, образуются периодическим с периодом T повторением сигналов $\varphi_{0(1,2)T}(t)$. Линейную суперпозицию рассматриваемых сигналов применяют в качестве составных воздействий (сигналов).

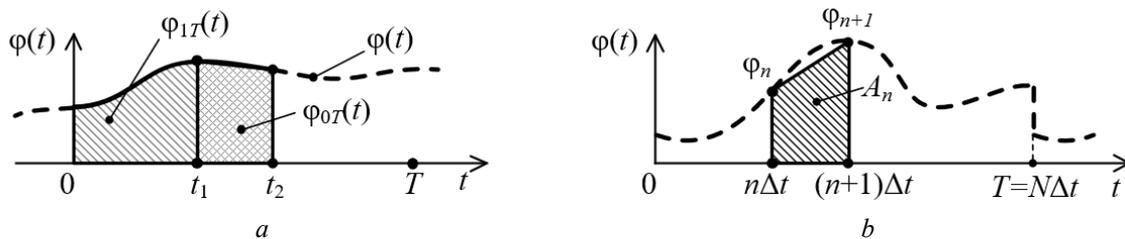


Рис. 1. Входные воздействия: а – простые непериодические; б – трапецидальный элемент
Fig. 1. Input actions: а – simple non-periodic; б – trapezoidal element

По выполнению процедуры задания воздействия образуется одномерный массив $D_n = \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n, \varphi_{n+1}, \dots, \varphi_{N-1}$ отсчетных значений φ_n (1) входного сигнала. Используя эти значения, можно выполнить аппроксимацию моделируемого воздействия. Из известных методов аппроксимации [12] применительно к решаемой задаче при одновременном учете сложности и точности представления предпочтительна аппроксимация по способу трапеций, при которой воздействие на интервале $[0, T)$ представляется суммой трапецидальных элементов (простых сигналов):

$$\varphi_T(t) = \varphi(t) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n^T(t), \quad (4)$$

где $A_n^T(t)$ – n -й трапецидальный элемент, соответствующий отсчетным значениям φ_n и φ_{n+1} массива D_n (рис. 1, b).

Оптимальным описанием образованного сигнала (4) является его задание на комплексной плоскости [13], при этом согласно известной теореме [14, 15] лапласовские изображения $\overline{\varphi_{0(1,2)T}(p)}$ простых сигналов $\varphi_{0(1,2)T}(t)$ представляются в виде

$$\overline{\varphi_{1(2)T}(p)} = S_{1(2)}(p)e^{-p^{t_1(2)}} - S_0(p), \quad \overline{\varphi_{0T}(p)} = S_2(p)e^{-p^{t_2}} - S_1(p)e^{-p^{t_1}}. \quad (5)$$

Учитывая изложенное, выполняя необходимые преобразования, принимая $t_2 = (n+1)\Delta t$ и $t_1 = n\Delta t$, применительно к элементу $A_n^T(t)$ получаем следующие представления функций $S_{2,n}(p)$, $S_{1,n}(p)$ и $S_{0,n}(p)$:

$$S_{0(1,2),n}(p) = (p + a_{0(1,2),n}) / (C_{0(1,2),n} p^2), \quad (6)$$

где $a_{0,n} = (\varphi_{n+1} - \varphi_n) / (\Delta t(\varphi_n - n(\varphi_{n+1} - \varphi_n)))$; $a_{1,n} = (\varphi_{n+1} - \varphi_n) / (\Delta t\varphi_n)$;
 $a_{2,n} = (\varphi_{n+1} - \varphi_n) / (\Delta t\varphi_{n+1})$; $C_{0,n} = (-1) / (\varphi_n - n(\varphi_{n+1} - \varphi_n))$; $C_{1,n} = (-1) / \varphi_n$;
 $C_{2,n} = (-1) / \varphi_{n+1}$.

Переходя (посредством суммирования) от изображения одиночного элемента к изображению всего сигнала, учитывая механизм образования изображений периодических сигналов [13], имеем изображение $\overline{\varphi}(p)$ составного периодического трапецидального сигнала:

$$\overline{\varphi}(p) = \sum_{n=0}^{N-1} (S_{2,n}(p)e^{-p^{t_2}} - S_{1,n}(p)e^{-p^{t_1}}) / (1 - e^{-p^T}). \quad (7)$$

Входное воздействие $\varphi(t)$ поступает на вход линейной системы (звена, канала), математическую модель которой целесообразно задавать на комплексной плоскости с помощью операторной передаточной функции $K_Z(p)$ специального вида [1]:

$$K_Z(p) = \frac{A_Z(p)}{C_Z B_Z(p)} = \frac{\prod_{x=1}^{NZ3} (p + a_{Z3x})^{nZ3x} \prod_{y=1}^{NZ4} (p^2 + 2a_{Z4y}p + a_{Z4y}^2 + \omega_{Z4y}^2)^{nZ4y}}{C_Z \prod_{s=1}^{NZ1} (p + a_{Z1s})^{nZ1s} \prod_{l=1}^{NZ2} (p^2 + 2a_{Z2l}p + a_{Z2l}^2 + \omega_{Z2l}^2)^{nZ2l}}, \quad (8)$$

где $C_Z \neq 0$ – масштабный действительный коэффициент; $(a_{Z1s}, a_{Z2l}, \omega_{Z2l}, \omega_{Z4y}) \in F_1$; $(a_{Z3x}, a_{Z4y}) \in F_2$; F_1 – множество положительных (не равных нулю) действительных чисел; F_2 – множество действительных чисел.

Модель (8) удовлетворяет условиям физической реализуемости и устойчивости, описывает (не)минимально-фазовые линейные системы с различными формами частотных характеристик, хорошо согласуется с используемым методом описания входного воздействия.

Располагая моделями воздействия $\overline{\varphi}(p)$ и системы $K_Z(p)$, окончательно имеем

$$\overline{\Psi}(p) = \overline{\varphi}(p)K_Z(p). \quad (9)$$

Выражение (9) (с учетом соотношений (7), (8)) представляет собой искомую операторную модель реакции $\Psi(t)$ произвольной линейной системы на составной трапецидальный периодический сигнал $\varphi(t)$.

Математическая модель реакции линейной системы на составной трапецеидальный сигнал во временной области

С физической точки зрения реакция $\Psi(t)$ является линейной суперпозицией $\Psi(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \Psi_n(t)$ N реакций $\Psi_n(t)$, где $\Psi_n(t)$ – реакция на периодическую последовательность $A_n(t)$ соответствующих трапецеидальных элементов (см. рис. 1, *b*).

Поэтому для решения задачи вначале необходимо найти реакцию $\Psi_n(t)$ системы на периодический сигнал $A_n(t)$, после чего, выполняя суммирование реакций на периодические последовательности всех трапецеидальных элементов, перейти к искомой реакции $\Psi(t)$. Описанное наиболее целесообразно выполнить модифицированным операционным методом [14, 15], который, в отличие от классического операционного [13], представляет реакцию не тригонометрическим рядом Фурье (в незамкнутом виде), а конечным числом слагаемых (в замкнутом виде).

Последовательным выполнением необходимых преобразований (при $n_{Z1s} = n_{Z2l} = 1$) получена искомая математическая модель (10) реакции $\Psi(t)$ системы на периодическое воздействие $\varphi(t)$.

Модель (10) является точным аналитическим выражением реакции произвольной линейной системы на составной трапецеидальный периодический сигнал. Она представляет реакцию конечным числом слагаемых (в замкнутом виде), количество которых определяется лишь полюсами лапласовского изображения воздействия и операторной передаточной функции. Подобное представление минимизирует объем и время моделирования, исключает проблему оценки точности результата.

При значениях параметров $\delta \rightarrow 0$ и $T < \infty$ ($\delta = (t_2 - t_1) / T$ – относительная длительность сигнала (воздействия) $\varphi_T(t)$; T – период повторения) модель описывает реакцию на составной трапецеидальный непериодический сигнал (см. рис. 1, *a*), а при $\delta \rightarrow 1$ и $T \rightarrow \infty$ – на составной непериодический бесконечно протяженный сигнал. Это позволяет заключить, что с учетом разработанной процедуры формирования отсчетных значений модель (10) описывает реакцию во временной области произвольной линейной системы на множество сигналов СТР, отличающихся по форме, времени существования и способу задания.

$$\begin{aligned} \Psi_n = \Psi(n\Delta t) = & -R_{0Z0,n}^0 n\Delta t - R_{0Z0,n}^I + \sum_{s=1}^{N_{Z1}} \left[\left(M_{21s} R_{1Z1s,n}^0 - M_{11s} R_{2Z1s,n}^0 e^{a_{Z1s}\Delta t} \right) + \sum_{k=n+1}^{N-1} \left(M_{11s} \times \right. \right. \\ & \times \left. \left(R_{1Z1s,k}^0 e^{a_{Z1s}(k-n)\Delta t} - R_{2Z1s,k}^0 e^{a_{Z1s}(k-n+1)\Delta t} \right) \right) + \sum_{k=1}^n \left(M_{21s} \left(R_{1Z1s,n-k}^0 e^{-a_{Z1s}k\Delta t} - R_{2Z1s,n-k}^0 \times \right. \right. \\ & \times \left. \left. e^{-a_{Z1s}(k-1)\Delta t} \right) \right) + \sum_{l=1}^{N_{Z2}} \left[\left(\frac{R_{1Z2l,n}^0}{\omega_{Z2l}} \left(N_{22l} \sin \varphi_{1Z2l,n}^0 - M_{12l} \cos \varphi_{1Z2l,n}^0 \right) - \frac{R_{2Z2l,n}^0}{\omega_{Z2l}} e^{a_{Z2l}\Delta t} \times \right. \right. \\ & \times \left. \left(N_{12l} \sin \left(-\omega_{Z2l}\Delta t + \varphi_{2Z2l,n}^0 \right) - M_{12l} \cos \left(-\omega_{Z2l}\Delta t + \varphi_{2Z2l,n}^0 \right) \right) \right) + \sum_{k=n+1}^{N-1} \left(\frac{R_{1Z2l,k}^0}{\omega_{Z2l}} \times \right. \\ & \times \left. e^{a_{Z2l}(k-n)\Delta t} \left(N_{12l} \sin \left(\omega_{Z2l}(n-k)\Delta t + \varphi_{1Z2l,k}^0 \right) - M_{12l} \cos \left(\omega_{Z2l}(n-k)\Delta t + \varphi_{1Z2l,k}^0 \right) \right) - \right. \\ & - \left. \frac{R_{2Z2l,k}^0}{\omega_{Z2l}} e^{a_{Z2l}(k-n+1)\Delta t} \left(N_{12l} \sin \left(\omega_{Z2l}(n-k-1)\Delta t + \varphi_{2Z2l,k}^0 \right) - M_{12l} \cos \left(\omega_{Z2l}(n-k-1) \times \right. \right. \\ & \times \left. \left. \Delta t + \varphi_{2Z2l,k}^0 \right) \right) \right) + \sum_{k=1}^n \left(\frac{R_{1Z2l,n-k}^0}{\omega_{Z2l}} e^{-a_{Z2l}k\Delta t} \left(N_{22l} \sin \left(\omega_{Z2l}k\Delta t + \varphi_{1Z2l,n-k}^0 \right) - M_{12l} \times \right. \right. \\ & \cos \left(\omega_{Z2l}k\Delta t + \varphi_{1Z2l,n-k}^0 \right) \right) - \frac{R_{2Z2l,n-k}^0}{\omega_{Z2l}} e^{-a_{Z2l}(k-1)\Delta t} \times \left(N_{22l} \sin \left(\omega_{Z2l}(k-1)\Delta t + \varphi_{2Z2l,n-k}^0 \right) - \right. \\ & \left. - M_{12l} \cos \left(\omega_{Z2l}(k-1)\Delta t + \varphi_{2Z2l,n-k}^0 \right) \right) \left. \right] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 &\text{где } R_{1(2)Z_{1s}.n}^0 = R_{1(2)Z.n}(p) \cdot (p + a_{Z_{1s}}) \Big|_{p=-a_{Z_{1s}}}; R_{0Z_{0.n}}^0 = R_{0Z.n}(p) \cdot p^2 \Big|_{p=0}; R_{0Z_{0.n}}^I = (R_{0Z.n}(p) \times \\
 &\times p^2) \Big|_{p=0}; R_{1(2)Z_{2l}.n}^0 e^{j\varphi_{1(2)Z_{2l}.n}^0} = R_{1(2)Z.n}(p) \cdot (p^2 + 2a_{Z_{2l}}p + a_{Z_{2l}}^2 + \omega_{Z_{2l}}^2) \Big|_{p=-a_{Z_{2l}} + j\omega_{Z_{2l}}}; \\
 &R_{0(1,2)Z.n}(p) = S_{0(1,2).n}(p)K_Z(p); M_{11s} = (1 - e^{a_{Z_{1s}}T})^{-1}; M_{21s} = (e^{-a_{Z_{1s}}T} - 1)^{-1}; \\
 &M_{12l} = e^{a_{Z_{2l}}T} \sin(\omega_{Z_{2l}}T) / P_{2l}; N_{12l} = (1 - e^{a_{Z_{2l}}T} \cos(\omega_{Z_{2l}}T)) / P_{2l}; \\
 &N_{22l} = (e^{a_{Z_{2l}}T} \cos(\omega_{Z_{2l}}T) - e^{2a_{Z_{2l}}T}) / P_{2l}; P_{2l} = e^{2a_{Z_{2l}}T} - 2e^{a_{Z_{2l}}T} \cos(\omega_{Z_{2l}}T) + 1.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Используя полученные результаты, разработан единый алгоритм ММ линейных искажений множества сигналов СТР. Он состоит из следующих этапов.

1. *Задание входного воздействия.* Выбирается вид входного сигнала (воздействия) и способ его задания. По разработанной процедуре формируется одномерный массив $D_n = \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n, \varphi_{n+1}, \dots, \varphi_{N-1}$ отсчетных значений $\varphi_n = \varphi(n\Delta t)$ ($n = 0, N-1, N = T / \Delta t$).

2. *Задание модели линейной системы.* Свойства моделируемой линейной системы задаются введением необходимых численных значений параметров операторной передаточной функции $K_Z(p)$ (8).

3. *Вычисление реакции.* Для минимизации объема вычислений предварительно, согласно выражений (11), формируются и заносятся в оперативную память (не зависящие от времени) одномерные массивы значений параметров $R_{1(2)Z_{1s}.n}^0$, двумерные массивы значений параметров $R_{1(2)Z_{2l}.n}^0$ и $\varphi_{1(2)Z_{2l}.n}^0$. Используя соответствующие элементы последних, по модели (10) рассчитывается одномерный массив $G_n = \Psi_0, \Psi_1, \dots, \Psi_n, \Psi_{n+1}, \dots, \Psi_{N-1}$ отсчетных значений $\Psi_n(n\Delta t)$ реакции $\Psi(t)$.

В соответствии с предлагаемым алгоритмом разработана удобная для применения программа моделирования множества сигналов СТР, представляющая исследуемую реакцию в графическом (с возможностью масштабирования по осям), табличном и файловом видах.

Заключение

1. Разработана простая и удобная для применения процедура формирования отсчетных значений множества сигналов СТР при различных способах их задания.

2. Построена операторная модель реакции произвольной линейной системы на составной трапецидальный периодический сигнал.

3. Построена математическая модель реакции произвольной линейной системы на множество сигналов СТР, отличающихся по форме, времени существования и способу задания.

4. Разработан единый алгоритм математического моделирования линейных искажений множества сигналов СТР.

Список литературы

1. Беленкевич Н.И., Ильинков В.А. Совместное описание сигналов, линейных звеньев и реакций систем телекоммуникаций и радиоэлектроники. *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук.* 2017;4:93-104.
2. Трухин М.П. *Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств.* Москва: Горячая линия–Телеком; 2015.
3. Васильев К.К. *Математическое моделирование систем связи.* Ульяновск: УлГТУ; 2010.
4. Голяницкий И. А. *Математические модели и методы в радиосвязи.* Москва: Эко-Трендз; 2005.
5. Загидуллин Р.Ш. *SystemView. Системотехническое моделирование устройств обработки сигналов.* Москва: Горячая линия–Телеком; 2005.
6. Шестеркин А.Н. *Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10.* Москва: ДМК Пресс; 2012.
7. Болотовский Ю.И. *OrCAD 9.x. OrCAD 10.x. Практика моделирования.* Москва: СОЛОН-Пресс; 2008.
8. Гоноровский И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы.* Москва: Дрофа; 2006.

9. Баскаков С.И. *Радиотехнические цепи и сигналы*. Москва: Ленанд; 2016.
10. Скляр Б. *Цифровая связь*. Москва: Издат. дом «Вильямс»; 2003.
11. Проakis Дж. *Цифровая связь*. М.: Радио и связь; 2000.
12. Бахвалов Н.С. *Численные методы*. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний; 2008.
13. Лаврентьев М.А. *Методы теории функций комплексного переменного*. СПб.: Лань; 2002.
14. Ильинков В.А. Метод расчета реакции линейной системы на периодическое воздействие. *Радиотехника*. 1990;10:14-16.
15. Ильинков В.А. Метод расчета реакции линейной системы на периодическое и непериодическое воздействие. *Вестник БГУ. Сер. 1: Физика, математика, информатика*. 1999;3:33-38.

References

1. Belenkevich N.I., Ilyinkov V.A. [The compatible mathematical description of signals, linear links and responses of telecommunications and radioelectronics systems]. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*. 2017;4:93-104. (In Russ.)
2. Truhin M.P. [Fundamentals of computer development and simulation of radioelectronic facilities]. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom Publ.; 2015. (In Russ.)
3. Vasil'ev K.K. [Mathematical modeling of communications systems]. Ulyanovsk: UISTU Publ.; 2010. (in Russ.)
4. Golyanickij I.A. [Mathematical models and methods in radio communication]. Moscow: Eko-Trendz Publ.; 2005. (In Russ.)
5. Zagidullin R. Sh. [System modeling of signal data processor]. Moscow: Goryachaya liniya–Telecom Publ.; 2005.
6. Shesterkin A.N. [Multisim 10 is a system of modeling and research into radio electronic devices]. Moscow: DMK Press Publ.; 2012. (In Russ.)
7. Bolotovskij Yu.I. [OrCAD 9.x. OrCAD 10.x. Simulations practice]. Moscow: Solon PRESS Publ.; 2008. (In Russ.)
8. Gonorovskij I.S. [Radio technical circuits and signals]. Moscow: Drofa Publ.; 2006. (In Russ.)
9. Baskakov S.I. [Radio technical circuits and signals]. Moscow: Lenand Publ.; 2016. (In Russ.)
10. Sklar B. [Digital Communications: Fundamentals and Applications]. Moscow: Izdat. dom «Williams» Publ.; 2003. (In Russ.)
11. Proakis J. [Digital communications]. Moscow: Radio i svyaz Publ.; 2000. (In Russ.)
12. Bakhvalov N.S. [Numerical methods]. Moscow: BINOM. Labolatoria znanii Publ.; 2008. (In Russ.)
13. Lavrent'ev M.A. [Methods of the theory of functions of a complex variable]. Saint Petersburg: Lan' Publ.; 2002.
14. Ilyinkov V.A. [A method of the computation of a linear system's response to a periodic action]. *Radiotekhnika = Radio Engineering*. 1990;10:14-16 (In Russ.)
15. Ilyinkov V.A., Ilyinkova N.I. [A method of the computation of a linear system's response to periodic and non-periodic actions]. *Vestnik BGU. Seriya 1: Fizika, matematika, informatika = Vestnik BSU. Series 1: Physics. Mathematics. Informatics*. 1999;3:33-38 (in Russ.)

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы внесли равный вклад в написание статьи / All authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Ильинков В.А., к.т.н., доцент, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мойсевич Ю.С., аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-33-648-05-69;
e-mail: jura96m@mail.ru
Мойсевич Юрий Сергеевич

Information about the authors

Ilyinkov V.A., Cand. Of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Maisiyevich Y.S., Postgraduate at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-33-648-05-69;
e-mail: jura96m@mail.ru
Maisiyevich Yury Sergeevich