

А. Н. Шилин, Д. Т. Нго, Н. С. Кузнецова

**ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ЛИНИЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Волгоградский государственный технический университет

shanvstu@gmail.com, ndtvstu@gmail.com, artex23@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку:

Надежда Сергеевна Кузнецова, artex23@yandex.ru

При эксплуатации электроэнергетической системы (ЭС) в линиях электропередач возникновение переходных процессов, связанных с повреждениями и аварийными режимами, может привести к нарушению работы энергетических оборудования и других. Эти переходные процессы не могут протекать мгновенно, так как невозможно мгновенное изменение энергии, запасенной в электромагнитном поле накопительных элементов электрической цепи. Таким образом, необходимость исследования и расчета переходных процессов на линиях электропередач ЭС, а также требование скорости выявления повреждения или сокращения времени измерения параметров электрических цепей, весьма актуальны. В статье приведена методика цифрового моделирования длинной линии электропередачи методом z-форм, рассмотрено сравнение результатов цифрового моделирования между линией с распределенными параметрами и линией с использованием упрощенной схемы замещения.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, цифровое моделирование, динамические процессы, линия электропередачи, передаточная функция, переходные характеристики

A. N. Shilin, D. T. Ngo, N. S. Kuznetsova

DIGITAL MODELING OF DYNAMIC PROCESSES
IN LINES WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

Volgograd State Technical University

During the operation of the electric power system (ES) in power lines, the occurrence of transient processes associated with damage and emergency conditions can lead to disruption of the operation of power equipment and others. These transient processes cannot occur instantly, since an instantaneous change in the energy stored in the electromagnetic field of the storage elements of the electrical circuit is impossible. Thus, the need to study and calculate transient processes on ES power lines is very relevant, as well as the requirements for the speed of identifying damage or reducing the time for measuring parameters of electrical circuits. The article presents a technique for digital modeling of a long power transmission line using the z-form method, and compares the results of digital modeling between a line with distributed parameters and a line using a simplified equivalent circuit.

Keywords: digital signal processing, digital modeling, dynamic processes, power line, transfer function, transient characteristics

Одной из наиболее сложных задач является цифровое моделирование динамических процессов в линиях с распределенными параметрами. Цифровое моделирование с использованием электрических схем замещения линии электропередачи, которые справедливы при исследовании установившегося или квазиустановившегося режима, являются одним из средств, упрощающих представление о процессах, протекающих в энергетической системе. В зависимости от требуемой точности эти схемы представляются в виде различных электрических схем, которые значительно упрощают задачу и вносят погрешность в динамическую модель системы. Упрощение схемы может привести к неверным выводам об аварийных режимах в реальном времени, а также устойчивости системы. Поэтому при моделировании переходных процессов необходимы основные сведения о линиях электропередачи с распределенными параметрами [1].

Для цифрового моделирования линии электропередачи в электрических системах целесообразно использовать преобразование Лорана или z-преобразование, которое обладает важным свойством возможности нахождения оригинала функции с помощью разложения дробной рациональной функции изображения в ряд Лорана по убывающим степеням z [4].

В качестве объекта исследования проведено цифровое моделирование переходных процессов в однородной двухпроводной длинной линии электропередачи с распределенными параметрами, которая представляется наиболее распространенной схемой замещения бесконечно малого элемента (рис. 1) [1, 3]:

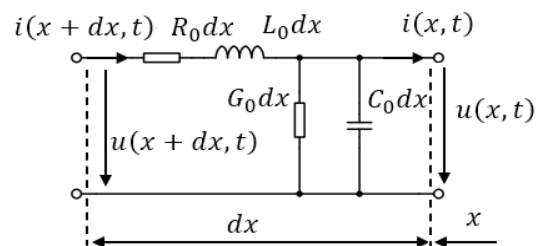


Рис. 1. Схема замещения элементарного участка линии электропередачи:

где C_0 – поперечная емкость между прямыми и обратными проводами; L_0 – индуктивность петли, образованной прямым и обратным проводами; R_0 – продольное активное сопротивление прямого и обратного проводов; G_0 – поперечная активная проводимость утечки изоляции между прямым и обратным проводами, dx – элементарный участок длиной линии; x – расстояние от конца линии

Цепь длинной линии электропередачи с распределенными параметрами можно рассмотреть как четырехполюсник, для однородной длинной линии предложена эквивалентная цепная схема на рис. 2:

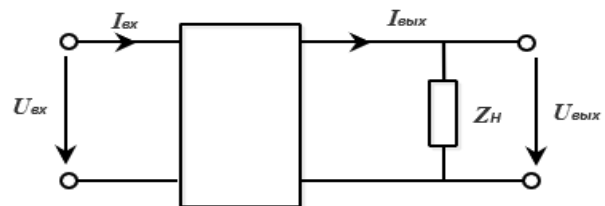


Рис. 2. Эквивалентная цепная схема длинной линии электропередачи

Из проведенных результатов исследований [1] выражение передаточной функции по напряжению однородной цепной схемы имеет вид:

$$W(p) = \frac{e^{\gamma x} [Z_2(p) + Z_c(p)] + e^{-\gamma x} [Z_2(p) - Z_c(p)]}{e^{\gamma l} [Z_2(p) + Z_c(p)] + e^{-\gamma l} [Z_2(p) - Z_c(p)]}, \quad (1)$$

где x – расстояние от конца линии; l – длина линии электропередачи; $Z_2(p)$ – сопротивление нагрузки линии; $Z_c(p)$ – волновое сопротивление; $\gamma(p)$ – коэффициент распространения.

$$Z_c(p) = \sqrt{\frac{R_0}{G_0}} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_0}{G_0}} \cdot \frac{L_0 G_0 - R_0 C_0}{G_0 R_0} \cdot p = A''p + B''$$

$$\gamma(p) = \sqrt{G_0 R_0} + \frac{1}{2} \sqrt{G_0 R_0} \cdot \frac{R_0 C_0 + L_0 G_0}{G_0 R_0} p = Cp + D$$

Используя формулу перехода метода обратной разности $p = \frac{z-1}{zT}$, получено выражение дискретной передаточной функции по z -переменной, позволяющей определять реакцию системы на внешнее воздействие в конце линии ($x = 0$):

$$W(z) = \frac{2Z_2(z)e^{Dl}z^m}{(Z_2(z)+Z_c(z))e^{2Dl}z^{2m}+Z_2(z)-Z_c(z)}, \quad (2)$$

где: $m = \frac{cl}{T}$

$$Z_c(z) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_0}{G_0}} \cdot \frac{(2G_0 R_0 T + L_0 G_0 - R_0 C_0)z - L_0 G_0 + R_0 C_0}{G_0 R_0 T z}$$

Для линии электропередачи с сосредоточенными параметрами, ее каждая фаза представляется в виде четырехполюсника, который в свою очередь заменяется простой схемой электрической цепи. На рис. 3 и 4 изображены упрощенная и операторная схемы замещения линии, которые используются в инженерных расчетах при всех напряжениях выше 35 кВ [1, 6, 7]. Параметры этих схем замещения линии длиной менее 300 км определяются следующим образом: $R = R_0 l$, $X = X_0 l$, $B = B_0 l$ или $R = R_0 l$, $L = L_0 l$, $C = C_0 l$.

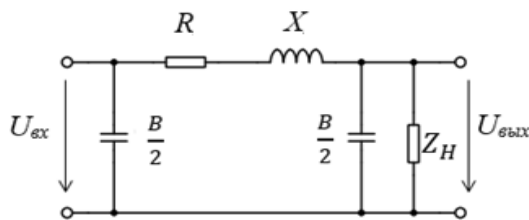


Рис. 3. Упрощенная схема замещения линии электропередачи

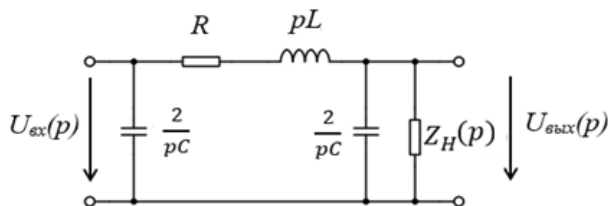


Рис. 4. Операторная схема замещения линии электропередачи

Рассмотрим длинную линию без искажений с согласованной нагрузкой. В линии без искажений волновое сопротивление $Z_c(z)$ является вещественным числом. При согласованной нагрузке $Z_2(z) = Z_c(z)$, то есть $Z_H(p) = Z_c(p)$, для согласования нагрузки необходимо, чтобы $L_H = 0$, тогда $Z_H(p) = R_H = Z_c(p)$. В качестве примера для исследования использовались следующие параметры: $R_0 = 38,4 \cdot 10^{-3}$ Ом/м; $L_0 = 3,93 \cdot 10^{-3}$ Гн/м; $C_0 = 5,12 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $G_0 = 5 \cdot 10^{-11}$ См/м; $x = 0$; $l = 140955$ м; $T = 0,001$ с; число итераций $N = 1000$; $0 < \omega < 1000$ рад/с [1].

Получим следующие значения:

$$C = 1,4185 \cdot 10^{-7}; D = 1,3856 \cdot 10^{-6}; m = 20;$$

$$Z_c(p) = 27712,8129 \text{ Ом.}$$

На основе выражения (2) передаточная функция длинной линии электропередачи без искажений с согласованной нагрузкой имеет вид:

$$W(z) = 0,8226 \cdot z^{-20}.$$

Рассмотрим также линию с использованием упрощенных схем замещения. Из рис. 3 и 4 с помощью метода узловых потенциалов получим передаточную функцию в z -форме [5]:

$$W(z) = \frac{a_0}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}},$$

где $a_0 = 2T^2 Z_H$;

$$b_0 = CZ_H L + (2L + RCZ_H)T + (2R + 2Z_H)T^2;$$

$$b_1 = -[2CZ_H L + (2L + RCZ_H)T];$$

$$b_2 = CZ_H L;$$

$$R = R_0 l, L = L_0 l, C = C_0 l;$$

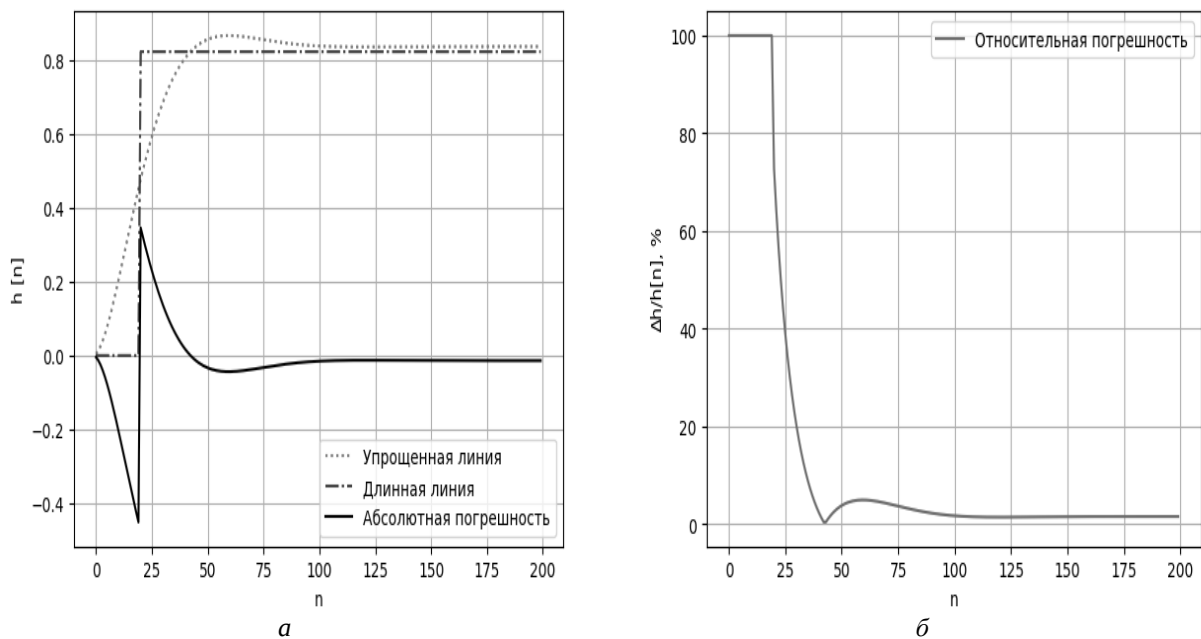
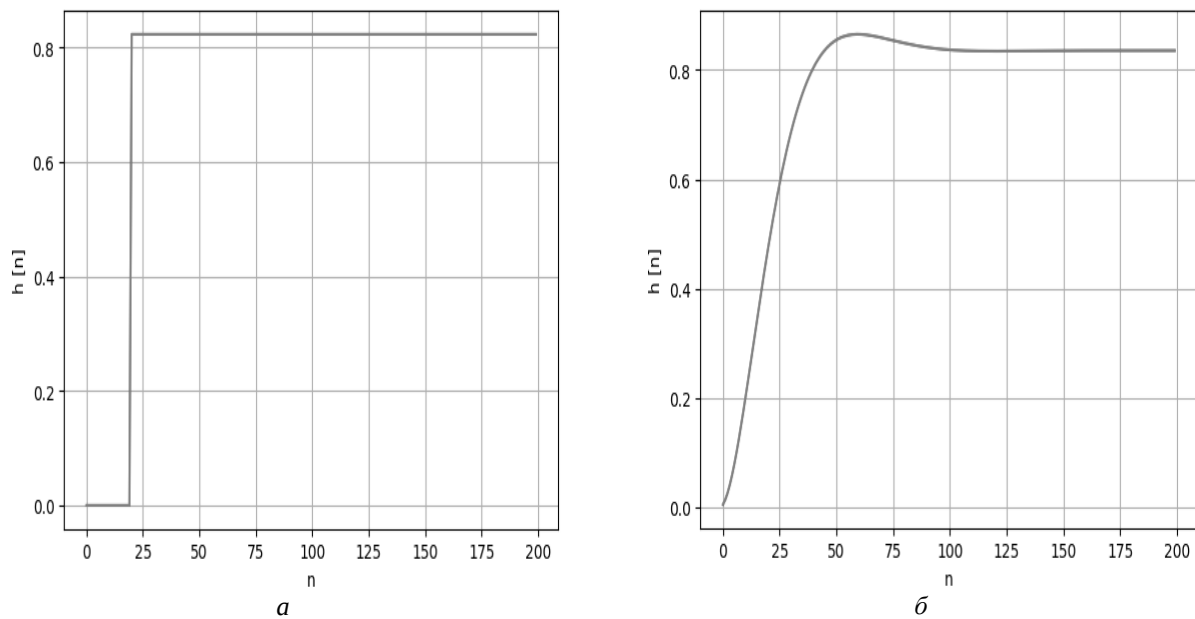
$$Z_H = Z_c(p) = 27712,8129 \text{ Ом.}$$

Из заданных параметров получена передаточная функция линии электропередачи с использованием упрощенных схем замещения:

$$W(z) = \frac{0,055426}{12,3615 - 23,37434z^{-1} + 11,0791z^{-2}}.$$

На рис. 5 приведены графики переходных характеристик в линиях, полученных с помощью метода z -форм при воздействии единичной ступенчатости на входе линии электропередачи.

При сравнении между результатом линии электропередачи без искажений с согласованной нагрузкой и результатом линии с использованием упрощенных схем замещения получены графики погрешностей, показанные на рис. 6. Максимальная абсолютная погрешность моделирования $\Delta h = 0,45078708469$ при $n = 19$.



Проведем цифровое моделирование линии без искажений с несогласованной нагрузкой и линии с использованием упрощенных схем замещения.

Согласно источнику [1] предложено выражение передаточной функции длинной линии без искажений с несогласованной нагрузкой:

$$W(z) = \frac{-135,3z^{-11} + 338,25z^{-20}}{28708 - 68,649z^{-1} - 27546z^{-20} - 66,667z^{-21}}.$$

Для линии с использованием упрощенных схем замещения из рис. 3 и 4 передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{Z_2(p)}{Z_1(p) + Z_2(p)},$$

где $Z_1(p) = R + pL$, $Z_2(p) = \frac{\frac{2}{pC}Z_H(p)}{\frac{2}{pC} + Z_H(p)} = \frac{\frac{2}{pC}(R_H + pL_H)}{\frac{2}{pC} + R_H + pL_H} = \frac{2R_H + 2L_H p}{2 + R_H C p + L_H C p^2}$.

$$W(p) = \frac{2R_H + 2L_H p}{2(R + R_H) + (RR_H C + 2L + 2L_H)p + (RL_H C + LR_H C)p^2 + LL_H C p^3}.$$

Передаточная функция в z-форме:

$$W(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}},$$

где $a_0 = 2L_H T^2 + 2R_H T^3$,

$$a_1 = -2L_H T^2,$$

$$b_0 = LL_H C + (RL_H C + LR_H C)T + (RR_H C + 2L + 2L_H)T^2 + (2R + 2R_H)T^3,$$

$$b_1 = -[3LL_H C + (2RL_H C + LR_H C)T + (RR_H C + 2L + 2L_H)T^2],$$

$$b_2 = 3LL_H C + (RL_H C + LR_H C)T,$$

$$b_3 = -LL_H C.$$

В нашем случае использовались следующие параметры:

$$R_H = 100 \text{ Ом}; L_H = 0,01 \text{ Гн};$$

$$R_0 = 38,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м}; L_0 = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/м};$$

$$C_0 = 5,12 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}; G_0 = 5 \cdot 10^{-11} \text{ См/м};$$

$$x = 0; l = 10574 \text{ м}; T = 0,0001 \text{ с};$$

$$\text{число итераций } N = 6666; 0 < \omega < 1000 \text{ рад/с}.$$

Приведена передаточная функция линии электропередачи с использованием упрощенных схем замещения:

$$W(z) = \frac{4 \cdot 10^{-10} - 2 \cdot 10^{-10} z^{-1}}{8,7737 \cdot 10^{-7} - 9,4387 \cdot 10^{-7} z^{-1} + 9,0013 \cdot 10^{-8} z^{-2} - 2,2498 \cdot 10^{-8} z^{-3}}.$$

Графики переходных характеристик в линиях при единичном ступенчатом воздействии показаны на рис. 7.

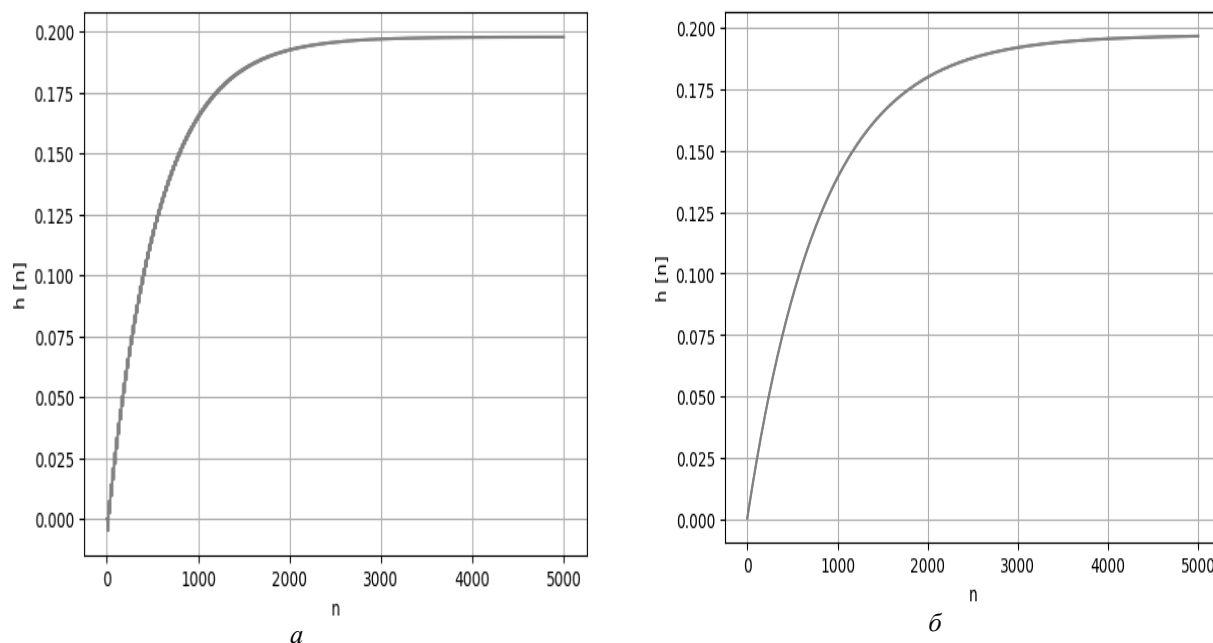


Рис. 7. Переходные характеристики линии электропередачи:

а – без искажений с несогласованной нагрузкой; б – с использованием упрощенных схем замещения

На рис. 8 представлены графики погрешностей при сравнении результата линии электропередачи без искажений с несогласованной нагрузкой с результатом, полученным линией с ис-

пользованием упрощенных схем замещения. При $n = 681$ максимальная абсолютная погрешность моделирования $\Delta h = 0,029087660989727607$.

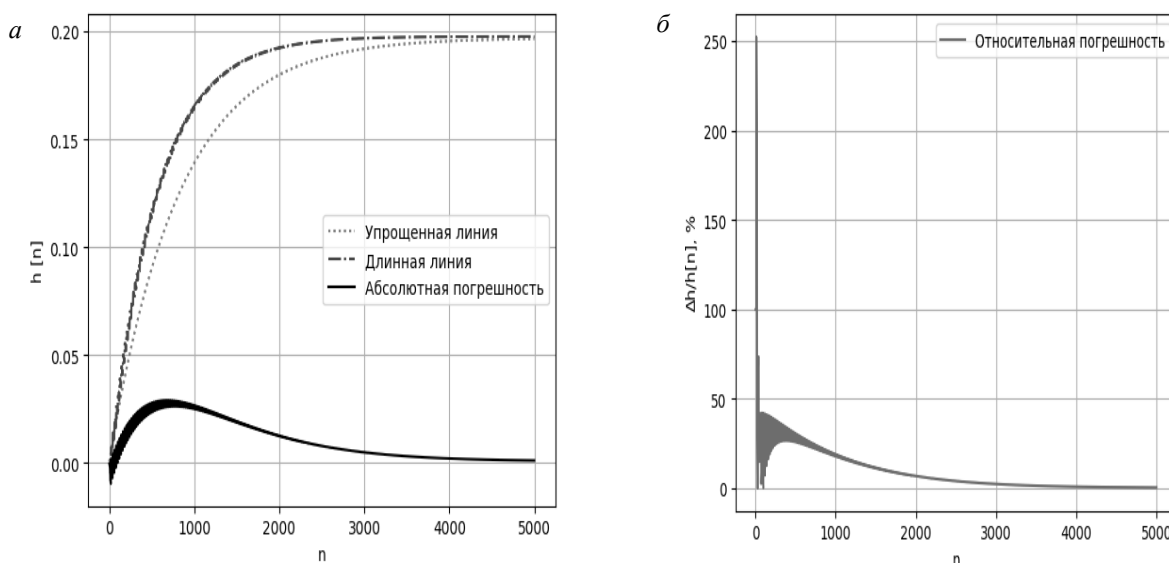


Рис. 8. Графики:
а – абсолютной погрешности; б – относительной погрешности

Аналогично проведены такие же исследования для линии с искажениями и несогласованной нагрузкой и линии с использованием упрощенных схем замещения. Расчеты выполнены при следующих параметрах: $R_H = 100 \text{ Ом}$;

$$L_H = 0,01 \text{ Гн}; R_0 = 38,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м};$$

$$L_0 = 8,84 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/м}; C_0 = 5,12 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м};$$

$$G_0 = 5 \cdot 10^{-11} \text{ См/м}; x = 0; l = 86791 \text{ м};$$

$$T = 0,001 \text{ с}; \text{число итераций } N = 6666;$$

$$0 < \omega < 1000 \text{ рад/с [1, 8, 9]}.$$

Передаточная функция линии с искажениями и несогласованной нагрузкой имеет следующий вид:

$$W(z) = \frac{248,11407 \cdot z^{-20} - 22,5558 \cdot z^{-21}}{2287900,7 - 2252525,2 \cdot z^{-1} - 1798567 \cdot z^{-40} + 1770954,2 \cdot z^{-41}}$$

и линии с использованием упрощенных схем замещения:

$$W(z) = \frac{2,2 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-8} z^{-1}}{15,7902 \cdot 10^{-4} - 16,1308 \cdot 10^{-4} z^{-1} + 4,434 \cdot 10^{-5} z^{-2} - 3,41 \cdot 10^{-6} z^{-3}}.$$

Переходные характеристики, полученные с помощью метода z-форм, для линий и графики погрешностей при их сравнении представ-

лены на рис. 9 и 10. Максимальная абсолютная погрешность моделирования

$$\Delta h = 0.0038895352 \text{ при } n = 59.$$

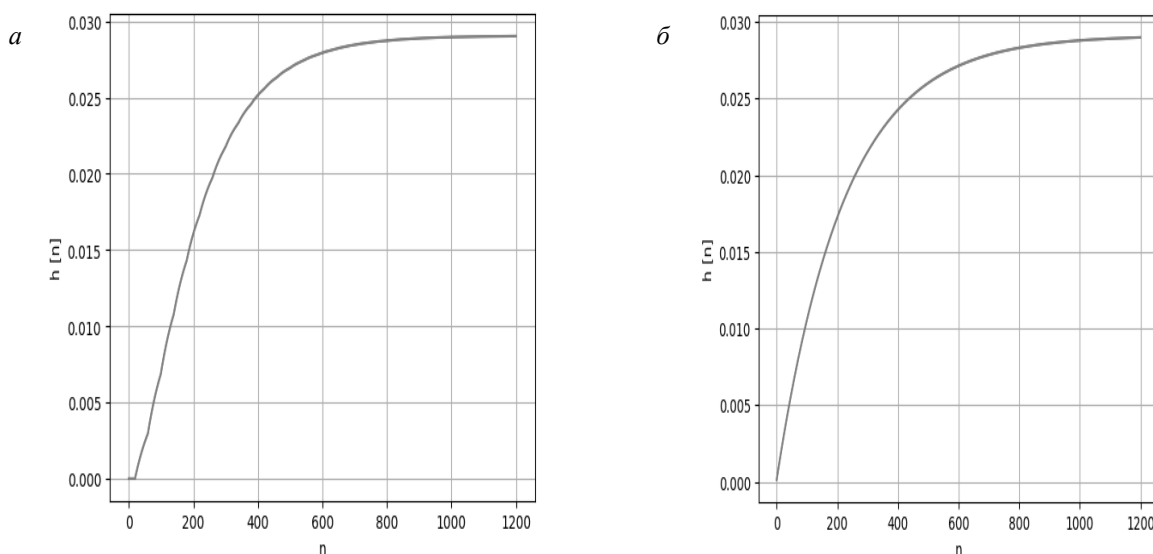


Рис. 9. Переходные характеристики линии электропередачи:
а – с искажениями и несогласованной нагрузкой; б – с использованием упрощенных схем замещения

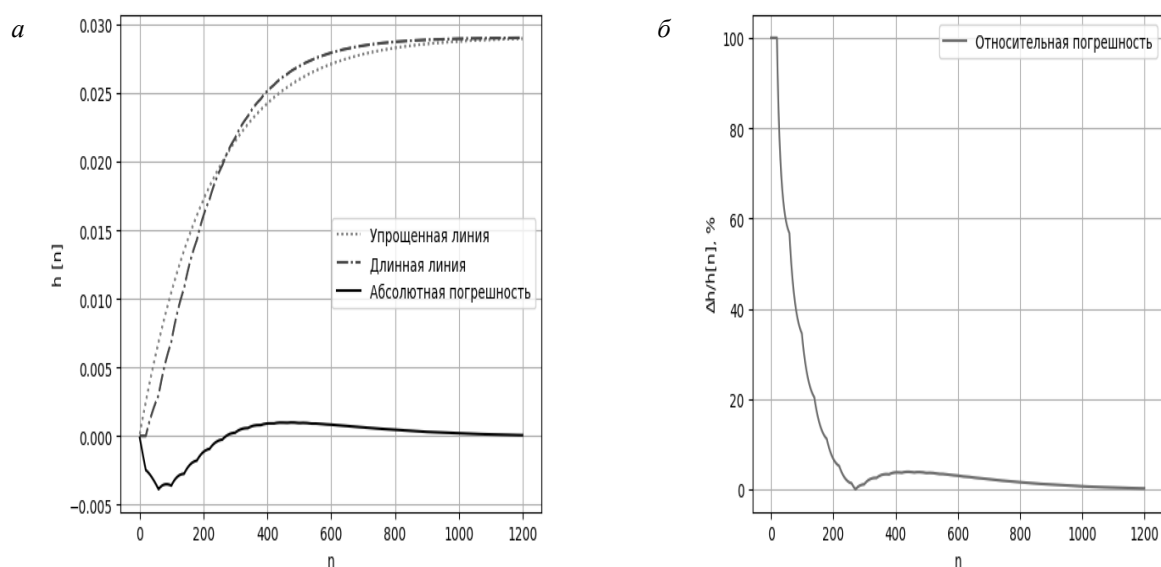


Рис. 10. Графики:
а – абсолютной погрешности; б – относительной погрешности

Из результатов исследований [5] проведено цифровое моделирование линий с последовательным соединением энергетического оборудо-

вания электроэнергетической системы, которая представлена схемами на рис. 11 и 12:

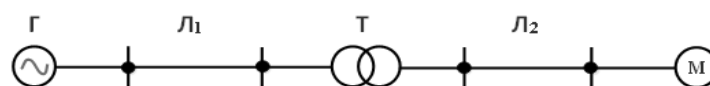


Рис. 11. Принципиальная схема ЭС:
Г – синхронный генератор, Л1, Л2 – линия электропередачи, Т – трансформатор, М – асинхронный двигатель



Рис. 12. Структурная схема реализации передаточной функции ЭС

Для ЭС с использованием линии без искажений с согласованной нагрузкой и линии с использованием упрощенных схем замещения вы-

ходной сигнал линейных блоков при воздействии единичного импульса на входе электрической системы показан на рис. 13.

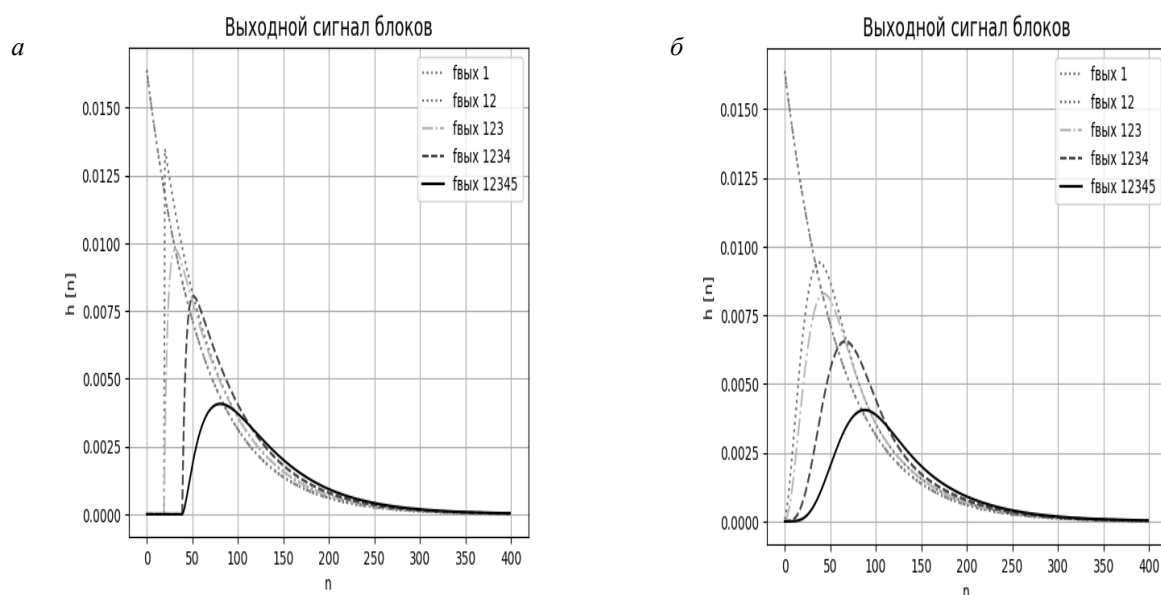


Рис. 13. Переходные характеристики последовательного соединения блоков ЭС:
а – линии без искажений с согласованной нагрузкой; б – линии с использованием упрощенных схем замещения

Из графика переходной характеристики (рис. 13) с помощью алгоритма вычисления компьютерной программы получены тактовые

моменты времени, при которых выходной сигнал $h[n]$ функций достигает максимального значения (табл. 1):

Таблица 1

Последовательные соединения блоков	Тактовые моменты времени [n] при $h[n] = \max$	Максимальное значение $h[n]$
Линия без искажений с согласованной нагрузкой		
$f_{\text{вых } 1}$	0	0.01639344262295082
$f_{\text{вых } 12}$	20	0.013485245901639345
$f_{\text{вых } 123}$	31	0.009774094593772301
$f_{\text{вых } 1234}$	51	0.008040170212837094
$f_{\text{вых } 12345}$	81	0.004073840510567478
Линия с использованием упрощенных схем замещения		
$f_{\text{вых } 1}$	0	0.01639344262295082
$f_{\text{вых } 12}$	38	0.009421078830160846
$f_{\text{вых } 123}$	43	0.008288407024191974
$f_{\text{вых } 1234}$	67	0.006554152596865126
$f_{\text{вых } 12345}$	88	0.004054762818590622

На основании табл. 1 можно сделать вывод о том, что в ЭС с использованием линии без искажений с согласованной нагрузкой переходный процесс происходит с задержкой по времени меньше, чем с использованием упрощенных схем замещения линии.

На рис. 14 представлены графики переходной характеристики выходных сигналов $f_{\text{вых } 12345}$ ЭС и абсолютной погрешности при их сравнении. Максимальная абсолютная погрешность моделирования

$$\Delta h = 0.00106717955 \text{ при } n = 40.$$

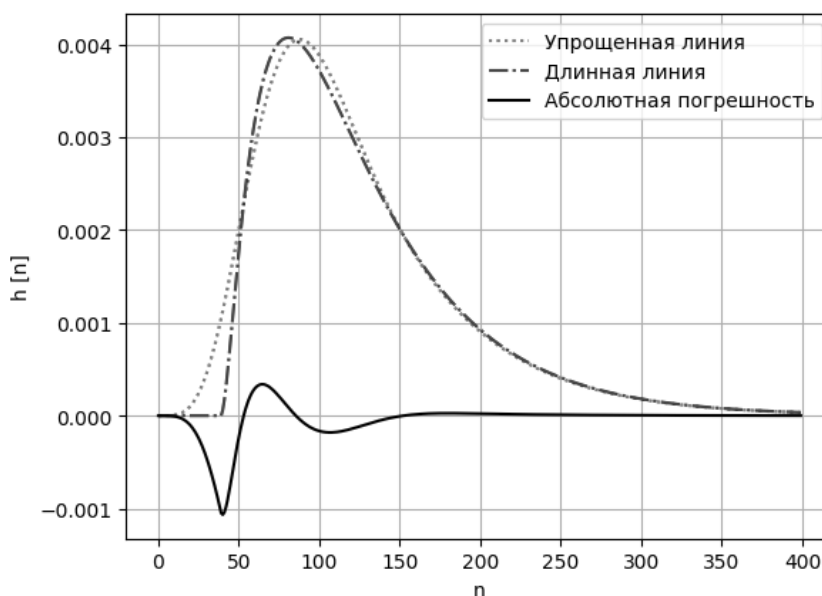


Рис. 14. Графики переходной характеристики выходных сигналов $f_{\text{вых } 12345}$ ЭС и абсолютной погрешности

При единичном ступенчатом воздействии на входе электрической системы получены результаты переходной характеристики выходных сигналов $f_{\text{вых } 12345}$ и погрешностей на

рис. 15. При $n = 152$ максимальная абсолютная погрешность моделирования

$$\Delta h = 0.01804357418430502.$$

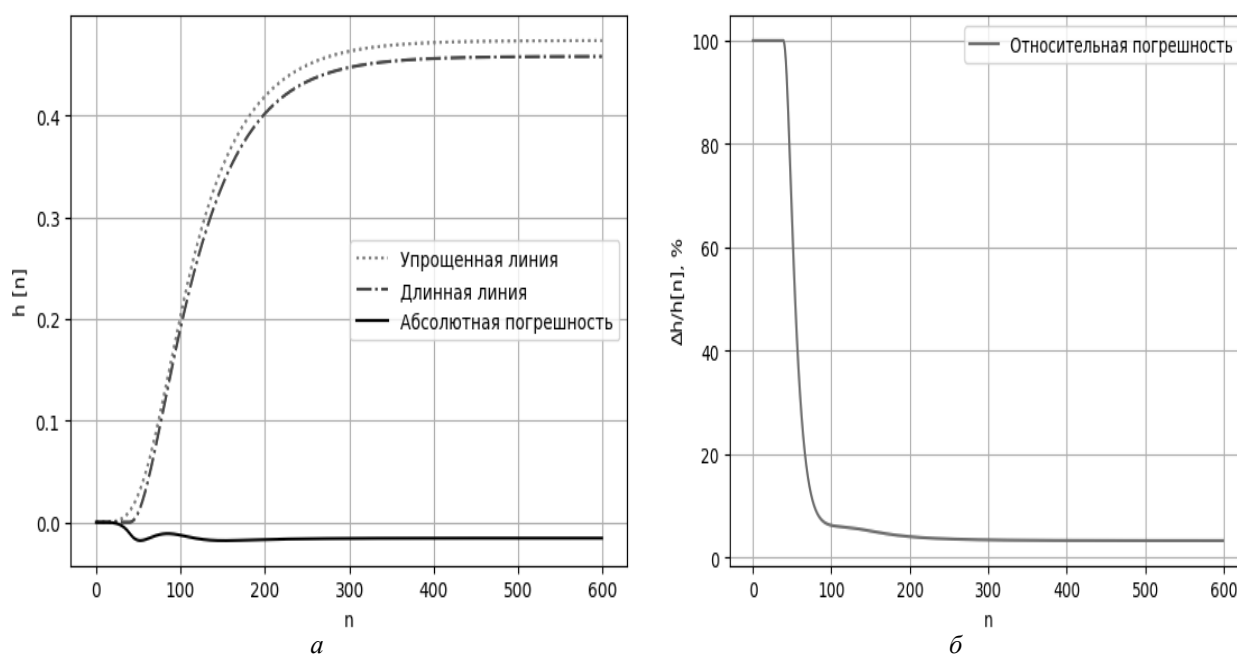


Рис. 15. Графики:
 а – переходных характеристик и абсолютной погрешности; б – относительной погрешности

Аналогично проведены такие же исследования ЭС с остальными линиями. Для линии без искажений с несогласованной нагрузкой и линии с использованием упрощенных схем

замещения при входном воздействии единичного импульса приведены переходные характеристики на рис. 16:

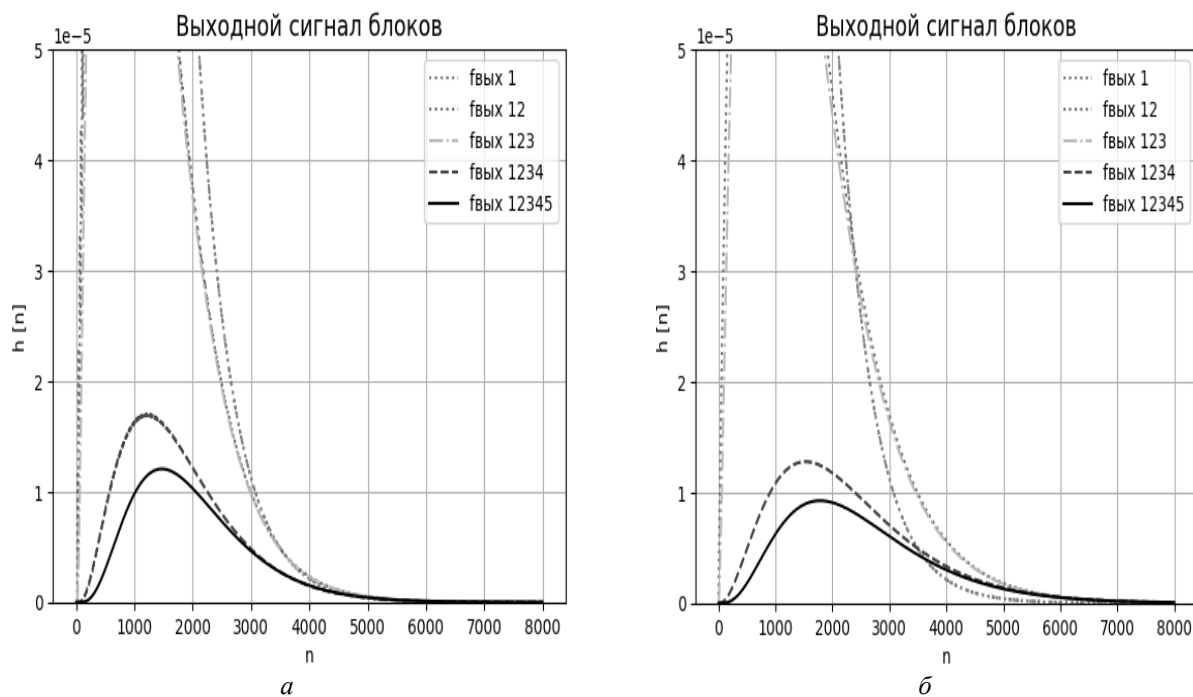


Рис. 16. Переходные характеристики последовательного соединения блоков ЭС:
 а – линии без искажений с несогласованной нагрузкой; б – линии с использованием упрощенных схем замещения

Таблица 2

Последовательные соединения блоков	Тактовые моменты времени [n] при $h[n] = \max$	Максимальное значение $h[n]$
Линия без искажений с несогласованной нагрузкой		
$f_{\text{вых } 1}$	0	0.001663893510815307
$f_{\text{вых } 12}$	581	0.00012973120390573527
$f_{\text{вых } 123}$	650	0.00011417016388909492
$f_{\text{вых } 1234}$	1210	$1.7025967529287818 \cdot 10^{-5}$
$f_{\text{вых } 12345}$	1473	$1.2064230437097711 \cdot 10^{-5}$
Линия с использованием упрощенных схем замещения		
$f_{\text{вых } 1}$	0	0.001663893510815307
$f_{\text{вых } 12}$	697	0.00010250353733669587
$f_{\text{вых } 123}$	754	$9.255240696919497 \cdot 10^{-5}$
$f_{\text{вых } 1234}$	1528	$1.2780594897881363 \cdot 10^{-5}$
$f_{\text{вых } 12345}$	1782	$0.9258510353050112 \cdot 10^{-5}$

На основании табл. 2 видно, что в ЭС с использованием линии без искажений с несогласованной нагрузкой переходный процесс

происходит с задержкой по времени меньше ЭС с использованием упрощенных схем замещения линии.

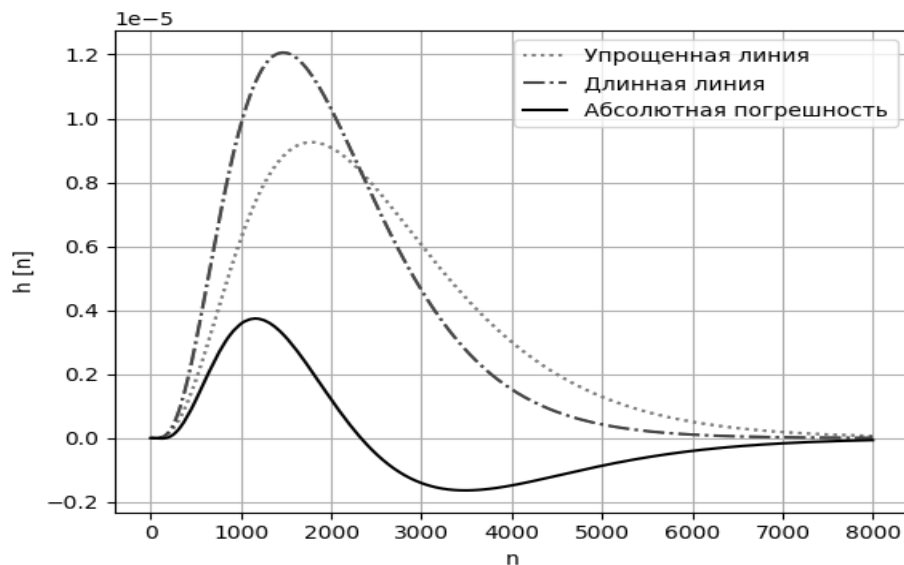


Рис. 17. Графики переходной характеристики выходных сигналов $f_{\text{вых } 12345}$ ЭС и абсолютной погрешности

Максимальная абсолютная погрешность $\Delta h = 0.3742175183029 \cdot 10^{-5}$ при $n = 1155$.

При единичном ступенчатом воздействии на входе электрической системы получены результаты переходной характеристики выходных

сигналов $f_{\text{вых } 12345}$ и погрешностей на рис. 18. При $n = 2329$ максимальная абсолютная погрешность моделирования

$$\Delta h = 0.00451381622401597.$$

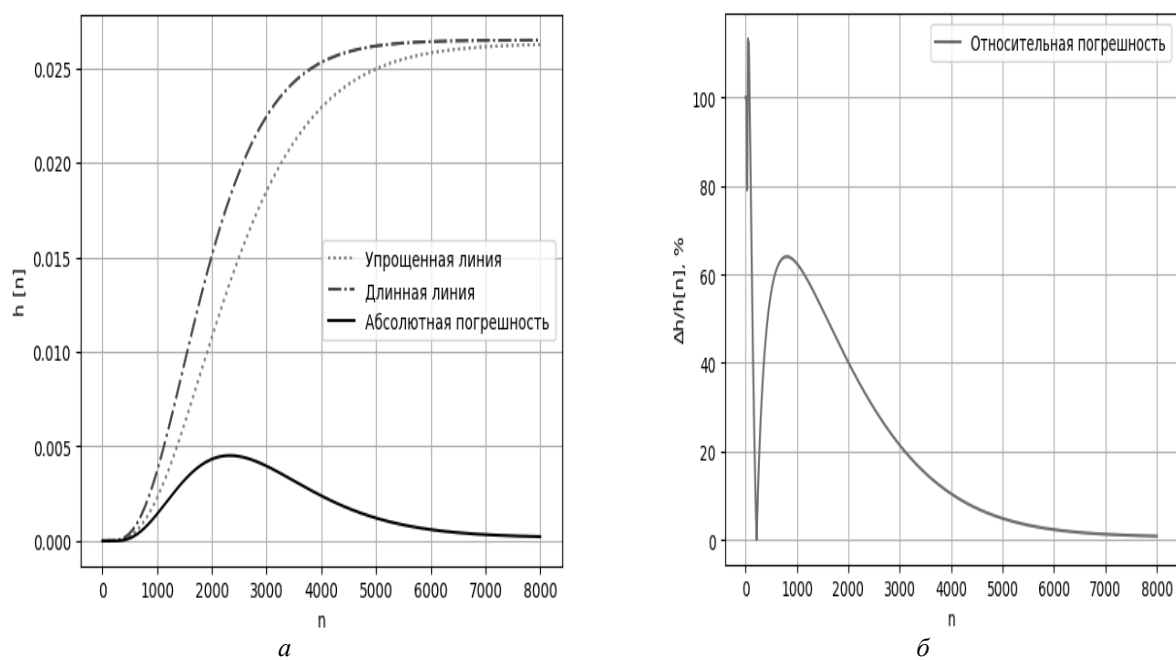


Рис. 18. Графики:
 а – переходных характеристик и абсолютной погрешности; б – относительной погрешности

Для линии без искажений и несогласованной нагрузкой и линии с использованием упрощенных схем замещения на рис. 19 показан

график переходной характеристики выходных сигналов при воздействии единичного импульса на входе электрической системы:

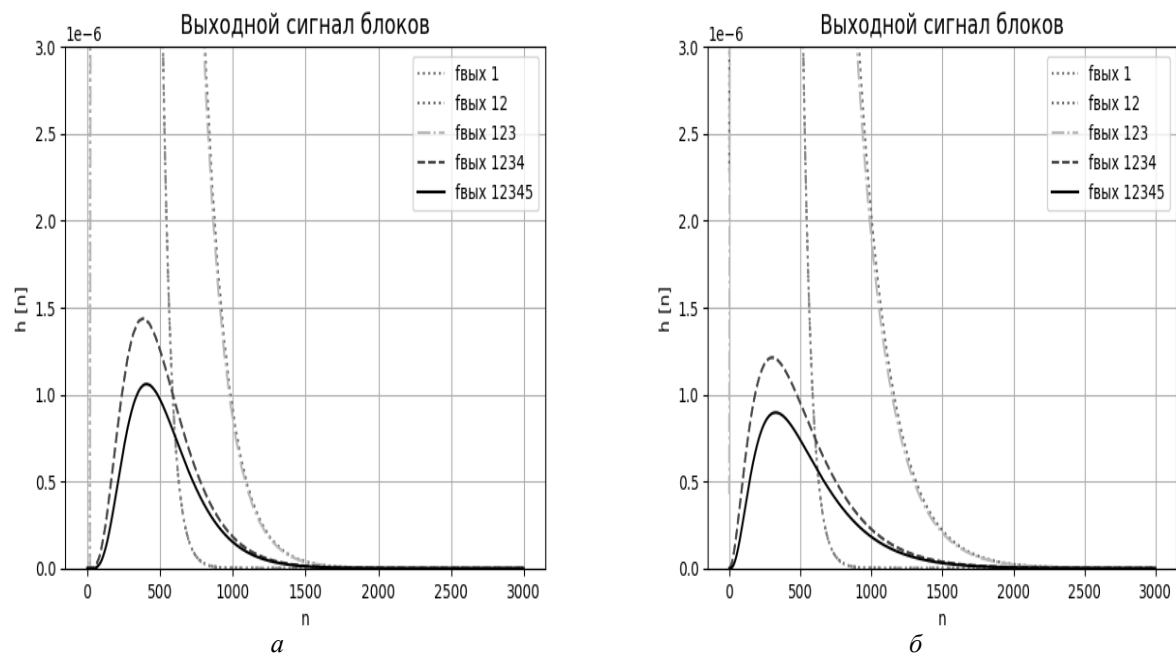


Рис. 19. Переходные характеристики последовательного соединения блоков ЭС:
 а – линии без искажений и несогласованной нагрузкой; б – линии с использованием упрощенных схем замещения

Таблица 3

Последовательные соединения блоков	Тактовые моменты времени [n] при $h[n] = \max$	Максимальное значение $h[n]$
Линия без искажений и несогласованной нагрузкой		
$f_{\text{вых } 1}$	0	0.01639344262295082
$f_{\text{вых } 12}$	160	$8.473397585189009 \cdot 10^{-5}$
$f_{\text{вых } 123}$	165	$7.676123656076127 \cdot 10^{-5}$
$f_{\text{вых } 1234}$	387	$1.436921269589052 \cdot 10^{-6}$
$f_{\text{вых } 12345}$	406	$1.0596951523481517 \cdot 10^{-6}$
Линия с использованием упрощенных схем замещения		
$f_{\text{вых } 1}$	0	0.01639344262295082
$f_{\text{вых } 12}$	107	$8.010574072461381 \cdot 10^{-5}$
$f_{\text{вых } 123}$	113	$7.273231000285308 \cdot 10^{-5}$
$f_{\text{вых } 1234}$	302	$1.2121141327069867 \cdot 10^{-6}$
$f_{\text{вых } 12345}$	327	$0.8959780173190454 \cdot 10^{-6}$

На основании табл. 3 видно, что в ЭС, содержащей линию без искажений и несогласованной нагрузкой, переходный процесс проис-

ходит с задержкой по времени больше ЭС с использованием упрощенных схем замещения линии.

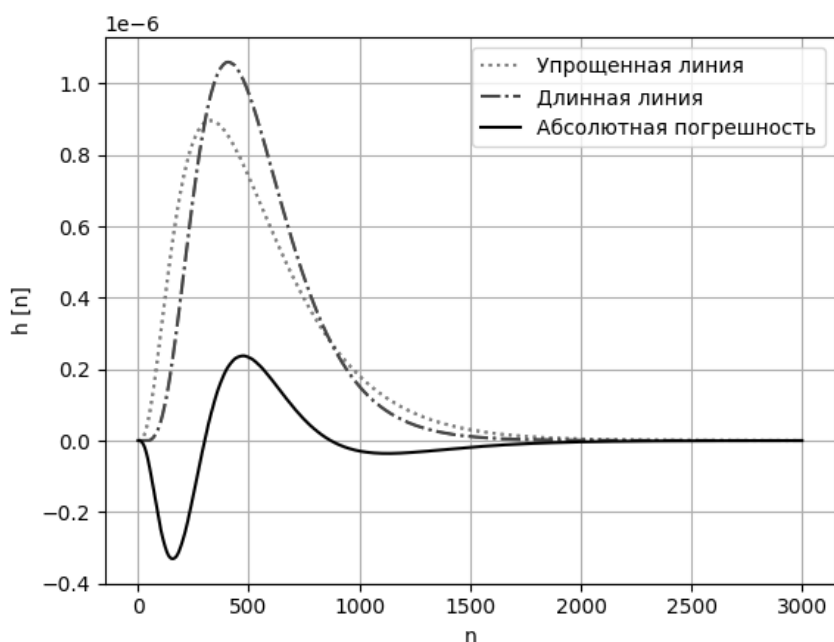


Рис. 20. Графики переходной характеристики выходных сигналов $f_{\text{вых } 12345}$ ЭС и абсолютной погрешности

Максимальная абсолютная погрешность $\Delta h = 0,3307604282845 \cdot 10^{-6}$ при $n = 156$.

При единичном ступенчатом воздействии на входе электрической системы получены результаты переходной характеристики выход-

ных сигналов $f_{\text{вых } 12345}$ и погрешностей на рис. 21. При $n = 300$ максимальная абсолютная погрешность моделирования

$$\Delta h = 5.43333808005119 \cdot 10^{-5}.$$

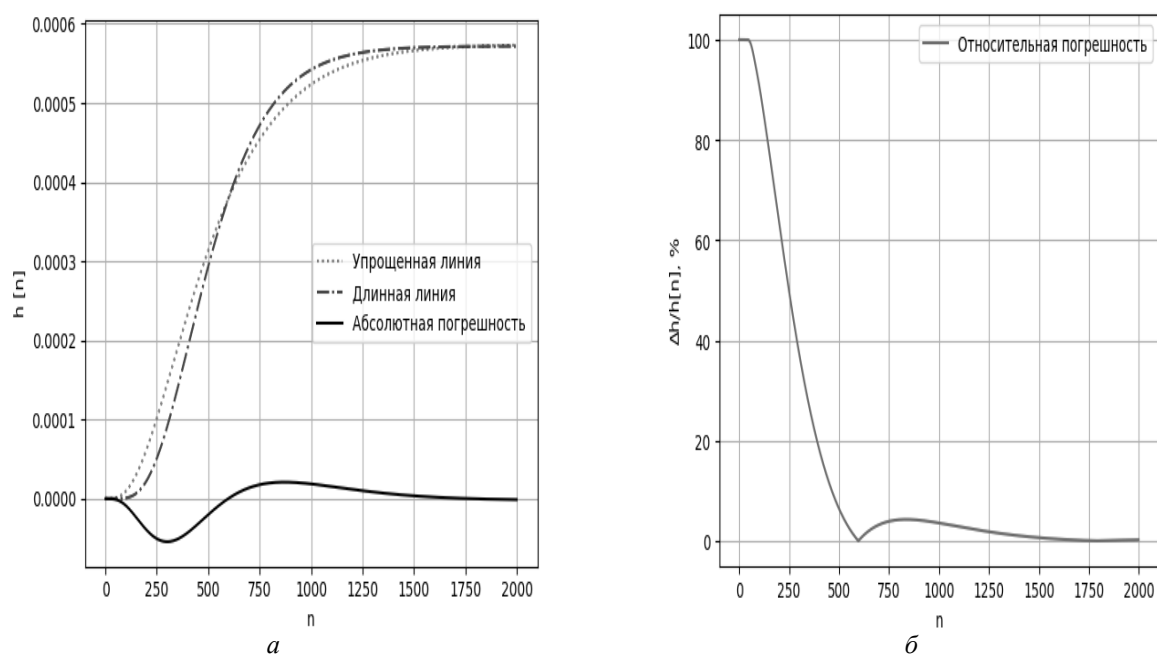


Рис. 21. Графики:

а – переходные характеристики и абсолютная погрешность; б – относительная погрешность

Выводы

Из проведенного цифрового моделирования следует, что полученная дискретная модель учитывает процессы запаздывания и искажения сигналов, присущие линии с распределенными параметрами. В электроэнергетической системе, содержащей линию с распределенными параметрами без искажений, переходный процесс происходит с задержкой по времени меньшей в ЭС с использованием упрощенных схем замещения линии. На основе полученных результатов о задержке по времени и погрешности моделирования выявлено, что аппроксимация выражений $Z_c(p)$ и $\gamma(p)$ и их дискретизации оказывает наибольшее влияние на точность цифрового моделирования динамических процессов в линии электропередачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шилин, А. Н. Цифровое моделирование электротехнических и электронных устройств: монография / А. Н. Шилин, О. А. Крутякова. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2014. – 132 с.

2. Шилин, А. Н. Исследование методов цифрового моделирования аналоговых САУ / А. Н. Шилин, Е. Г. Зенина, С. А. Бедкин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 7. – С. 46–50.

3. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.

4. Арцишевский, Я. Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с изолированной нейтралью / Я. Л. Арцишевский. – М.: Высш. шк., 1989. – 87 с.

5. Кузнецова, Над. С. Цифровое моделирование динамических процессов в системах релейной защиты / Над. С. Кузнецова, Д. Т. Нго, Ч. З. Нгуен // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2024. – № 1 (46). – С. 33–37.

6. Куликов, Ю. А. Переходные процессы в электрических системах: учебное пособие / Ю. А. Куликов. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 283 с.

7. Лыкин, А. В. Электрические системы и сети: учебное пособие / А. В. Лыкин. – М.: Университетская книга, 2006. – 254 с.

8. Парфенов, Ю. А. Кабели электросвязи / Ю. А. Парфенов. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 256 с.

9. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / под. общ. ред. С. С. Рокотьяна, И. М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.

10. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнерг. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / В. А. Веников. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с., пл.