

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 2 (47)
2024



16+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ





Издается
с января 2004 г.

ISSN 2500-0586

Главный редактор журнала
В. И. Лысак — академик РАН,
д-р техн. наук, профессор

Редакционная коллегия:

Е. В. Балакина — д.т.н., проф. ВолгГТУ
А. В. Баранов — д.ф.-м.н., проф.
РГУ нефти и газа, г. Москва
А. Б. Голованчиков — д.т.н., проф. ВолгГТУ
А. Е. Городецкий — д.т.н., проф. ИПМаш
РАН, г. Санкт-Петербург
А. В. Дмитриев — д.т.н., проф. КГЭУ,
г. Казань
А. Ю. Дунин — д.т.н., проф. МГТУ
(МАДИ), г. Москва
В. Ф. Желтобрюхов — д.т.н., проф.
ВолгГТУ, г. Волгоград
А. В. Келлер — д.т.н., проф. Московского
политехнического университета, г. Москва
И. А. Коняхин — д.т.н., проф. ИТМО,
г. Санкт-Петербург
В. В. Коротаев — д.т.н., проф. ИТМО,
г. Санкт-Петербург
Г. О. Котиев — д.т.н., проф. МГТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. А. Львов — д.т.н., проф. СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
В. А. Марков — д.т.н., проф. МГТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
Е. Р. Мошев — д.т.н., проф. ПНИПУ,
г. Пермь
А. Е. Новиков — чл.-корр. РАН, д.т.н., проф.
ВолгГТУ
Е. А. Федянов — д.т.н., проф. ВолгГТУ
Н. М. Филькин — д.т.н., проф. ИжГТУ
им. М. Т. Калашникова, г. Ижевск
А. Н. Шилин — д.т.н., проф. ВолгГТУ

Ответственный секретарь
П. С. Васильев — к.т.н., доц., ВолгГТУ
Тел. 8-(8442)24-84-31

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала
по объединенному каталогу
«Пресса России» — 94193
https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/

Тел. издательства ВолгГТУ:
+7 (8442) 24-84-08
+7 (8442) 24-84-05
e-mail: zavrio@vstu.ru

Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт научно-технический журнал

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор)
ПИ № ФС77-64543 от 22 января 2016 г.

№ 2 (47)
Июнь
2024

УЧРЕДИТЕЛЬ:
ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический
университет»
Периодичность: четыре раза в год

Адрес редакции:
РФ, 400005, Волгоград, пр. В.И. Ленина, 28
Гл. редактор: телефон: +7 (8442) 24-80-03
e-mail: lysak2@vstu.ru

Отв. секретарь: телефон: +7 (8442) 24-84-31
e-mail: pahp@vstu.ru

Официальный сайт Учредителя: www.vstu.ru

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Авторское право на журнал в целом принадлежит
Учредителю, на отдельные статьи — сохраняется за авторами

*Перепечатка из журнала «Энерго- и ресурсосбережение:
промышленность и транспорт» категорически запрещена без
оформления договора в соответствии с действующим
законодательством РФ*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Энерго-
и ресурсосбережение: промышленность и транспорт» обязательна*

Статьи печатаются бесплатно



Published since
January 2004 г.

ISSN 2500-0586

Editor-in-chief

V. I. Lysak – Academician of RAS,
D. Sc. (Technical), Professor

Editorial Board:

E. V. Balakina – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. V. Baranov – D. Sc. (Physical and Math.),
Prof., Gubkin University, Moscow.
A. B. Golovanchikov – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. E. Gorodetskij – D. Sc. (Engineering),
Prof., IPME, St. Petersburg
A. V. Dmitriev – D. Sc. (Engineering), Prof.
KSPEU, Kazan
A. Yu. Dunin – D. Sc. (Engineering), Prof.
MADI, Moscow
V. F. Zheltobryukhov – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSTU, Volgograd
A. V. Keller – D. Sc. (Engineering), Prof.
Prof. Moscow Poly, Moscow
I. A. Konyakhin – D. Sc. (Engineering), Prof.
ITMO University, St. Petersburg
V. V. Korotaev – D. Sc. (Engineering), Prof.
ITMO University, St. Petersburg
G. O. Kotiev – D. Sc. (Engineering), Prof.
BMSTU, Moscow
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering), Prof.
SSTU, Saratov
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering), Prof.
BMSTU, Moscow
E. R. Moshev – D. Sc. (Engineering), Prof.
PNRPU, Perm
A. E. Novikov – Corresponding Member
of RAS, D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU,
Volgograd
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering), Prof.
VSTU, Volgograd
B. T. Filkin – D. Sc. (Engineering), Prof.
ISTU, Izhevsk
A. N. Shilin – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSTU, Volgograd

Executive Secretary
P. S. Vasilyev – PhD, Associate Prof.
Тел. 8-(8442)24-84-31

The journal is distributed by subscription.
Index of the magazine according to the unit-
ed catalog «Press of Russia» – 94193.
[https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/](https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/)

VSTU Publisher tel.:

+7 (8442) 24-84-08

+7 (8442) 24-84-05

e-mail: zavrio@vstu.ru

© Volgograd State Technical University,
«Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport», 2024

Energo- i resursosberezhenie:

Promyshlennost' i transport

(Energy and Resource Saving:
Industry and Transport)
science-technical journal

Journal is registered in the Federal Service for supervision
of communications, information technology and mass media
(Roscomnadzor) registration certificate:
ПН N° (ФС77-64543, registration date: 22 January 2016

№ 2 (47)
June
2024

FOUNDER:

**Federal State Budgetary Educational Institution of Higher
Education «Volgograd State Technical University»**

Periodicity: four times per year

Editorial office address:

Russia, 400005, Volgograd, Lenin avenue, 28.

Editor-In-Chief: tel.: +7 (8442) 23-00-76

e-mail: lysak2@vstu.ru

Executive Secretary: +7 (8442) 24-84-31

e-mail: pahp@vstu.ru

Official website: www.vstu.ru

Published by the decision of editorial review board
of Volgograd State Technical University

***The copyright for the journal in general belongs to the Founder,
for separate articles – retained by the authors***

Reprint from the journal «Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport» is strongly forbidden -without conclusion of an agreement in accordance with the current legislation of the Russia Federation

When reprint the materials, the citation to the journal «Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport» is obligatory

The articles are published for free

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Андреева В. В. 53	Нефедьев А. И. 40, 49
Бойко Г. В. 53	Сомов А. В. 49
Великая К. И. 53	Стрижиченко А. В. 13
Елфимова О. И. 31	Федин А. П. 53
Ефимов В. В. 13	Федина В. А. 53
Захаров Д. С. 35	Шаронов Г. И. 40
Кузнецова Н. С. 6, 18	Шаронова В. Г. 40
Кутейников П. Д. 31, 45	Шилин А. Н. 6, 18
Нго Д. Т. 6, 18	

AUTHOR INDEX

Andreeva V. V. 53	Ngo D. T. 6, 18
Boyko G. V. 53	Sharonov G. I. 40
Efimov V. V. 13	Sharonova V. G. 40
Elfimova O. I. 31	Shilin A. N. 6, 18
Fedin A. P. 53	Somov A. V. 49
Fedina V. A. 53	Strizhichenko A. V. 13
Kuteynikov P. D. 31, 45	Velikaya K. I. 53
Kuznetsova N. S. 6, 18	Zakharov D. S. 35
Nefed'ev A. I. 40, 49	

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Шилин А. Н., Нго Д. Т., Кузнецова Н. С.</i> Структурный метод повышения быстродействия цифровых фильтров.....	6
<i>Стрижиченко А. В., Ефимов В. В.</i> Моделирование старения изоляции асинхронных электродвигателей ответственных потребителей теплоэлектростанций в среде Simintech.....	13
<i>Шилин А. Н., Нго Д. Т., Кузнецова Н. С.</i> Цифровое моделирование динамических процессов в линиях с распределенными параметрами.....	18
<i>Елфимова О. И., Кутейников П. Д.</i> Влияние использования дистанционных видов релейной защиты на надежность систем электроснабжения потребителей.....	31
<i>Захаров Д. С.</i> Разработка распределенной информационно-измерительной системы мониторинга радиационного фона на местности.....	35
<i>Нефедьев А. И., Шаронов Г. И., Шаронова В. Г.</i> Сравнительные испытания транзисторных и конденсаторно-тиристорных модулей зажигания при работе с газовым двигателем.....	40
<i>Кутейников П. Д.</i> Повышение надежности электроснабжения за счет использования реклоузеров с рефлектометрами.....	45
<i>Сомов А. В., Нефедьев А. И.</i> Велотренажер с контролем состояния для реабилитации после травм.....	49
<i>Бойко Г. В., Федин А. П., Федина В. А., Великая К. И., Андреева В. В.</i> О возможности применения различных регуляторов в системах автоматического управления агрегатами транспортных средств.....	53

CONTENTS

<i>Shilin A. N., Ngo D. T., Kuznetsova N. S.</i> The structural method for increase the performance of digital filters.....	6
<i>Strizhichenko A. V., Efimov V. V.</i> Modeling of insulation aging of asynchronous electric motors of responsible consumers of thermal power plants in simintech environment.....	13
<i>Shilin A. N., Ngo D. T., Kuznetsova N. S.</i> Digital modeling of dynamic processes in lines with distributed parameters.....	18
<i>Elfimova O. I., Kuteynikov P. D.</i> Influence of the use of remote types of relay protection on the reliability of consumer power supply systems.....	31
<i>Zakharov D. S.</i> Development of a distributed information and measurement system for monitoring the radiation background on the ground.....	35
<i>Nefed'ev I. A. I., Sharonov G. I., Sharonova V. G.</i> Comparative tests of transistor and capacitor-thyristor ignition modules when operating with a gas engine.....	40
<i>Kuteynikov P. D.</i> Increasing of the power supply reliability through the use of reclosers with reflectometers.....	45
<i>Somov A. V., Nefed'ev A. I.</i> Exerciser bike with condition control for rehabilitation after injuries.....	49
<i>Boyko G. V., Fedin A. P., Fedina V. A., Velikaya K. I., Andreeva V. V.</i> On the possibility of using various regulators in automatic control systems of vehicle units.....	53

УДК 681.513.2

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-2-47-6-12

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

СТРУКТУРНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ

Волгоградский государственный технический университет

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

Автор, ответственный за переписку: Надежда Сергеевна Кузнецова, artex23@yandex.ru

Цифровые системы автоматического управления должны обеспечивать необходимую точность и быстродействие обработки информации. Требования по быстродействию весьма актуальны для цифровых фильтров систем управления, работающих в режиме реального времени. Рассмотрен структурный метод повышения быстродействия цифровых фильтров по условию компромиссного требования быстродействие – точность. Проведена оценка быстродействия трех вариантов структурных схем реализации передаточной функции цифрового фильтра. В качестве критерия оценки использовано время, необходимое для выполнения программы микроконтроллера. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что параллельная декомпозиция реализации передаточной функции цифрового фильтра обладает лучшим быстродействием по сравнению с остальными декомпозициями.

Ключевые слова: цифровая обработка сигнала, цифровой фильтр, быстродействие, передаточная функция, структурные методы

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

THE STRUCTURAL METHOD FOR INCREASE THE PERFORMANCE OF DIGITAL FILTERS

Volgograd State Technical University

Digital automatic control systems must provide the necessary accuracy and performance of information processing. The performance requirements are very actual for digital filters of control systems operating in real time mode. In this paper considers the structural method for increase the performance of digital filters on the condition of a compromise requirements performance-accuracy. Evaluation of performance of three embodiments of structural schemes for realization the transfer function of digital filter was carried out. As a criterion for performance evaluation used the time required to perform the microcontroller program. Based on the results obtained, we can conclude that the parallel decomposition for realization the transfer function of digital filter has the best performance compared to the other decompositions.

Keywords: digital signal processing, digital filter, performance, transfer function, structural methods

В оптико-электронных приборах при обработке сигналов широко используются цифровые фильтры, которые должны обеспечивать требования по быстродействию и точности. Повысить быстродействие системы можно за счет увеличения частоты дискретизации, однако при увеличении частоты возрастает погрешность обработки цифровой информации. Таким образом, выбор частоты дискретизации должен осуществляться с учетом компромиссных тре-

бований. Особенно это актуально для цифровых систем, реализующих рекурсивные алгоритмы, поскольку при вычислениях с помощью таких алгоритмов происходит накопление погрешности. Основной причиной погрешности накопления является операция округления при вычислениях. Значение этой погрешности зависит от алгоритма решения и разрядности данных [1]. Поэтому необходим анализ других методов решения задачи по компромиссным тре-

бованиям точность – быстродействие. Из источников [1–4] следует, что погрешность накопления зависит от структурной схемы алгоритма или формы декомпозиции. Так, например, реализация фильтра с непосредственной декомпозицией при степенях, близких к 5 и 6, может быть неустойчивой. Реализация с последовательной декомпозицией более устойчива, но менее быстродействующая. Таким образом, необходимо провести анализ по точности и быстродействию различных структурных вариантов цифровых регуляторов и фильтров.

Рассмотрим различные варианты структурных схем реализации импульсной передаточной функции $D(z)$. В качестве примеров реализации различных схем представим передаточную функцию четвертой степени (рис. 1). Если задана передаточная функция в виде:

$$D(z) = \frac{a_{m+1}z^m + a_m z^{m-1} + \dots + a_1}{b_{n+1}z^n + b_n z^{n-1} + \dots + b_1}, \quad (1)$$

то по этому уравнению без вычислений может быть получена диаграмма состояния с непосредственной декомпозицией (рис. 1, а).

Уравнение (1) можно привести к другому виду:

$$D(z) = \frac{K(z+c_1)(z+c_2)\dots(z+c_m)}{(z+d_1)(z+d_2)\dots(z+d_n)}, \quad (2)$$

где $n \geq m$; $c_1 \div c_m$ и $d_1 \div d_n$ – нули и полюсы $D(z)$ соответственно.

Это уравнение представляет собой произведение передаточных функций звеньев первого порядка. Диаграмма состояния в этом случае является последовательной декомпозицией (рис. 1, б).

С помощью разложения уравнения (1) на простые слагаемые:

$$D(z) = \sum_{k=1}^i \frac{K_k}{z+d_k} + \sum_{k=i+1}^n \frac{K_k}{(z+d_k)^{k-i}}. \quad (3)$$

В этом уравнении первое слагаемое соответствует различным собственным значениям $d_k, k = 1, 2, \dots, i$, а второе – кратным, причем через $d_{i+1} = d_{i+2} = \dots = d_n$ обозначено собственное значение кратности $n - i$.

Уравнение (3) представляет собой сумму передаточных функций звеньев первого порядка (рис. 1, в). На рис. 1, г–д изображены схемы устройств с комбинацией последовательной и параллельной декомпозиций [1].

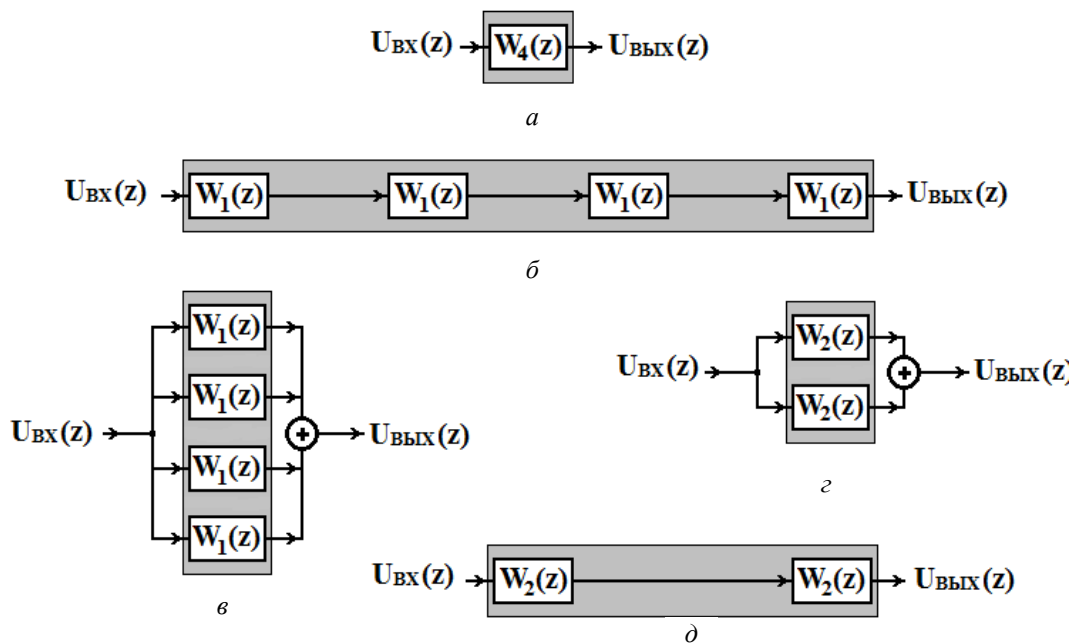


Рис. 1. Структурные схемы реализации передаточной функции:
а – непосредственная декомпозиция; б – последовательная декомпозиция;
в – параллельная декомпозиция; г–д – комбинации декомпозиций

Рассмотрим методику определения быстродействия разных вариантов цифровых фильтров на решении конкретной задачи. В качестве

примера для анализа быстродействия цифровых фильтров рассмотрим фильтр с передаточной функцией:

$$D(z) = \frac{z^3 - 2,4z^2 + 1,91z - 0,504}{z^4 - 5z^3 + 9,35z^2 - 7,75z + 2,4024}. \quad (4)$$

Для численного анализа преобразуем уравнение (4) к следующим формам:

$$D(z) = \frac{(z-0,7)(z-0,8)(z-0,9)}{(z-1,1)(z-1,2)(z-1,3)(z-1,4)}$$

$$D(z) = \frac{z-0,7}{z-1,1} \cdot \frac{z-0,8}{z-1,2} \cdot \frac{z-0,9}{z-1,3} \cdot \frac{1}{z-1,4}$$

$$D(z) = \frac{1-0,7z^{-1}}{1-1,1z^{-1}} \cdot \frac{1-0,8z^{-1}}{1-1,2z^{-1}} \cdot \frac{1-0,9z^{-1}}{1-1,3z^{-1}} \cdot \frac{z^{-1}}{1-1,4z^{-1}}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) может быть получена диаграмма состояния (рис. 2) с последовательной декомпозицией:

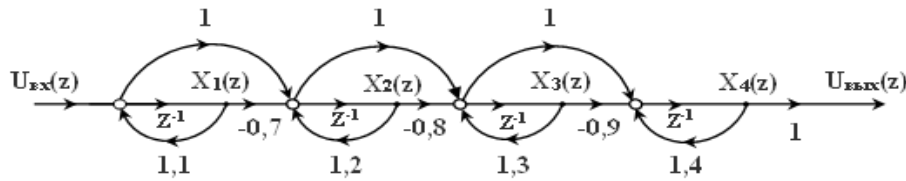


Рис. 2. Последовательная декомпозиция

Для получения диаграммы состояния с непосредственной декомпозицией воспользуемся выражением (4):

$$D(z) = \frac{z^{-1} - 2,4z^{-2} + 1,91z^{-3} - 0,504z^{-4}}{1 - 5z^{-1} + 9,35z^{-2} - 7,75z^{-3} + 2,4024z^{-4}}, \quad (6)$$

по этому уравнению (6) без вычислений получена диаграмма состояния (рис. 3):

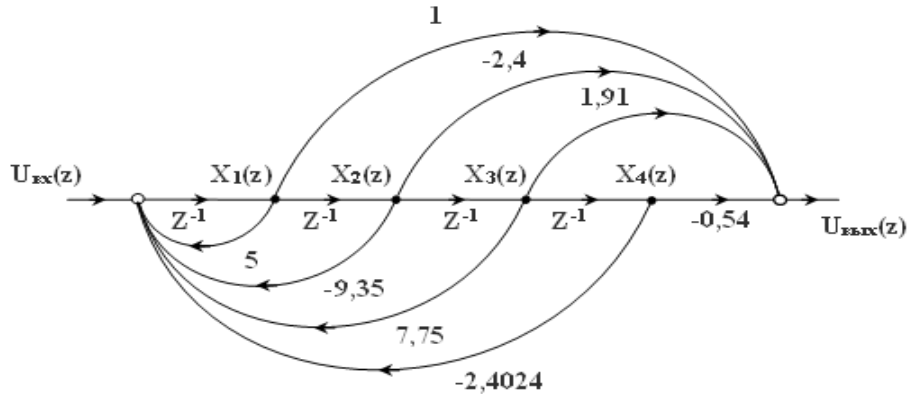


Рис. 3. Непосредственная декомпозиция

С помощью разложения уравнения (4) на простые слагаемые получим выражение (7):

$$D(z) = \frac{z^3 - 2,4z^2 + 1,91z - 0,504}{(z-1,1)(z-1,2)(z-1,3)(z-1,4)}$$

$$D(z) = \frac{A_1}{z-1,1} + \frac{A_2}{z-1,2} + \frac{A_3}{z-1,3} + \frac{A_4}{z-1,4}$$

$$D(z) = \frac{-4}{z-1,1} + \frac{30}{z-1,2} + \frac{-60}{z-1,3} + \frac{35}{z-1,4}$$

$$D(z) = \frac{-4z^{-1}}{1-1,1z^{-1}} + \frac{30z^{-1}}{1-1,2z^{-1}} + \frac{-60z^{-1}}{1-1,3z^{-1}} + \frac{35z^{-1}}{1-1,4z^{-1}}. \quad (7)$$

Уравнение (7) представляет собой сумму передаточных функций звеньев первого поряд-

ка, которому соответствует диаграмма состояния с параллельной декомпозицией (рис. 4):

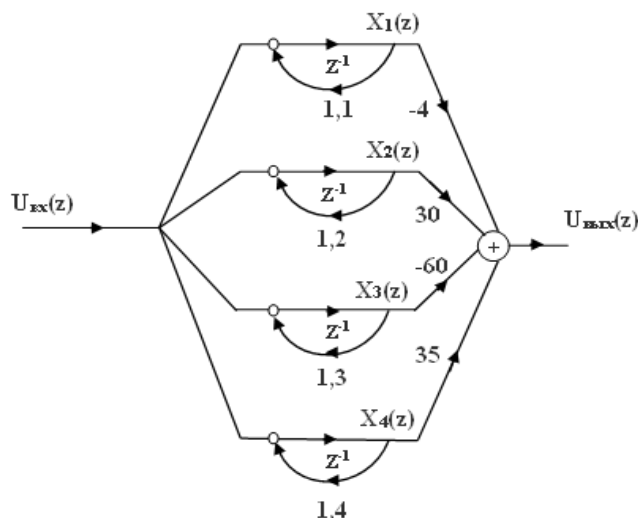


Рис. 4. Параллельная декомпозиция

Проведем анализ быстродействия всех трех вариантов реализации цифрового фильтра. Быстродействие фильтра в рабочем режиме оценим как время, необходимое для выполнения программы микроконтроллера. То есть будем определять количество тактов, которое необходимо для выполнения команды. Время выполнения одного такта определяется тактовой частотой F микроконтроллера.

Предположим, что в описании системы команд МП K580ИК80 – программа управляющей работой контроллера, микропроцессор которого работает с тактовой частотой $F = 2$ Мц (период составляет $T = 0,5$ мкс). На основе этих данных можем записать длительности выполнения операций следующих операций [5–6] (табл. 1):

Таблица 1

Программная реализация временной задержки

CALL	TIME	- 17 тактов - 8,5 мкс
MVI	B, 31	- 7 тактов - 3,5 мкс
DCR	B	- 5 тактов - 2,5 мкс
JNZ	COUNT	- 10 тактов - 5,0 мкс
RET		- 10 тактов - 5,0 мкс

Однократно исполняемые команды (CALL, MVI, RET) в этой подпрограмме требуют 17 мкс (8,5 мкс + 3,5 мкс + 5 мкс). Время выполнения пары команд (DCR, JNZ) составляет 7,5 мкс. 31 = 232,5 мкс. Таким образом, сумма времени выполнения задержки 232,5 + 17 = 249,5 мкс (табл. 2).

Таблица 2

Программная реализация операции умножения

MULT:	MVI	B, 0	- 7 тактов - 3,5 мкс
	MVI	L, 9	- 7 тактов - 3,5 мкс
NXBIT:	MOV	A, C	- 5 тактов - 2,5 мкс
	RAR		- 4 тактов - 2,0 мкс
	MOV	C, A	- 5 тактов - 2,5 мкс
	DCR	L	- 5 тактов - 2,5 мкс
	JZ	DONE	- 10 тактов - 5,0 мкс
	MOV	A, B	- 5 тактов - 2,5 мкс
	JNC	NOADD	- 10 тактов - 5,0 мкс
	ADD	D	- 4 тактов - 2,0 мкс
NOADD:	RAR		- 4 тактов - 2,0 мкс
	MOV	B, A	- 5 тактов - 2,5 мкс
	JMP	NXBIT	- 10 тактов - 5,0 мкс
DONE:	HLT		- 7 тактов - 3,5 мкс

Предположим, что в программе реализации самого простого умножения однобайтных чисел после команды JZ DONE выполняется команда HLT (не реализуются команды: MOVA, B;

JNCNOADD; ADDD и подпрограмма NOADD). В этом случае для выполнения операции умножения необходимо время 25 мкс (табл. 3).

Таблица 3

Программная реализация операции сложения

ADDN:	MVI	B, N	- 7 тактов - 3,5 мкс
	LXI	D, FIRST	- 10 тактов - 5,0 мкс
	LXI	H, SECND	- 10 тактов - 5,0 мкс
	XRA	A	- 4 тактов - 2,0 мкс
LOOP:	LDAX	D	- 7 тактов - 3,5мкс
	ADC	M	- 7 тактов - 3,5мкс
	STAX	D	- 7тактов - 3,5 мкс
	DCR	B	- 5 тактов - 2,5мкс
	JZ	DONE	- 10 тактов - 5,0мкс
	INX	H	- 5 тактов - 2,5 мкс
	INX	D	- 5 тактов - 2,5 мкс
	JMP	LOOP	- 10 тактов - 5,0 мкс
DONE:	HLT		- 7тактов - 3,5 мкс

Предположим, что в программе реализации самого простого сложения однобайтных чисел после команды JZ DONE выполняется команда HLT (не реализуются команды: INX H, INX D, JMP LOOP). В этом случае для реализации операции сложения необходимо время 37 мкс.

Следует отметить, что некоторые команды могут выполняться за различное количество тактов, в зависимости от условия выполнения команды. В таком случае необходимо выбирать минимально возможное количество тактов, необходимое для выполнения команды. Потому что блоков сложения, умножения и задержки

при последовательной и непосредственной декомпозиции больше, чем при параллельной декомпозиции.

Из численного анализа получены следующие результаты времени выполнения различных операций (табл. 4): умножения 25 мкс, сложения 37 мкс, задержки 249,5 мкс. Причем последовательная декомпозиция состоит из 11 блоков умножения, 4 блоков сложения и 4 блоков задержки. Непосредственная – 8 блоков умножения, 2 блоков сложения и 4 блоков задержки. Параллельная – 2 блоков умножения, 2 блоков сложения и 1 блока задержки.

Таблица 4

Схемы декомпозиции	Операция умножения		Операция сложения		Операция задержки		Реализация фильтра
	блок	время	блок	время	блок	время	время
Последовательная	11	275 мкс	4	148 мкс	4	998 мкс	1421 мкс
Непосредственная	8	200 мкс	2	74 мкс	4	998 мкс	1272 мкс
Параллельная	2	50 мкс	2	74 мкс	1	249,5 мкс	373,5мкс

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что третий вариант реализации фильтра обладает лучшим быстродействием (373,5 мкс) по сравнению с первым (1421 мкс) и вторым (1272 мкс) вариантом реализации фильтра. Качественно полученный результат для параллельной де-

композиции ожидаем, однако в этом анализе получены численные результаты, позволяющие более обоснованно проектировать цифровые фильтры для конкретных задач.

Для различных схем декомпозиции предложены схемы реализации цифровых фильтров на базе микроконтроллеров ATmega8-16PU

и *Atmega-64* (рис. 5–7). Таблица соответствия между командами микроконтроллера и количеством тактов, необходимых для их выполнения, при-

ведена в документации на микроконтроллер модели *Atmega8-16PU* или *Atmega-64*, параллельная декомпозиция реализуется на базе *Atmega-64*.

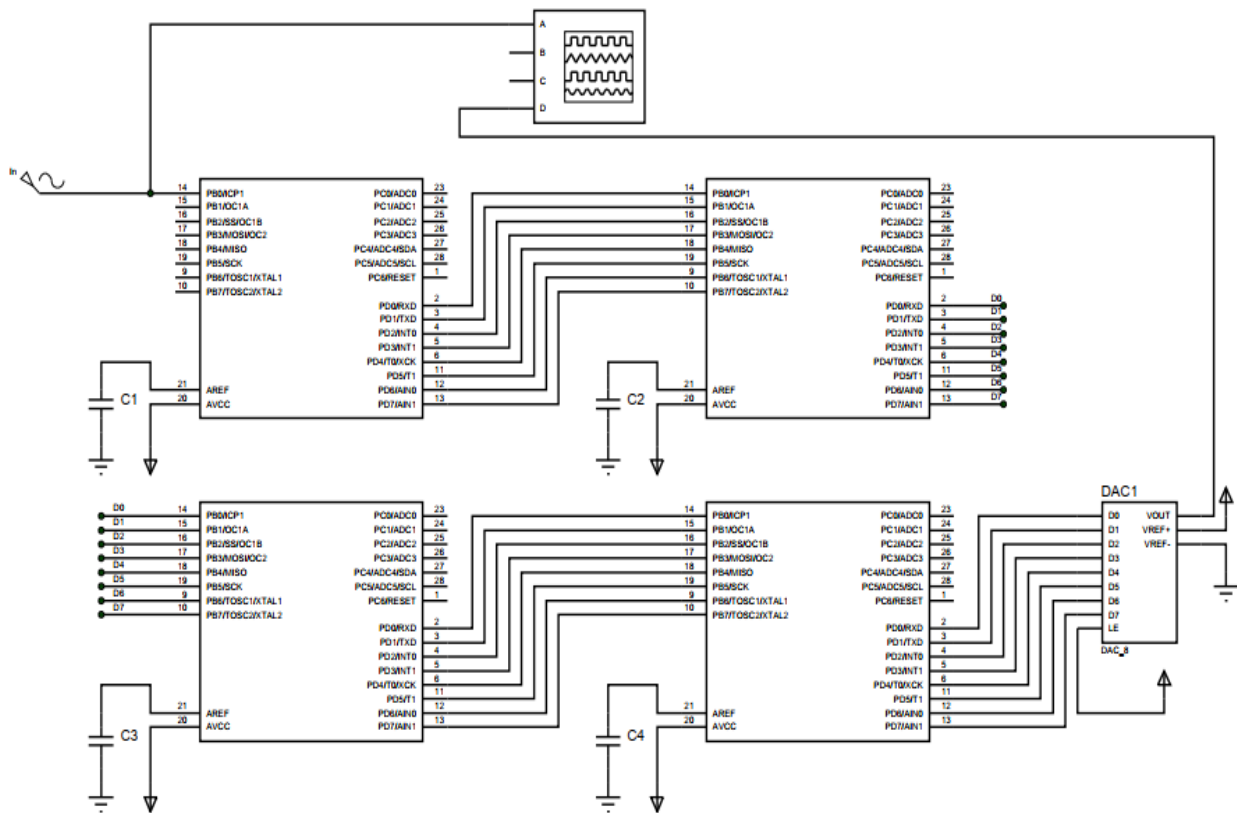


Рис. 5. Схема цифрового фильтра (последовательная декомпозиция)

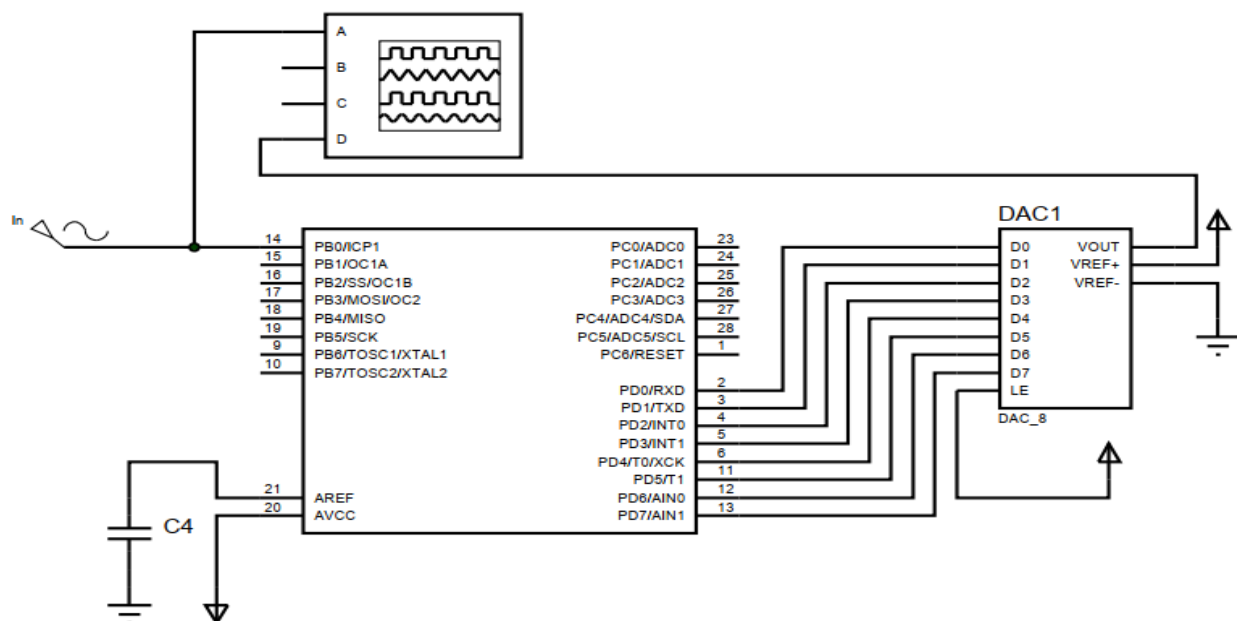


Рис. 6. Схема цифрового фильтра (непосредственная декомпозиция)

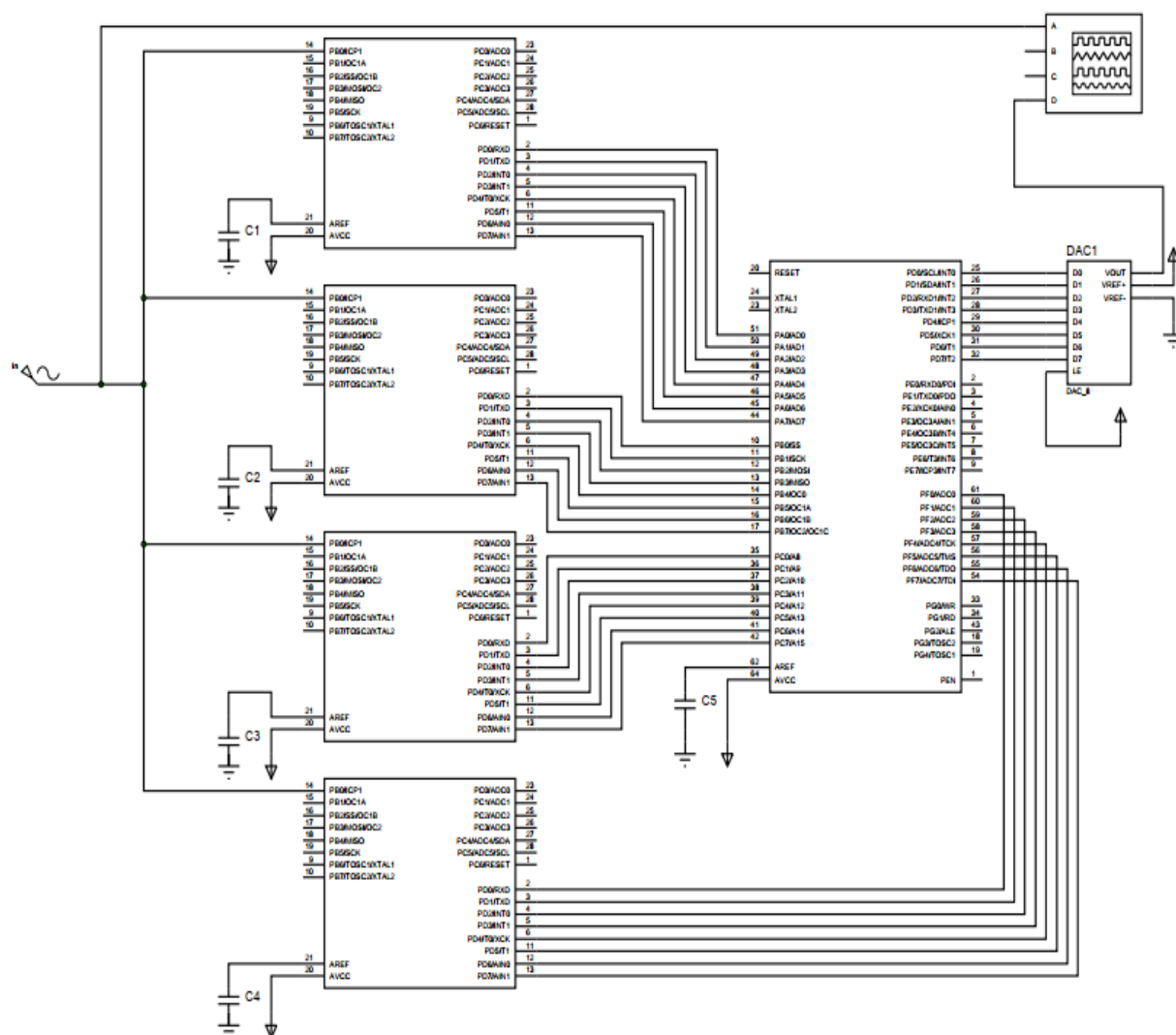


Рис. 7. Схема цифрового фильтра (параллельная декомпозиция)

Выводы

На основе предложенной методики проведен анализ быстродействия различных структурных схем реализации цифровых фильтров. Из проведенного анализа следует, что быстродействие фильтров с параллельной декомпозицией значительно выше других вариантов реализации. Предложенная методика может найти применение при проектировании цифровых систем контроля и управления в различных отраслях промышленности. Кроме того, методика может быть использована при анализе существующих систем автоматизированного проектирования электронных схем, например, по программе *Proteus*.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куо, Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: пер. с англ. / Б. Куо. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.
2. Шилин, А. Н. Точность цифровых систем управления с рекуррентными алгоритмами / А. Н. Шилин // Приборы и системы управления. – 1999. – № 7. – С. 5–8.
3. 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.
4. Шилин, А. Н. Определение параметров численных моделей динамических звеньев аналоговых САУ / А. Н. Шилин, О. А. Крутякова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 9. – С. 17–19.
5. Каган, Б. М. Основы проектирования микропроцессорных устройств автоматики / Б. М. Каган, В. В. Сташин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 304 с.
6. Токхайм, Р. Л. Микропроцессоры Курс и упражнения / Р. Л. Токхайм; пер. с англ.; под ред. В. Н. Грасевича. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 336 с.

УДК 621.313.333.2

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-2-47-13-18

*А. В. Стрижиченко, В. В. Ефимов***МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ
ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СРЕДЕ SIMINTECH****Филиал «НИУ «МЭИ» (г. Волжский)**

Strizhichenko@vfmei.ru, EfimVlad999@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку:

Александр Васильевич Стрижиченко, Strizhichenko@vfmei.ru

В настоящее время актуальными являются вопросы надежности ответственного силового электрооборудования, к которому можно отнести электрические асинхронные и синхронные двигатели. Регламентируемый заводом-изготовителем срок службы асинхронного двигателя составляет 15–25 лет при условии работы в нормальном режиме. В течении эксплуатации электродвигатель испытывает ряд негативных воздействий, отличающихся между собой интенсивностью и временем возмущения, что приводит к нарушению механической прочности и ускоренному старению изоляции, что в свою очередь уменьшает срок службы оборудования.

Целью данных исследований является разработка математического аппарата описания ускоренного старения изоляции асинхронных двигателей, которое выражено повышением температуры обмоток электрических машин, что приводит к ускоренному старению изоляции.

Алгоритм расчета основан на приведении внешних возмущений, таких как температура обмоток, несинусоидальность и несимметрия потребляемого машиной электрического тока, повышение температуры окружающей среды на состояние обмотки статора, что в свою очередь уменьшает срок службы асинхронного двигателя.

По окончании исследований программный комплекс будет предназначен для расчета и корректировки времени ближайшего обслуживания машины на основании технического состояния агрегата.

Ключевые слова: асинхронные электродвигатели, ускоренное старение изоляции, SimInTech, долговечность, качество электроэнергии, прогнозирование

*A. V. Strizhichenko, V. V. Efimov***MODELING OF INSULATION AGING OF ASYNCHRONOUS
ELECTRIC MOTORS OF RESPONSIBLE CONSUMERS
OF THERMAL POWER PLANTS IN SIMINTECH ENVIRONMENT****Branch of "MPEI" (Volzhskiy)**

Nowadays the questions of reliability of the responsible power electrical equipment, to which electric asynchronous and synchronous motors can be referred, are actual. The service life of induction motor regulated by the manufacturer is 15–25 years under condition of operation in normal mode. During operation, the electric motor experiences a number of negative effects, differing between themselves intensity and time perturbation, which leads to a violation of mechanical strength and accelerated aging of insulation, which in turn reduces the service life of the equipment.

The purpose of this research is to develop a mathematical apparatus to describe the accelerated aging of the insulation of induction motors, which is expressed by an increase in the temperature of the windings of electrical machines, which leads to accelerated aging of insulation.

The calculation algorithm is based on bringing external perturbations such as winding temperature, non-sinusoidality and asymmetry of the electric current consumed by the machine, increasing ambient temperature on the state of the stator winding, which in turn reduces the service life of the induction motor.

At the end of the research, the software package will be designed to calculate and adjust the time of nearest machine maintenance based on the technical condition of the machine.

Keywords: induction motors, accelerated insulation aging, SimInTech, durability, power quality, forecasting

Расчеты качественного влияния повышения температуры на деградацию изоляции осуществлены с помощью общих законов кинетики

химических реакций уравнения Вант – Гоффа и Аррениуса, в котором постоянная скорость протекания реакции является величиной, опре-

деляющей относительное число эффективных столкновений частиц, завершающихся химическим взаимодействием [9, 107 с]:

$$K = A \exp \left[\frac{-E_A}{R \cdot Q} \right], \quad (1)$$

где A – коэффициент; E_A – энергия активации, Дж/моль; $R = 8,317$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; Q – абсолютная температура, °С.

Приведем формулу (1) к времени достижения изоляцией предельного состояния вследствие старения:

$$\ln \tau = \frac{-E_A}{R \cdot Q} - G \quad (2)$$

$$G = \ln A - \ln \ln \left(\frac{C_0}{C} \right), \quad (3)$$

где C_0 – начальная концентрация молекул, м⁻³; C – конечная концентрация молекул, м⁻³.

Если известна кривая изменения температуры машины от времени, то можно рассчитать уточненный срок службы изоляции:

$$\tau_2 = \tau_1 \cdot \exp \left[B \cdot \left(\frac{1}{\theta_2} - \frac{1}{\theta_1} \right) \right], \quad (4)$$

где τ_2 – уточненный срок службы изоляции, ч; θ_1 – первоначальная температура машины при τ_1 , °С; θ_2 – температура машины на участке времени τ_2 , °С; $B = \frac{E_A}{R}$ – табличный параметр изоляции, 10⁻⁴ °С.

Формула расчета уточненного срока службы изоляции является приближенной ввиду неоднородности конструкции асинхронного двигателя, параметры переменных E_A , B и G получены экспериментально, значения которых для каждого типа изоляции приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры срока службы изоляции

Класс изоляции	$B, 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$	$G, \text{ м}^{-3}$	$E_A, \text{ Дж/моль}$	Класс изоляции	$B, 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$	$G, \text{ м}^{-3}$	$E_A, \text{ Дж/моль}$
A	0,95	15,3	7,9	F	1,27	19,7	10,55
E	0,985	15,1	8,19	H	1,55	24,2	12,89
B	1,02	15,5	8,48	C	1,55	21,8	12,89

К повышению температуры обмоток могут привести не только увеличение осевого момента и температуры окружающей среды, но и ухудшение качества электроэнергии, а именно, несимметрия и несинусоидальность напряжений. На сегодняшний день имеет место тенденция роста потребления нагрузки с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Несинусоидальные режимы негативно сказываются на работе систем автоматики и релейной защиты, приводят к увеличению погрешности устройств учета электроэнергии, вызывают дополнительный нагрев силового оборудования и усиление ионизационных процессов, тем самым уменьшая его срок службы.

Провалы и пики напряжений имеют кратковременный фронт воздействия, при этом приводят к скачкообразному переходу в новый установившийся режим с временным увеличением протекающего тока и роста температуры обмоток. Основная доля потерь в электрической машине от высокочастотных гармоник приходится на обмотки статора и ротора, при этом дополнительными потерями в стали ротора и статора можно пренебречь ввиду их незначительного воздействия. Влияние высших гармоник на рост дополнительных потерь для

асинхронных машин представлен на рис. 1 [5], на котором построена характеристика зависимости средних дополнительных потерь от номера гармоники n .

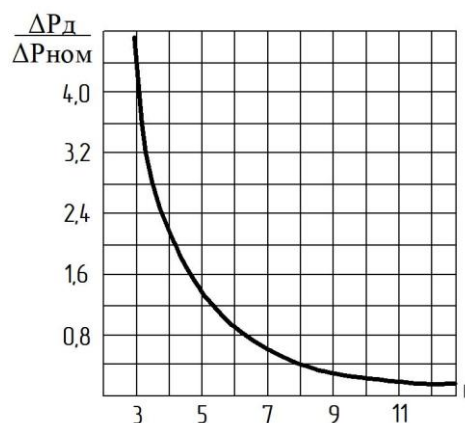


Рис. 1. Влияние высших гармоник на дополнительные потери в асинхронных двигателях

Как видно из графика, наибольшее влияние оказывают гармоники низкого порядка, когда последующими можно пренебречь ввиду их незначительного воздействия, при этом значение удельных дополнительных потерь также зависит от последовательности чередования векторов.

Дополнительные потери от высших гармоник рассчитаем по формуле:

$$\Delta P_{\text{м.п.}} = 2 \cdot \Delta P_{\text{м.ном.}} \cdot K_I^2 \sum \left(k_{U(n)}^2 \cdot \frac{1}{n \cdot \sqrt{n}} \right), \quad (5)$$

где $\Delta P_{\text{м.ном.}}$ – паспортные потери в меди статора, кВт; $\Delta P_{\text{м.п.}}$ – дополнительные потери в меди статора, вызванные n -ной гармоникой тока, кВт; K_I – кратность пускового тока; n – номер гармонической составляющей; $k_{U(n)}$ – коэффициент n -ной гармонической составляющей в относительных единицах.

Расчет дополнительных потерь от токов обратной последовательности при несимметрии напряжений рассчитывается согласно:

$$\Delta P_{\text{м.нс.}} = 2,41 \cdot \Delta P_{\text{м.ном.}} \cdot K_I^2 \cdot \varepsilon_U^2, \quad (6)$$

где ε_U – коэффициент несимметрии напряжения, заданный в относительных единицах.

Прирост температуры от токов высших гармоник и обратной последовательности:

$$\Delta t_1 = \theta_{\text{ном.}} \cdot \frac{\Delta P_{\text{м.п.}} + \Delta P_{\text{м.нс.}}}{\Delta P_{\text{м.ном.}}}, \quad (7)$$

где Δt_1 – прирост температуры от воздействия токов высших гармоник и обратной последовательности, °C; $\theta_{\text{ном.}}$ – паспортная температура работы двигателя, °C.

Подставим дополнительные коэффициенты в формулу (4), получим уточненную формулу расчета старения изоляции:

$$\tau_2 = \tau_1 \cdot \exp \left[B \cdot \left(\frac{1}{\theta_1 + \Delta t_{\text{окр}} + \Delta t_1} - \frac{1}{\theta_1} \right) \right], \quad (8)$$

где $\Delta t_{\text{окр}}$ – прирост температуры окружающей среды сверх номинальной, °C.

1. Моделирование в среде SimInTech

Для моделирования принят питательный насос ПЭ 580-185-3, применяемый для подачи воды с температурой до 165 °C тепловых электрических станций с номинальными параметрами и условиями работы, приведенными ниже:

электрическая мощность
коэффициент мощности
нормальный срок службы
рабочая температура работы
кратность пускового тока
номинальное напряжение
коэффициент 2 гармоники
коэффициент 3 гармоники
коэффициент несимметрии напряжения

$P_{\text{ном}} = 2000$ кВт;
 $\cos(\varphi) = 0,92$;
 $\tau_1 = 25000$ час;
 $\theta_{\text{ном}} = 75$ °C;
 $K_I = 5,1$;
 $U_{\text{ном}} = 380$ В
 $k_{U(3)} = (0 \div 1)$ %;
 $k_{U(5)} = (0 \div 0,7)$ %;
 $\varepsilon_U = (0 \div 1,5)$ %.

На основе представленных параметров разработана модель в программном комплексе SimInTech, позволяющая моделировать влия-

ние указанных факторов на скорость старения изоляции электрической машины, изображенной на рис. 2:

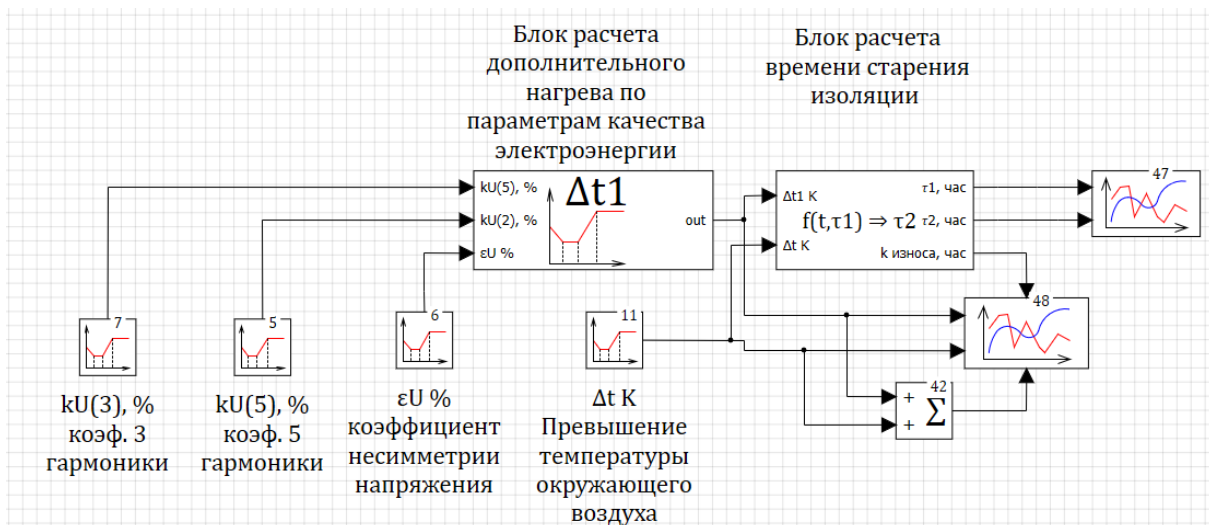


Рис. 2. Схема модели влияния дополнительного нагрева на скорость старения изоляции электрической машины в среде SimInTech

Схема состоит из двух субмоделей, блока расчета дополнительного нагрева по параметрам качества электроэнергии, представленного

на рис. 3, и блока расчета скорости старения изоляции на рис. 4.

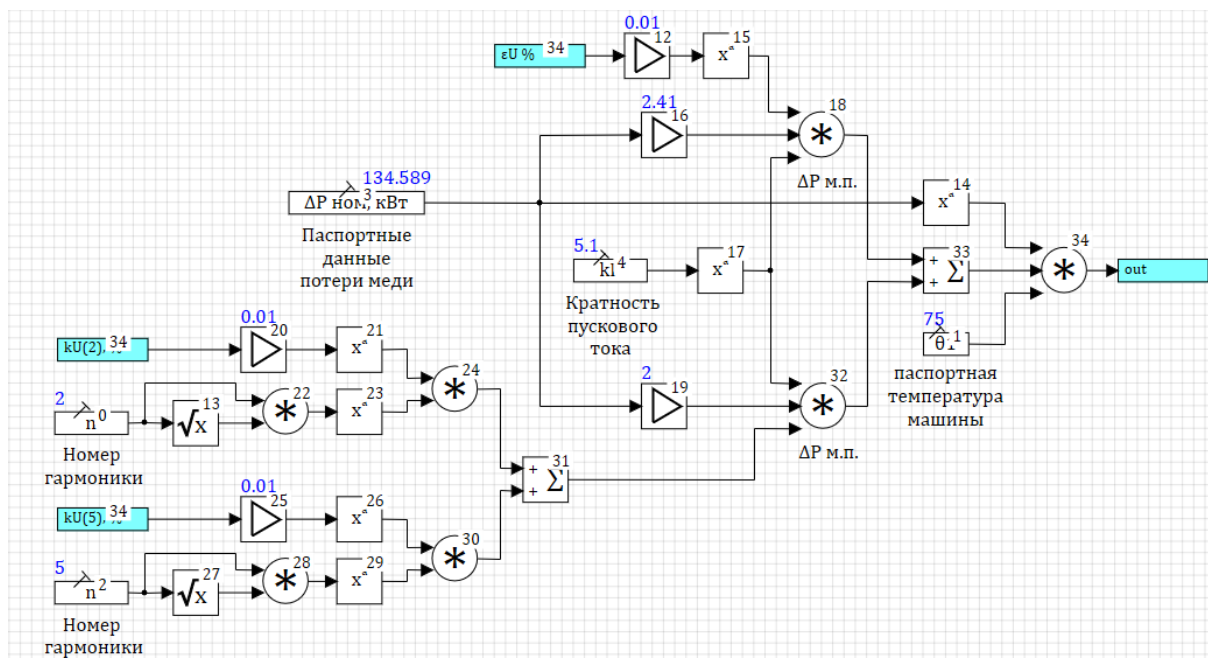


Рис. 3. Схема блока расчета влияния качества электроэнергии на скорость износа изоляции электрической машины в среде SimInTech

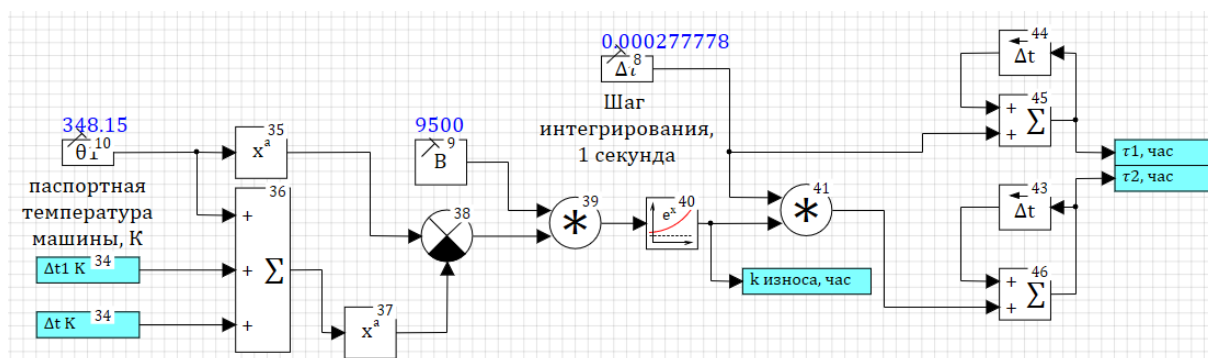


Рис. 4. Схема блока расчета скорости износа изоляции электрической машины в среде SimInTech

На рис. 5 приведены результаты моделирования зависимости коэффициента ускорения износа изоляции от влияющих факторов в соответствии с суточным графиком работы электроустановки. Базовым значением коэффициента принята единица, дополнительный нагрев увеличивает данное значение.

Для проверки модели расчета коэффициента износа, представленного на рис. 5, на участ-

ке времени 0–2 часа выключено внешнее воздействие, при этом прогнозируемый коэффициент равен стандартному, вследствие чего можно заключить, что модель не искажает кривую износа изоляции при отсутствии внешнего воздействия.

На рис. 6 представлен накопительный эффект воздействия дополнительного нагрева в часах нормального износа.

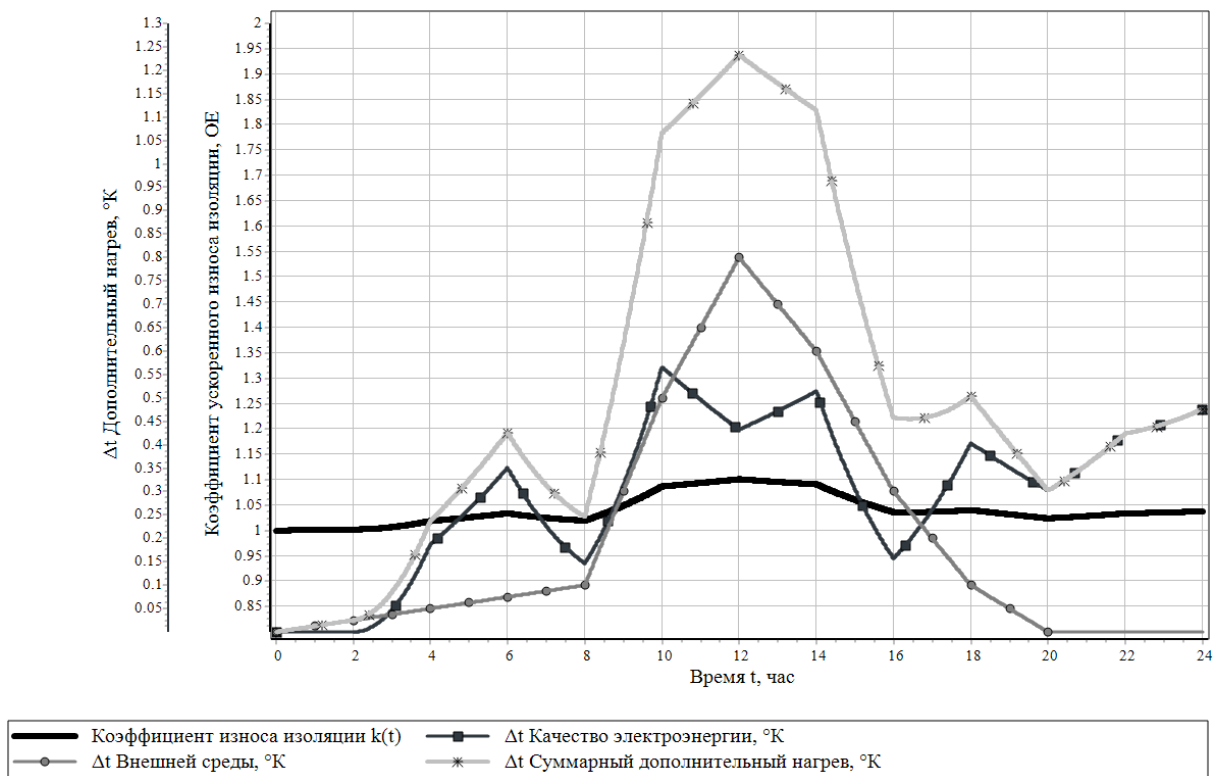


Рис. 5. Результаты моделирования зависимости коэффициента ускорения износа изоляции от влияющих факторов в соответствии с суточным графиком

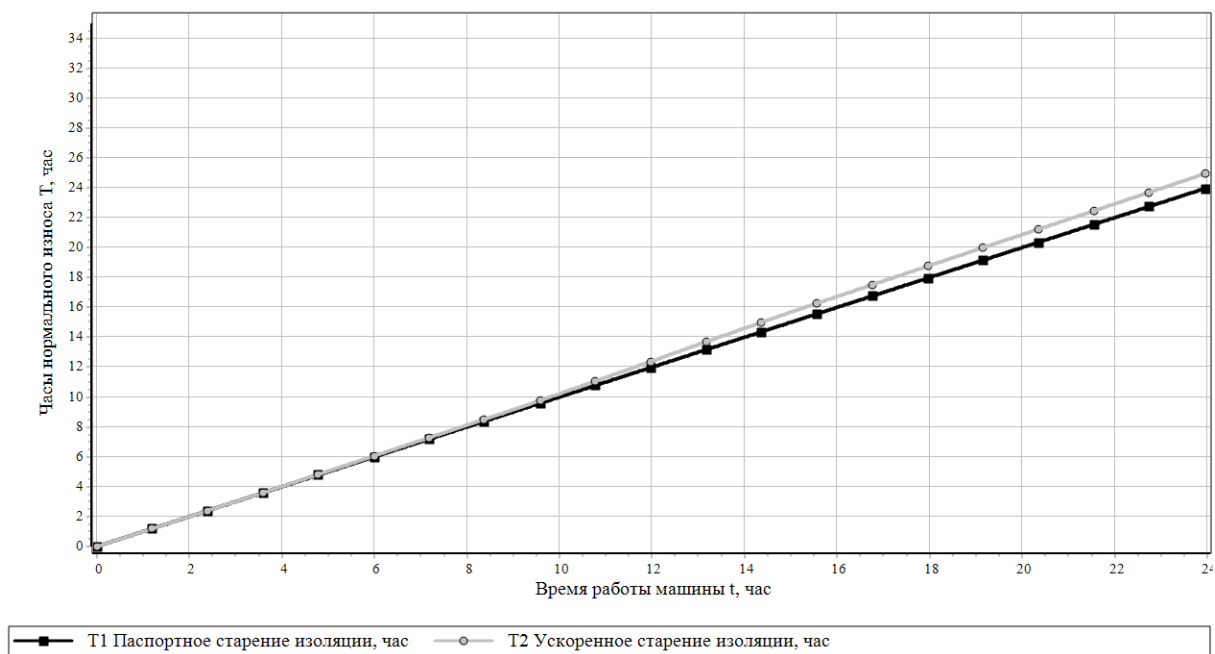


Рис. 6. Результаты моделирования сокращения остаточного ресурса изоляции электрической машины от влияющих факторов в соответствии с суточным графиком

На основе моделирования 24 часов работы насоса питательной воды ПЭ 580-185-3 можно сделать вывод о том, агрегат отработал 25 часов нормального износа, что в перспективе со-

ответствует сокращению на 1000 часов нормального срока службы данного агрегата. Данный математический комплекс поможет спрогнозировать действительное время выхода из

стройка оборудования и своевременно вывести насос в ремонт.

Предложенная методика позволит оценивать скорость износа изоляции электрических машин и прогнозировать остаточный ресурс по изоляции, что особенно актуально при эксплуатации ответственных электродвигателей, например, в системе собственных нужд электростанции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. Губин, М. Д. Влияние качества электроэнергии на скорость износа оборудования / М. Д. Губин, А. В. Стрижиченко // Энергетика будущего: городская научно-практическая конференция, г. Волжский, 21 апреля 2017 г. / тезисы докладов. – Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, 2017. – 41 с.
3. Губин, М. Д. Оценка влияния коэффициента несимметрии напряжений на нагрев асинхронного двигателя / М. Д. Губин, А. В. Стрижиченко // Управление качеством электрической энергии: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. (Москва, 05–07 декабря 2018 г.) – М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2018. – 188 с.
4. Зенина Е. Г., Стрижиченко А. В., Ефимов В. В. Математическая модель оценки технического состояния и прогнозирования аварийных режимов энергетического оборудования электростанций на примере силового трансформатора / The third conference «Problems of thermal physics and power engineering» / Journal of physics: conference series. – 2020. – № 1683. – Р. 1–10.
5. Кузнецов, Н. Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов / Н. Л. Кузнецов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
6. Правила устройства электроустановок ПУЭ. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.
7. Султанов, М. М. Оценка надежности работы электрооборудования при наличии высших гармоник токов и напряжения / М. М. Султанов, Е. Г. Зенина, А. В. Стрижиченко, В. Г. Кульков, О. И. Желяскова // Электротехника. – 021. – № 8. – С. 61–67.
8. Султанов, М. М. Анализ влияния несинусоидальности напряжений в электросетях многоквартирных домов на надежность и эффективность работы трансформаторов / М. М. Султанов, А. В. Стрижиченко, С. А. Янченко // Надежность и безопасность энергетики. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 278–283.
9. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
10. Электромагнитная совместимость потребителей [Текст]: моногр. / И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк и др. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.

УДК 681.513.2

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-2-47-18-30

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]:

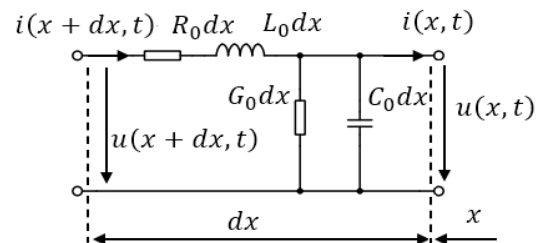


Рис. 1. Схема замещения элементарного участка линии электропередачи:

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:

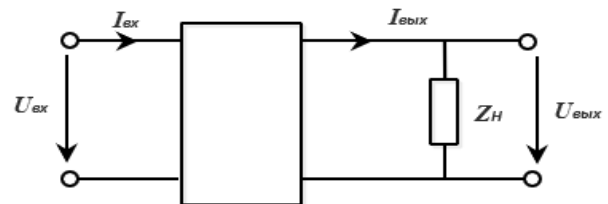


Рис. 2. Эквивалентная цепная схема длинной линии электропередачи

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

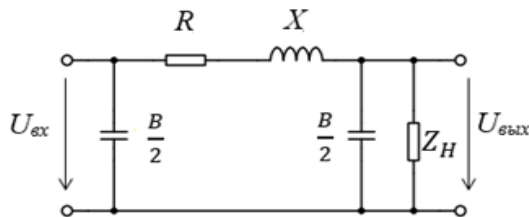


Рис. 3. Упрощенная схема замещения линии электропередачи

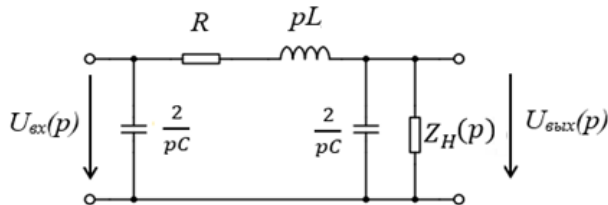


Рис. 4. Операторная схема замещения линии электропередачи

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 $a_0 = 2T^2 Z_H$;

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

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

$$b_2 = CZ_H L;$$

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

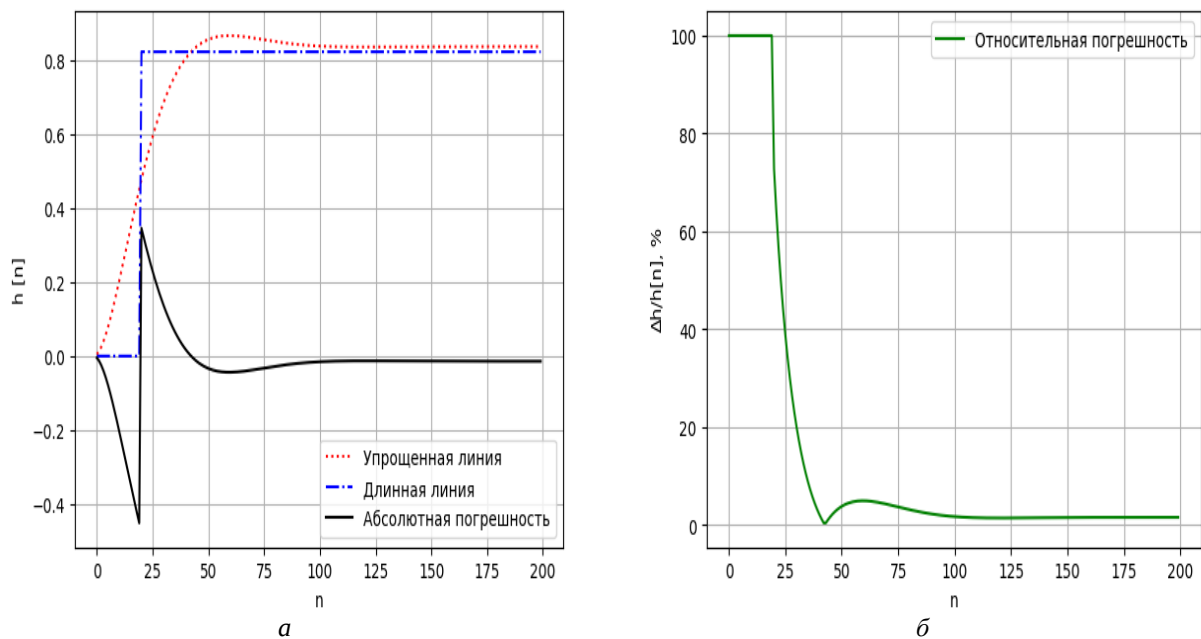
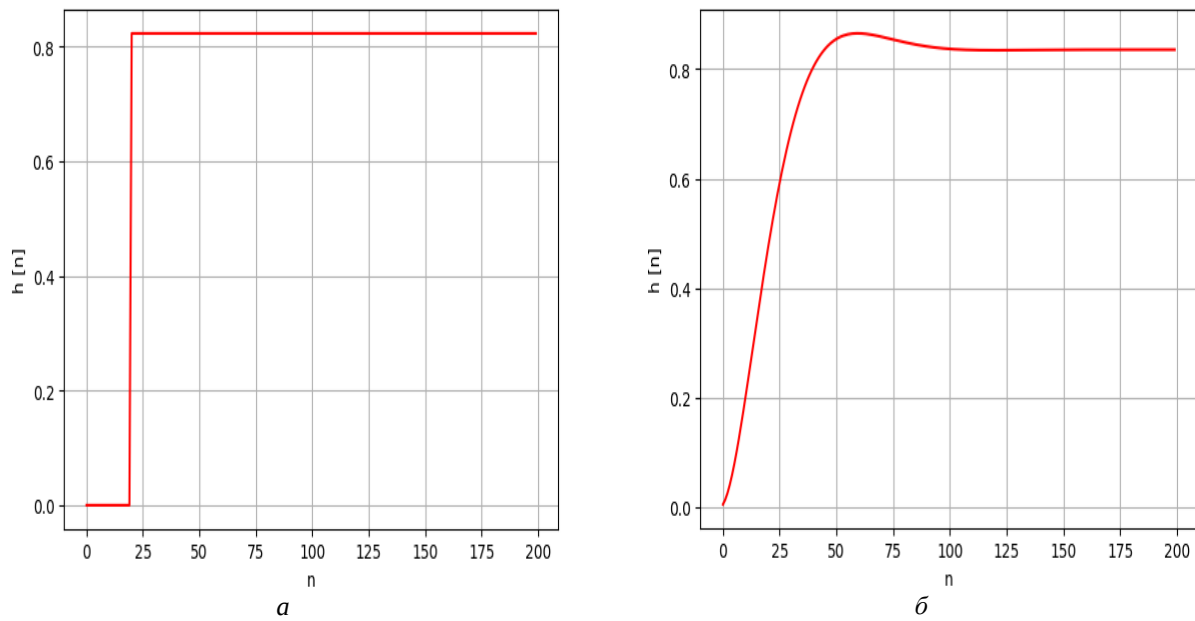
$$Z_H = Z_c(p) = 27712,8129 \text{ Ом.}$$

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.

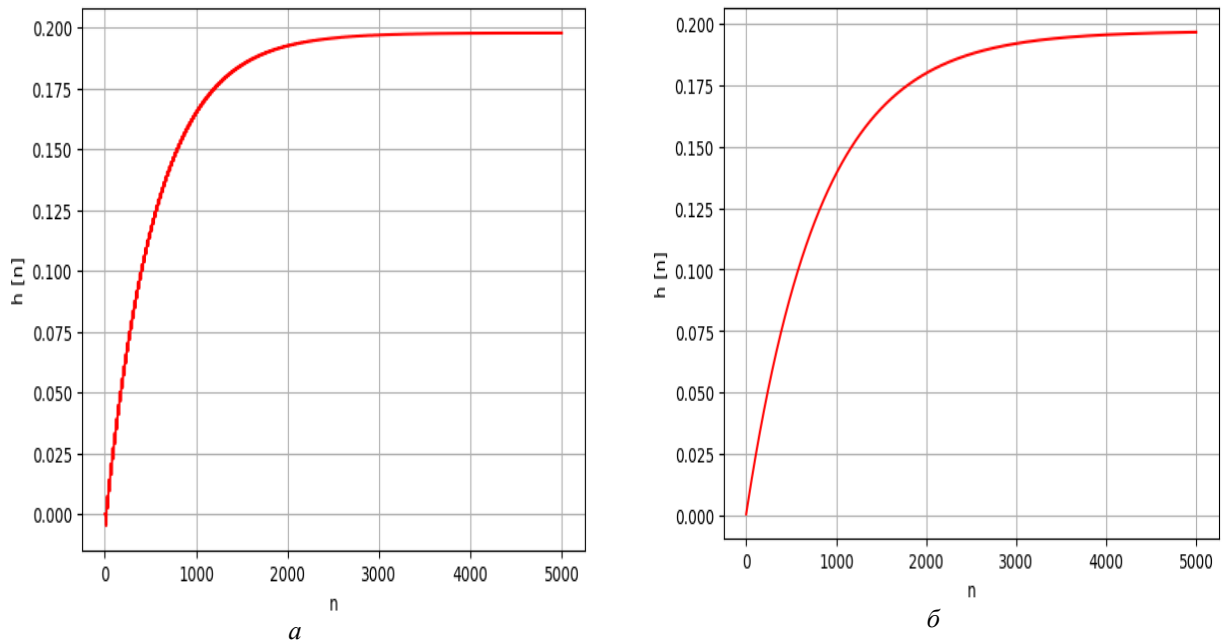


Рис. 7. Переходные характеристики линии электропередачи:

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 $\Delta h = 0,029087660989727607$.

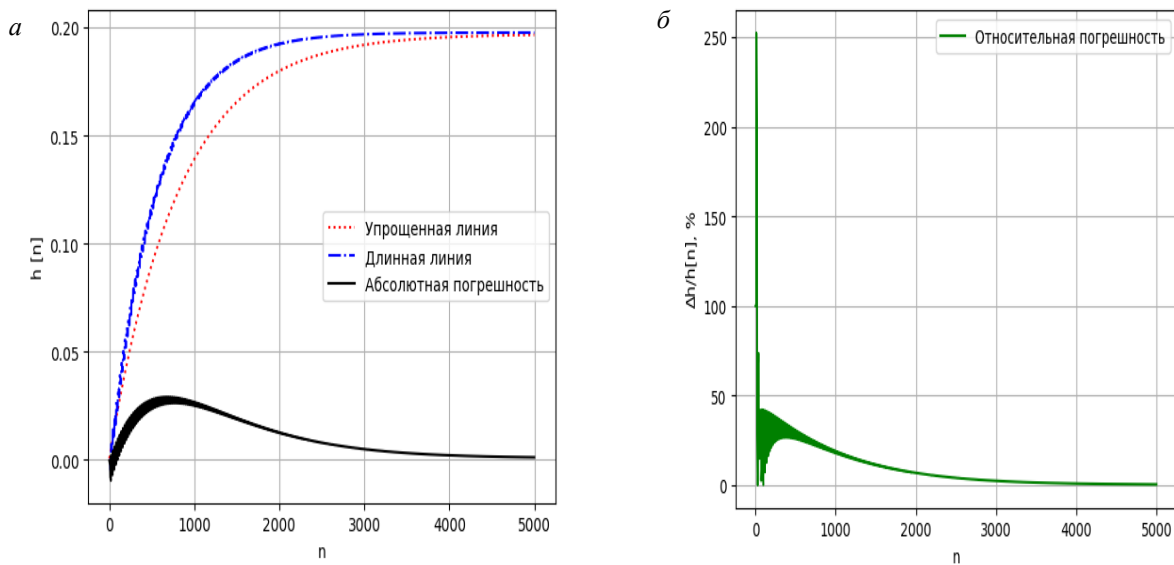


Рис. 8. Графики:
а – абсолютной погрешности; б – относительной погрешности

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

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

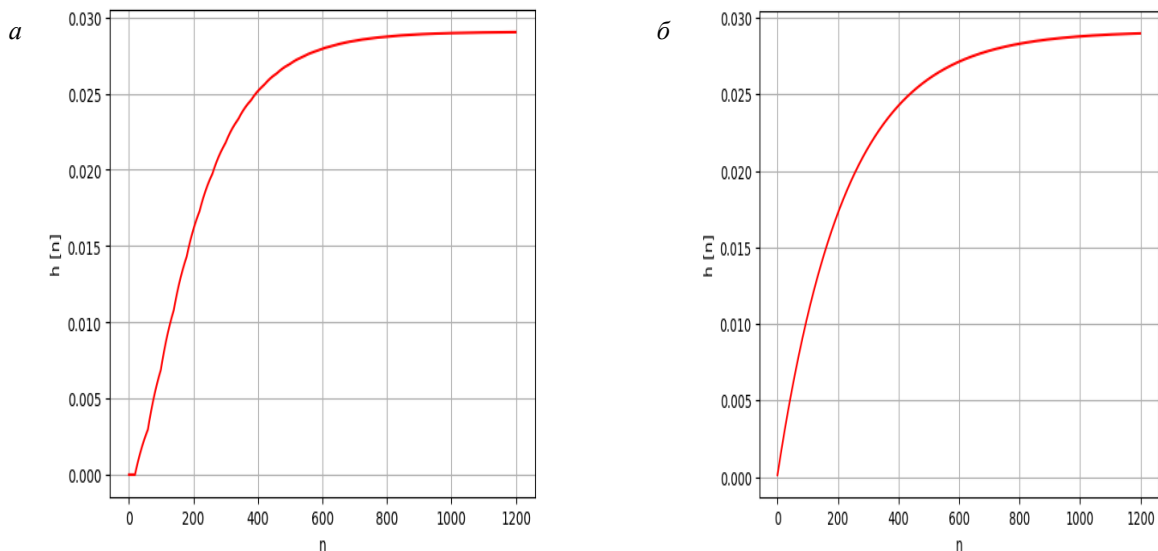


Рис. 9. Переходные характеристики линии электропередачи:
а – с искажениями и несогласованной нагрузкой; б – с использованием упрощенных схем замещения

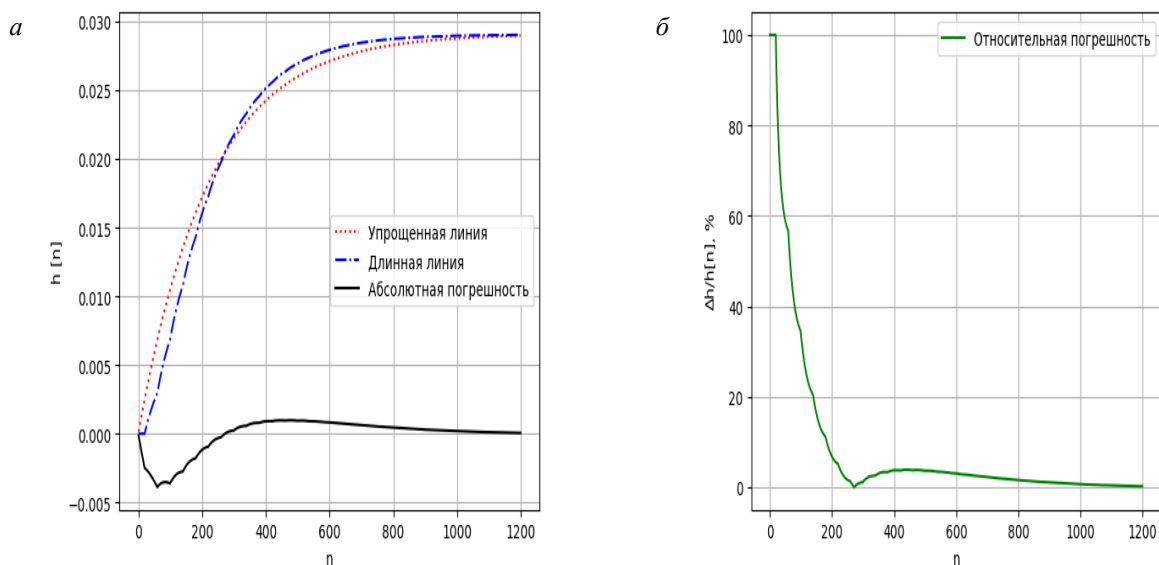


Рис. 10. Графики:
а – абсолютной погрешности; б – относительной погрешности

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

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

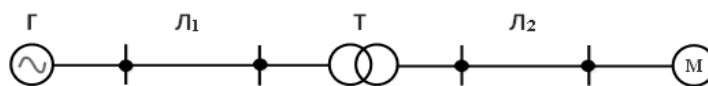


Рис. 11. Принципиальная схема ЭС:
Г – синхронный генератор, Л1, Л2 – линия электропередачи, Т – трансформатор, М – асинхронный двигатель



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.

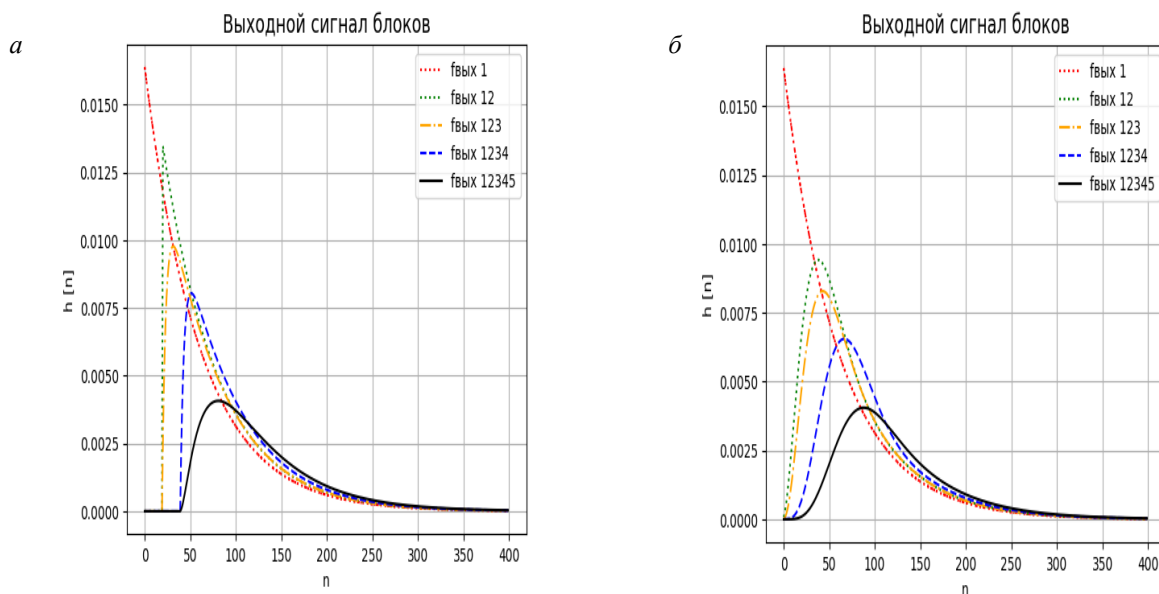


Рис. 13. Переходные характеристики последовательного соединения блоков ЭС:
а – линии без искажений с согласованной нагрузкой; б – линии с использованием упрощенных схем замещения

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

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

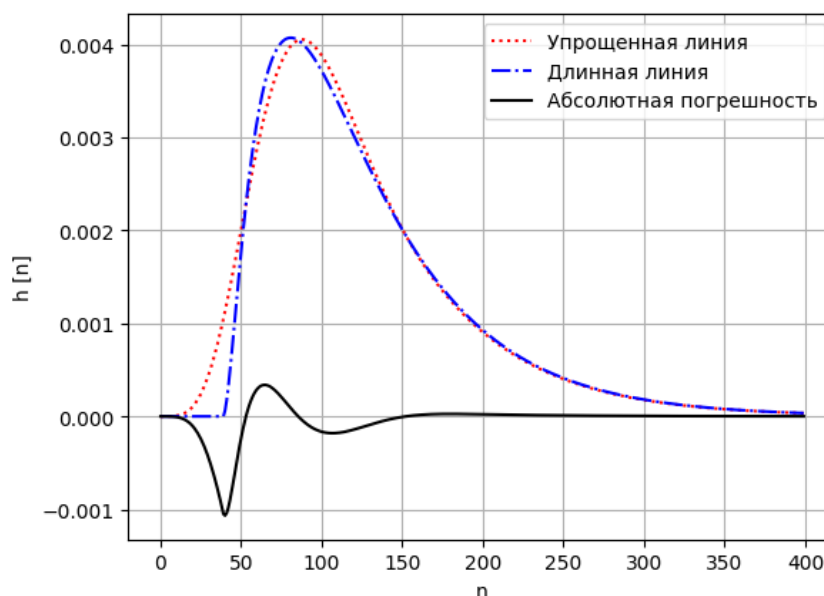


Рис. 14. Графики переходной характеристики выходных сигналов $f_{\text{вых } 12345}$ ЭС и абсолютной погрешности

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

$$\Delta h = 0.01804357418430502.$$

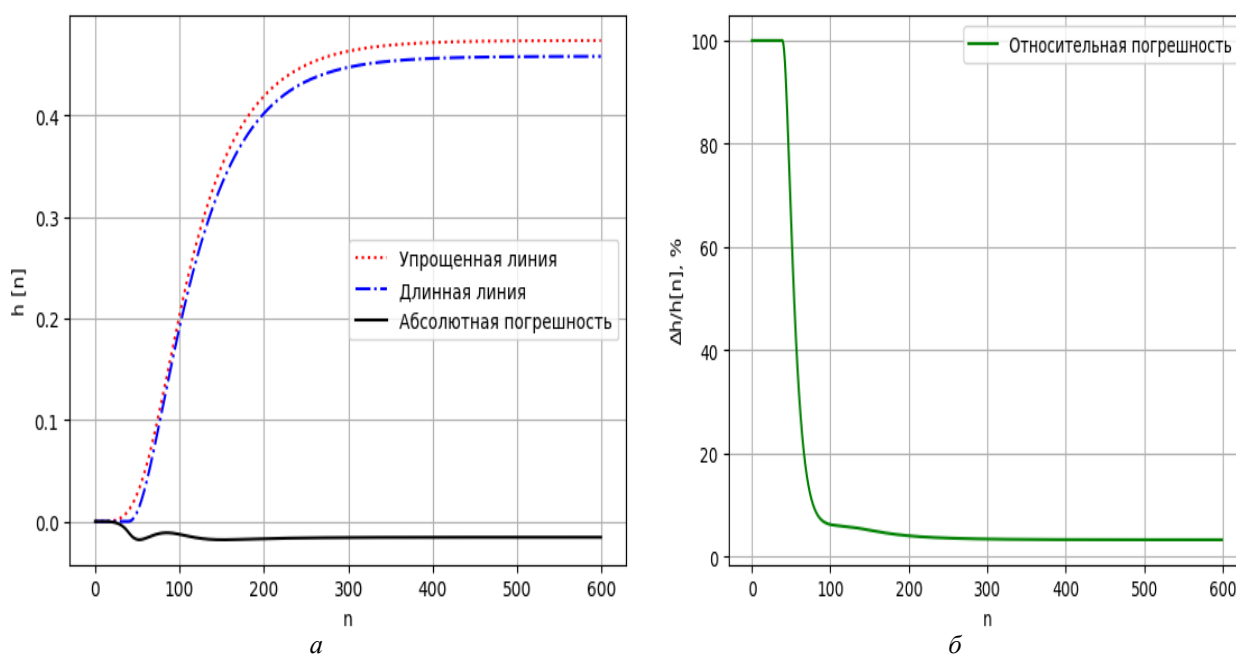


Рис. 15. Графики:
 а – переходных характеристик и абсолютной погрешности; б – относительной погрешности

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:

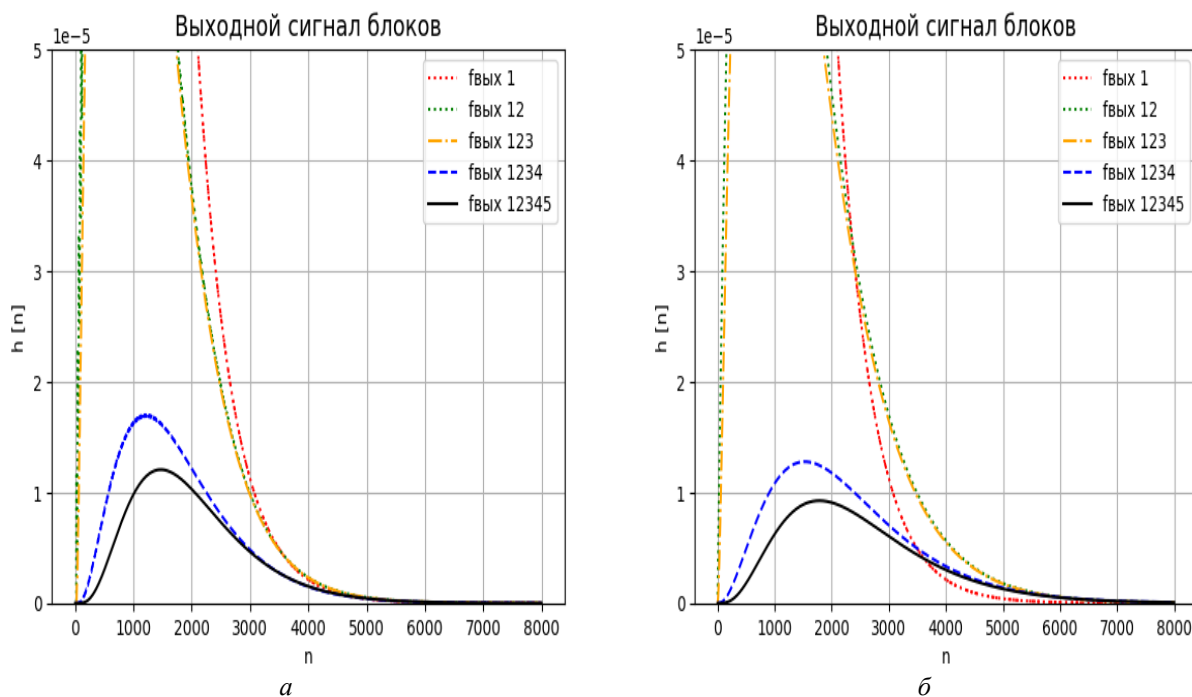


Рис. 16. Переходные характеристики последовательного соединения блоков ЭС:
 а – линии без искажений с несогласованной нагрузкой; б – линии с использованием упрощенных схем замещения

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.

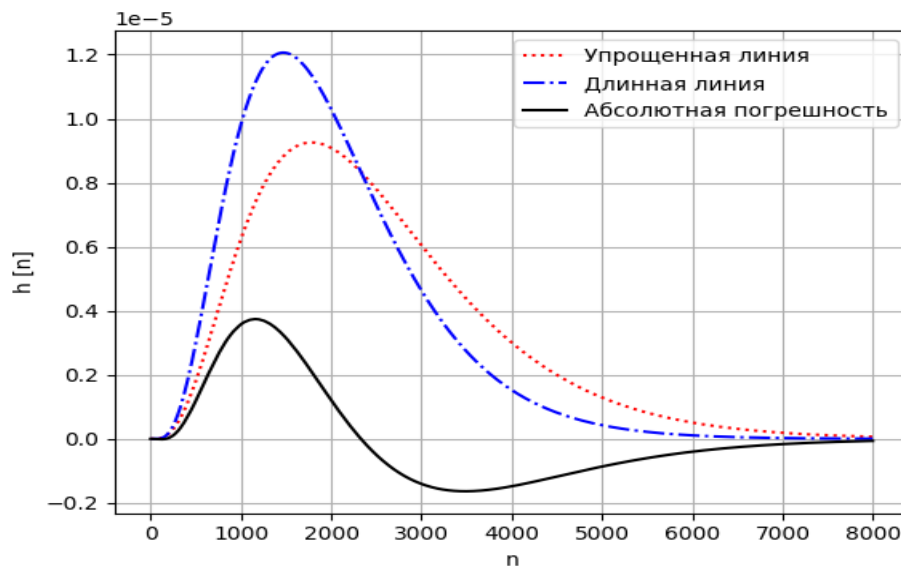


Рис. 17. Графики переходной характеристики выходных сигналов $f_{\text{вых 12345}}$ ЭС и абсолютной погрешности

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

$$\Delta h = 0.00451381622401597.$$

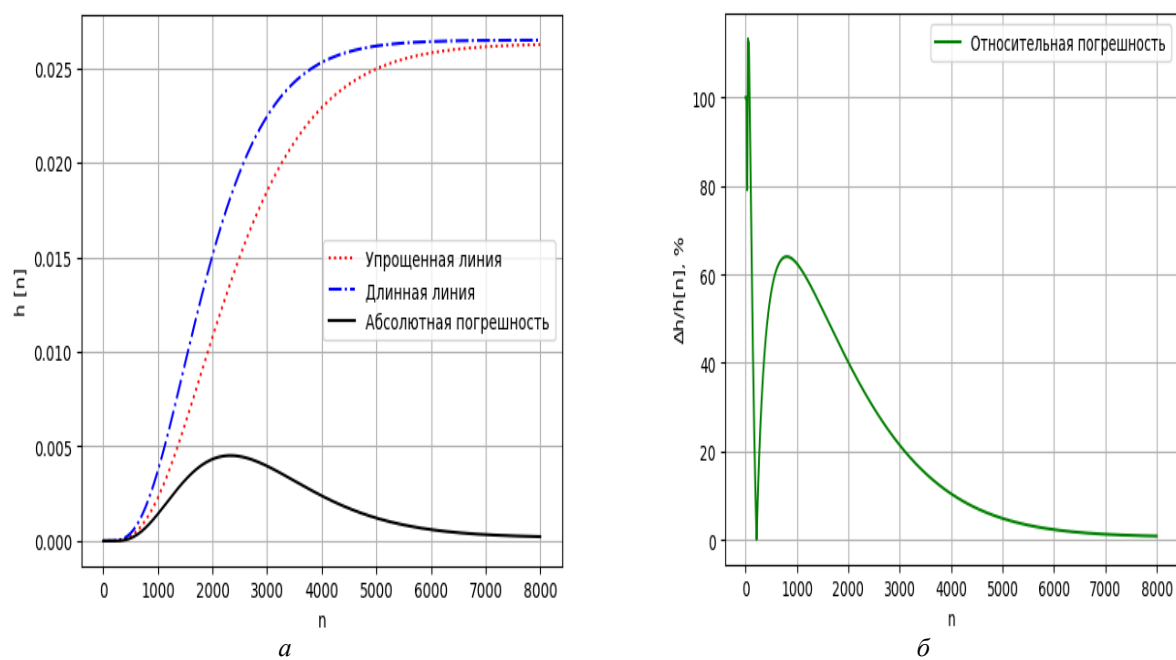


Рис. 18. Графики:
 а – переходных характеристик и абсолютной погрешности; б – относительной погрешности

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:

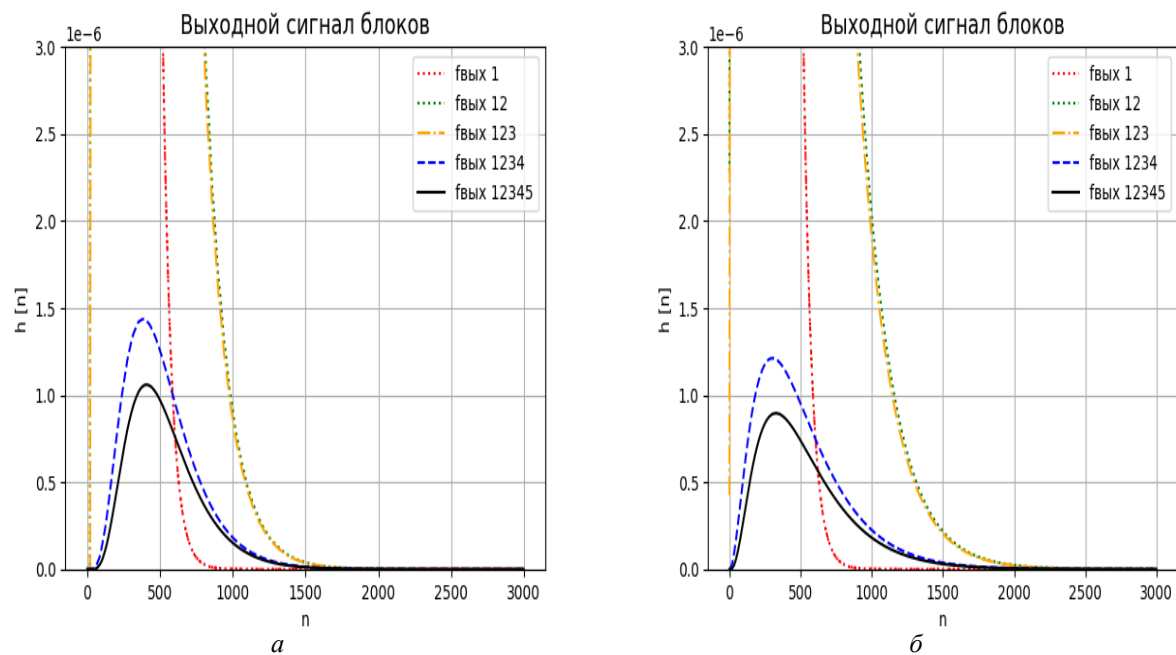


Рис. 19. Переходные характеристики последовательного соединения блоков ЭС:
 а – линии без искажений и несогласованной нагрузкой; б – линии с использованием упрощенных схем замещения

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.

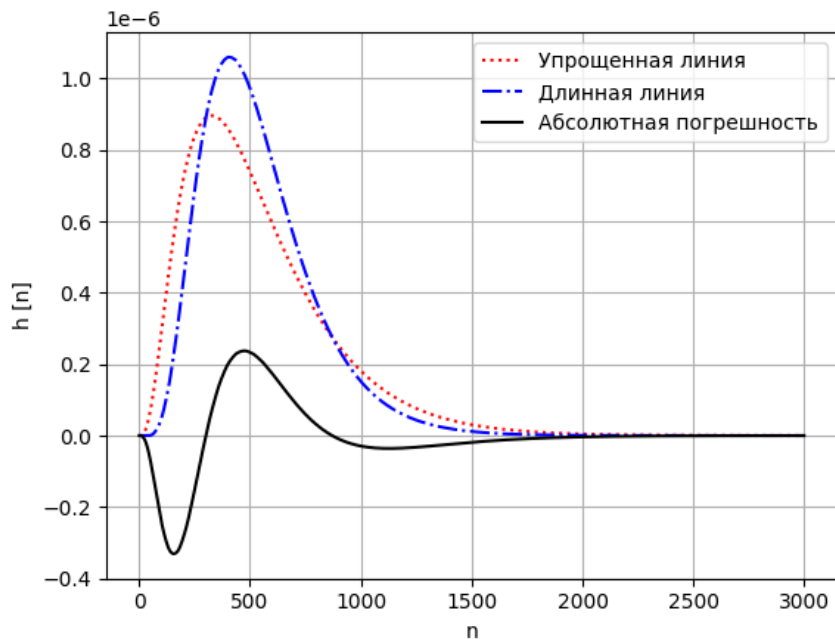


Рис. 20. Графики переходной характеристики выходных сигналов $f_{\text{вых } 12345}$ ЭС и абсолютной погрешности

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

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

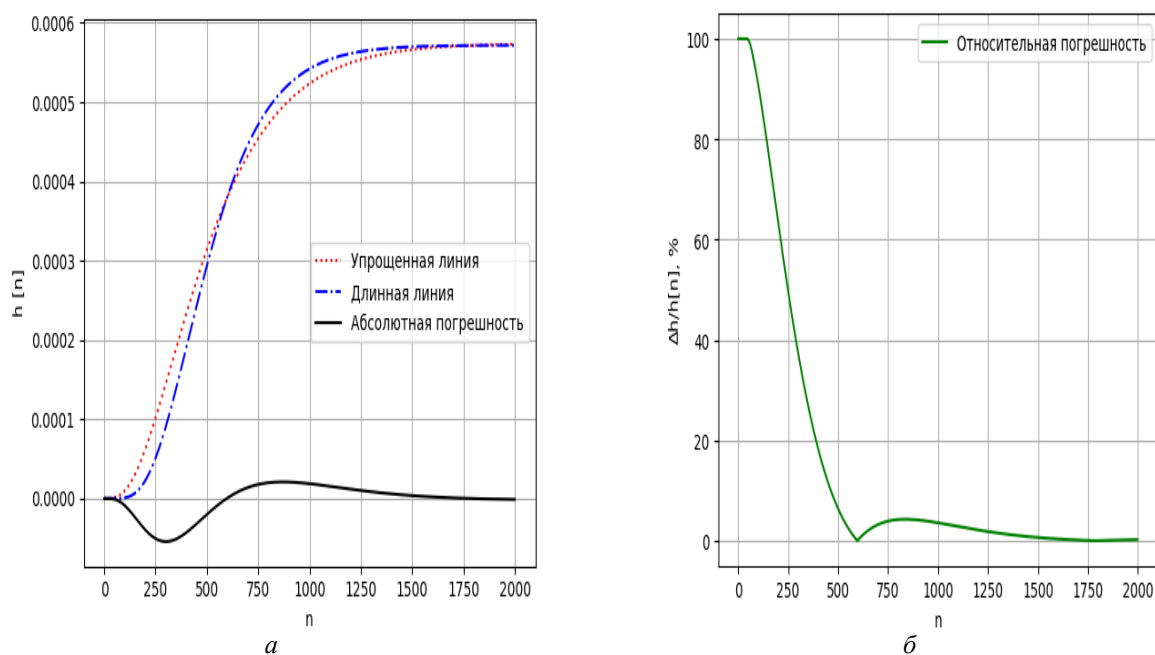


Рис. 21. Графики:

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 электро-энергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / В. А. Веников. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с., пл.

УДК 621.311

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-2-47-31-35

*О. И. Елфимова, П. Д. Кутейников***ВЛИЯНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ВИДОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
НА НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ****Волгоградский государственный технический университет**

olgai-karpenko@yandex.ru, suhanov.pavel@inbox.ru

Автор, ответственный за переписку:

Ольга Ивановна Елфимова, olgai-karpenko@yandex.ru

В настоящее время актуальным является вопрос надежности систем электроснабжения потребителей. В современных электрических сетях наиболее подверженным повреждениям элементом являются линии электропередачи. Повреждение линий электропередачи сильнее всего влияет на бытовых и промышленных потребителей. Поэтому для защиты данных элементов систем электроснабжения принято применять наиболее серьезную защиту. В данной статье рассмотрено повышение надежности электроснабжения различных потребителей при применении дистанционной релейной защиты.

Ключевые слова: надежность электроснабжения, релейная защита и автоматика, дистанционная релейная защита, линии электропередачи

*O. I. Elfimova, P. D. Kuteynikov***INFLUENCE OF THE USE OF REMOTE TYPES OF RELAY PROTECTION
ON THE RELIABILITY OF CONSUMER POWER SUPPLY SYSTEMS****Volgograd State Technical University**

Nowadays, the issue of reliability of power supply systems for consumers is relevant. In modern electrical networks, the most susceptible element to damage is power lines. Damage to power lines has the greatest impact on residential and industrial consumers. Therefore, to protect these elements of power supply systems, it is customary to use the most serious protection. This article discusses increasing the reliability of power supply to various consumers when using distance relay protection.

Keywords: reliability of power supply, relay protection and automation, distance relay protection, power lines

Введение

В наши дни электроэнергетические системы состоят из множества элементов, и среди них линии электропередачи наиболее подвержены повреждениям. Аварии на линиях электропередачи влияют на промышленность сильнее всего, поэтому для защиты данных элементов предпринимаются наиболее серьезные меры в виде применения различных устройств. Их применение зависит от различных факторов, таких как конфигурация сети, класс напряжения линий, режима заземления силовых трансформаторов и др.

Распространенные в наши дни устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) выделяются по сравнению с более старшими аналогами множеством преимуществ, основными среди которых можно назвать multifunctional многоканальные системы, предназначенные для обеспечения взаимосвязи различных систем друг с другом, а также с элементами защищаемой энергосистемы. В связи с этим прослеживается необходимость рассмотрения

надежности и эффективности данных устройств в зависимости от режимов работы энергосистемы.

Устройствам релейной защиты и автоматики предъявляются не только обычные требования по надежности, но и серьезные к чувствительности и селективности.

Нарушения данных требований принято считать отказами функционирования защит. Отказы могут быть следующими [1]:

- а) ложные срабатывания (при отсутствии аварии в зоне защиты);
- б) излишние срабатывания (при аварии вне зоны защиты);
- в) отказ в срабатывании (при аварии на защищаемом объекте).

Для вышеперечисленных видов отказов защиты показатели надежности необходимо рассматривать отдельно. Основными критериями корректного функционирования устройств РЗА являются селективность, чувствительность и надежность. В связи с этим при расчете необходимо учитывать три различных режима работы:

1) В режиме дежурства, который выделен промежутком времени до возникновения сигнала на срабатывание, происходит оценка вероятности ложных срабатываний;

2) В режиме внутренних коротких замыканий, которые возникают внутри защитной зоны, происходит оценка вероятности отказа работы защиты;

3) В режиме внешних коротких замыканий, которые возникают за пределами защитной зоны, происходит оценка вероятности ложных срабатываний.

Перед началом расчетов для каждого из перечисленных режимов строится структурная схема, в которой наглядно показана различная взаимосвязь элементов системы в зависимости от режимов.

Для защиты линий электропередачи используется множество видов релейной защиты, обеспечивающей резервирование, среди которых токовая отсечка (ТО), максимальная токовая защита (МТЗ), дистанционная защита, токовая защита нулевой последовательности.

Токовая отсечка и максимальная токовая защита обычно используются для релейной защиты незамкнутых сетей с тупиковыми линиями либо воздушными линиями, однако если источников питания несколько или система представляет из себя магистраль с несколькими линиями, соединенными последовательно, вышеперечисленные защиты не представляется возможным выполнить селективными.

При питании сети электроснабжения от двух и более источников и номинальном напряжении от 35 кВ принято использовать дистанционную защиту, причем наиболее эффективно ее использование именно в кольцевых схемах, которые широко распространены в настоящее время в нашей стране. Во всех сетях, в которых установлена дистанционная защита, она является основным видом защиты.

Однако дистанционные виды защит являются наиболее сложными устройствами в релейной защите и автоматике, поскольку почти во всех из них используются сложные алгоритмы обработки информации. Они зависят, как минимум, от двух комплексных переменных, например векторов тока и напряжения [2].

Сейчас дистанционные виды защит широко распространены. Причиной является высокая степень чувствительности и селективности их элементов, учитывая также полноценное использование информации об основных параметрах защищаемого участка [2].

Свое название типы дистанционной защиты получили в связи с тем, что они предназначены для мониторинга комплексного сопротивления. Этот параметр пропорционален расстоянию между местом повреждения и местом непосредственной установки защиты.

У дистанционных видов защит есть возможность выбирать уставки срабатывания, количество которых зависит от количества используемых в них реле сопротивления. Как правило, данное количество не менее трех. Дистанционные защиты предназначены для мониторинга определенной области системы электроснабжения, разделенной на зоны. Для каждой зоны определено свое время срабатывания. Данное время срабатывания определяется равным сопротивлению до точки повреждения в защищаемой зоне.

Электромеханические виды дистанционных защит состоят из множества отдельных элементов. Среди них обычные реле, трансформаторы и др. Данные элементы размещаются на отдельной панели. Микропроцессорные варианты дистанционных защит, более распространенные сегодня, занимают меньше места – для них достаточно одного терминала. На данном терминале в непосредственной близости расположены другие виды защит. Их функции дополнены возможностью мониторить срабатывания защит, работу блокировок, записывать осциллограммы аварийных процессов. Возможность размещения дистанционных микропроцессорных защит на одном терминале с другими видами является неоспоримым преимуществом, обеспечивающим большее удобство эксплуатации.

Основные элементы дистанционной защиты показаны на рис. 1 [3].

При наличии повреждений в зоне действия 1 ступени происходит срабатывание реле 1, 2 и 3 ступеней ($KZ1$, $KZ2$ и $KZ3$). Триггерные сигналы передаются на умножающие логические элементы. При этом на остальные входы схемы поступают сигналы на блокировку от перепадов AKB и блокировку от нарушения напряжения цепей KBV .

Элемент блокировки разрыва цепи напряжения KBV предназначен для подачи сигнала о запрете включения защиты в случае разрыва цепи напряжения, поскольку в случае автоматического выключателя или предохранителя существует возможность ложного срабатывания всей защиты, так как в этом режиме снижается напряжение, подаваемое на реле сопротивления.

Блокировка от качаний АКВ предназначена для создания сигнала о запрете срабатывания защиты в случае неустойчивости в энергосистеме.

Элементы логического умножения формируют на выходе сигнал, который направляется на выходное реле KL , которое, в свою очередь, направляет на выключатель, а также на реле времени $KT2$ и $KT3$, команду на срабатывание без выдержки времени.

Рассмотрим теперь факт повреждения в зоне действия второй ступени защиты. В данном случае срабатывают реле второй и третьей ступени. Срабатывание выключателя происходит только после выдержки времени при помощи реле $KT2$ 0,4–0,5 сек.

Третья ступень срабатывает при выходе из строя по тем или иным причинам первой или второй ступени защиты или при выходе из строя защиты соседних присоединений.

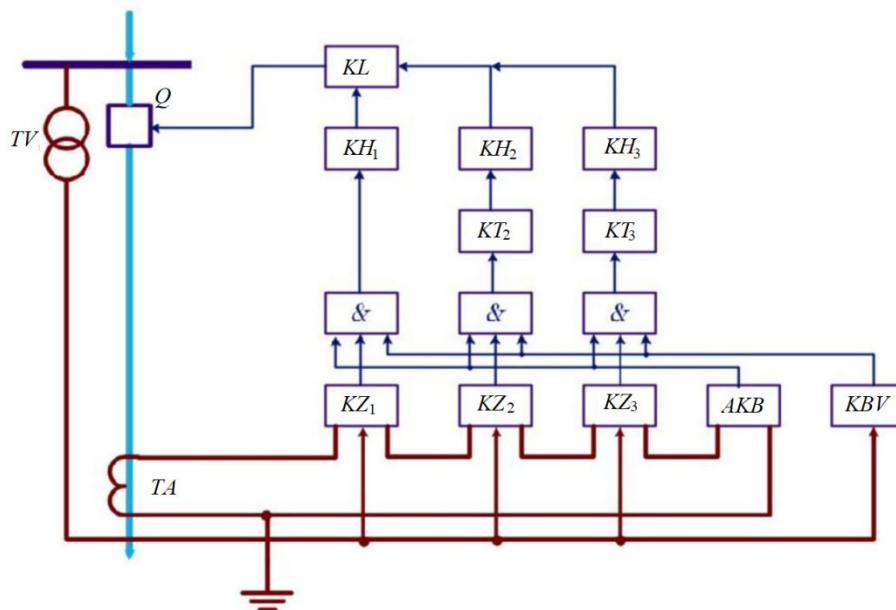


Рис. 1. Структурная схема дистанционной защиты:
 Q – выключатель; TA – трансформатор тока; TV – трансформатор напряжения; KZ – реле сопротивлений;
 KT – реле времени; KH – элемент сигнализации; KL – промежуточное реле защиты;
 AKB – реле блокировки от качаний; KBV – реле блокировки от нарушения цепей напряжения

Корректно рассчитать надежность устройства защиты возможно только при наличии значений показателей надежности элементов, входящих в данные устройства, которые в реальных условиях подвержены более серьезным воздействиям, чем в справочниках. Вот почему в формуле (1) принята эксплуатационная интенсивность отказов [4]:

$$\lambda_3 = \lambda_0 \prod_{i=1}^m K_i, \quad (1)$$

где m – число факторов, от которых зависит безотказная работа элементов; K_i – поправочный коэффициент, учитывающий влияние i -го фактора.

Факторами m могут быть приняты различные внешние условия, такие как коэффициент нагрузки, температура, степень жесткости условий эксплуатации и др.

В качестве примера для рассмотрения порядка расчета надежности релейной защиты принята дистанционная защита ВЛЭП 110 кВ (рис. 1).

1. Рассмотрим режим дежурства. В нем невозможно ложное срабатывание устройств релейной защиты и автоматики из-за отказов основных измерительных приборов (трансформаторов тока и напряжения), проводов, а также срабатывание блокировки от нарушения цепей напряжения. При повреждении названных элементов рабочий ток, протекающий в линиях, слишком мал для активизации защиты. Однако они могут быть вызваны неправильной работой реле защиты от раскачивания (AKB).

Защита будет работать корректно только при условии исправной работы каждого из реле, представленных на рис. 2.

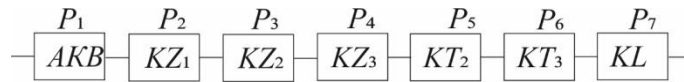


Рис. 2. Структурная схема надежности ДЗ для режима дежурства

В этом режиме дежурства вероятность работы с отсутствием ложных срабатываний рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{л.с.}} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_7 = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad (2)$$

где P_i – вероятность безотказной работы i -го элемента, λ_i – интенсивность отказа i -го элемента (1/год), $t = 1$ год.

$$P_{\text{л.с.}} = 0,997.$$

2. Режим внутренних коротких замыканий
а) Некорректную работу устройства защиты в режиме однофазного короткого замыкания может вызвать такая аварийная ситуация, как обрыв кабельной линии, короткие замыкания вторичных, оперативных цепях и цепях напряжения.

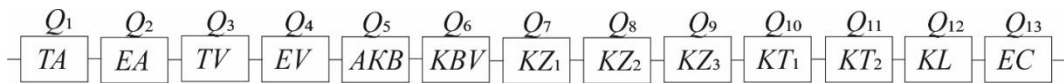


Рис. 3. Структурная схема надежности ДЗ для режима внутреннего однофазного КЗ в защищаемой зоне: ЕА – токовые цепи; EV – цепи напряжения; ЕС – оперативные цепи

Получается, что в отличие от режима ожидания на корректную работу системы защиты влияет уже надежность трансформаторов тока и напряжения, соединительных проводов (рис. 3).

$$P_{\text{л.с.}} = 0,991.$$

Отказ вышеперечисленных реле не обязательно приводит к отказу всей системы. Защита может сработать корректно, если до момента аварии произойдет восстановление отказавшего реле. По этой причине данный режим характеризуется основным расчетным показателем – коэффициентом готовности защиты:

$$k_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i + \sum_{i=1}^n \mu_i}, \quad (3)$$

где λ_i – интенсивность отказов функционирования защиты; μ_i – интенсивность восстановления.

б) Режимы двух- или трехфазного короткого замыкания характеризуются взаимным резервированием пусковых органов защиты, а именно трансформаторов тока и реле сопротивления, на защищаемом участке линии. Структурная схема надежности для данного режима включает в себя два или три параллельных участка (рис. 4 и 5).

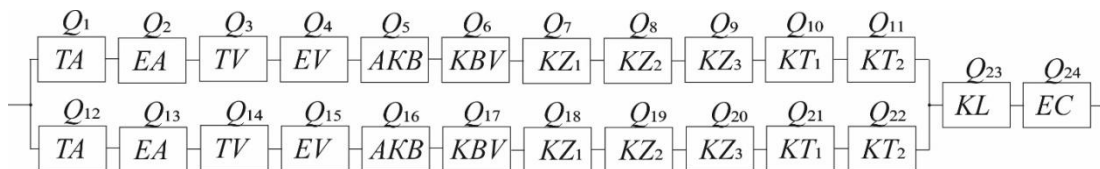


Рис. 4. Структурная схема надежности ДЗ для режима двухфазного КЗ

$$P_{\text{л.с.}} = (1 - q_{1-11} \cdot q_{12-22}) p_{23} \cdot p_{24} \quad (4)$$

$$P_{\text{л.с.}} = 0,984.$$

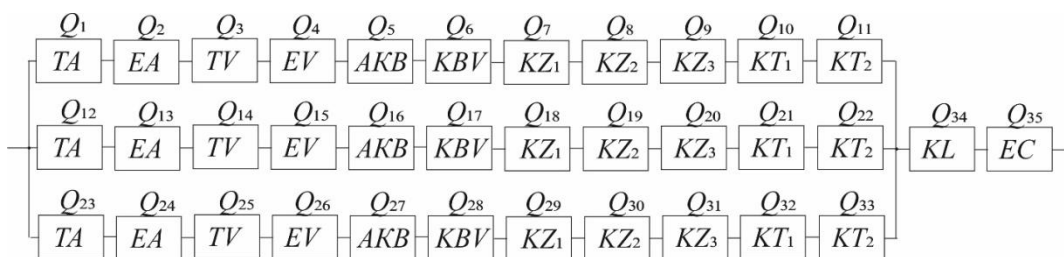


Рис. 5. Структурная схема надежности ДЗ для режима трехфазного КЗ

$$P_{\text{л.с.}} = (1 - q_{1-11} \cdot q_{12-22} \cdot q_{23-33}) p_{34} \cdot p_{35} \quad (5)$$

$$P_{\text{л.с.}} = 0,976.$$

3. Режим внешних коротких замыканий

Для него существует вероятность неселективного срабатывания релейной защиты только при неправильной установке уставки срабатывания на реле времени. Следовательно, модель (схема надежности) для данного режима содержит в себе только один элемент (рис. 6).

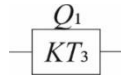


Рис. 6. Структурная схема надежности для режима внешнего КЗ

$$P_{\text{л.с.}} = P_1 = e^{-t\lambda_{\text{КТЗ}}} \quad (6)$$

$$P_{\text{л.с.}} = 0,9995.$$

В приведенном примере расчета заметно, что опасность отказа всей системы электроснабжения потребителей существует только при совпадении аварийного режима работы системы и отказа работы системы релейной защиты и автоматики. При невыполнении данного условия неработоспособность цепей защиты может остаться незамеченной.

Именно эта особенность является главной при определении надежности систем электроснабжения. Устройства релейной защиты и автоматики принято считать «сервисными» по отношению к участку защиты систем электроснабжения. В случае, если предприняты все необходимые меры по обслуживанию устройств релейной защиты, а также сама команда на срабатывание «обслужена» должным образом, вне зависимости от исправности РЗА система электроснабжения не пострадает.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шеметов, А. Н. Надежность электроснабжения: учебное пособие для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» / А. Н. Шеметов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г. И. Носова», 2006. – 141 с.
2. Кузьмин, И. Л. Микропроцессорные устройства релейной защиты: учебное пособие / сост.: И. Л. Кузьмин, И. Ю. Иванов, Ю. В. Писковацкий. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – 310 с.
3. Копьев, В. Н. Релейная защита: учебное пособие / В. Н. Копьев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 160 с.
4. Боровиков, С. М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств: учеб.-метод. пособие / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Н. Троян; под ред. С. М. Боровикова. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.

УДК 004.9

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-2-47-35-40

Д. С. Захаров

РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА РАДИАЦИОННОГО ФОНА НА МЕСТНОСТИ

Волгоградский государственный технический университет

danila.zaharov1@yandex.ru

Потребность людей в тех или иных вещах с каждым годом возрастает. Для того, чтобы данные вещи изготoвить, нужны различные заводы, фабрики и предприятия. В процессе производства товаров накапливаются различные остатки, которые вывозят на полигоны отходов, в том числе и радиоактивные. Актуальной задачей становится мониторинг радиационного фона мест, где расположены полигоны отходов, предприятия и т. д. В основе системы лежит датчик – индикатор-сигнализатор радиоактивности с трубкой J305 и GSM модуля для мониторинга фона в режиме онлайн.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, мощность дозы

D. S. Zakharov

DEVELOPMENT OF A DISTRIBUTED INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM FOR MONITORING THE RADIATION BACKGROUND ON THE GROUND

Volgograd State Technical University

Nowadays, people's need for certain things is increasing every year. In order to make these things, various factories, factories and enterprises are needed. In the process of manufacturing these goods, various wastes remain, which are exported to landfills, including radioactive ones. Monitoring of the radiation background of places where waste landfills, enterprises, etc. are located becomes an urgent task. The system is based on a sensor indicator, a radioactivity detector with a J305 handset and a GSM module for online background monitoring.

Keywords: ionizing radiation, dose rate

Радиоактивный вред, наносимый предприятиями, относится к негативным последствиям, связанными с выбросами радиоактивных веществ или работой с радиоактивными материалами на предприятиях. Это может происходить в различных отраслях, включая ядерную энергетику, горнодобывающую промышленность, медицину, исследования и другие.

Одним из основных рисков является загрязнение окружающей среды и водных ресурсов. Радиоактивные выбросы могут попадать в атмосферу, почву и воду, что приводит к загрязнению и угрозе здоровья людей и животных.

Несмотря на все предосторожности, радиоактивный вред от предприятий может быть сложно контролируемым и иметь долгосрочные последствия. Поэтому важно принимать меры для контроля радиационного фона.

Известен способ мониторинга химически опасных объектов (Патент РФ 2458350 G01N 35/00). Определение параметров облака выброса достигается путем решения обратной задачи распространения примеси в атмосфере с учетом граничных условий, которые определяются с использованием датчиков, расположенных по периметру объекта у поверхности земли и на фиксированной высоте над поверхностью. При аварийном выбросе определяют координаты первых трех сработавших датчиков, время срабатывания, интервалы, в течение которых датчики показывали превышение допустимой концентрации. Полученные данные представляют как мгновенные концентрации токсичного химиката в отдельных точках динамически изменяющегося непрерывного поля концентраций

облака аварийного выброса. На основе этого представления определяют необходимые для прогнозирования заражения приземного слоя атмосферы исходные данные, включая массу выброшенного химиката, начальные координаты центра облака выброса. При этом количество датчиков больше восьми, высота датчиков над поверхностью земли не менее двух метров. Предложенный способ позволяет повысить достоверность прогноза динамики химического заражения приземного слоя воздуха на начальном этапе развития аварии на стационарных химически опасных объектах. Предлагаемый способ не позволит оценить параметры аварии нестационарных источников.

Для обнаружения радиоактивности используется готовая плата индикатора-сигнализатора. Она работает от напряжения 4–6 В и поддерживает счетчики J305, M4011, STS-5, SMB20. Рабочее напряжение – 330–600 В. Прибор предупреждает о повышении уровня радиации звуковым и световым сигналами при прохождении через датчик Гейгера. Трубка J305 используется в этой системе.

Трубку составляет корпусная цилиндрическая структура, оксид олова на катоде. Рабочее напряжение варьируется от 330 до 600 Вольт, ток от 15 до 0,02 миллиампера. Диапазон температур от –40 до +55 градусов Цельсия, длина трубки 102 мм, диаметр 10 мм. Чувствительность к гамма-излучению – 0,1 МэВ, собственный фон – 0,2 импульса в секунду. Может использоваться для измерения гамма-излучения от 10 до 120 микроРентген в час и бета-излучения от 100 до 1800 изменений индекса в минуту.



Рис. 1. Простой индикатор-сигнализатор радиоактивности с трубкой J305

На рис. 1 показан простейший индикатор-сигнализатор радиоактивности, где:

- 1 – трубка J305;
- 2, 4 – микросхемы 555;
- 3 – LM358P, двухканальный операционный усилитель;
- 5 – переключатель J1 – отключает бужер для отключения индикации;
- 6 – переключатель J4 – калибровочная переключатель;
- 7 – контакты 5 V, INT, GND, первый и последний из которых – для подключения питания 4–6 В. Контакт INT – сигнальный, используется для подключения к MCU, к разъему, настроенному на получение внешних прерываний, и, соответственно, с последующей обработкой полученных импульсов;
- 8 – разъем 3,5 мм AudioJack. Для подключения к дозиметру смартфона, для снятия показаний;
- 9 – бужер, издает щелчок при регистрации импульса;
- 10 – сдвижной выключатель, проще говоря, ВКЛ/ВЫКЛ;
- 11 – DC-разъем питания 5 В (5,5x2,5 мм);
- 12 – контактная колодка для подключения питания 5 В к модулю;
- 13 – светодиод, горит постоянно, если на модуль подается питание;
- 14 – светодиод, кратко мигает при регистрации импульса;
- 15 – NPN-транзисторы S8050;
- 16 – калибровочный потенциометр;
- 17 – калибровочный контакт J2;
- 18 – дополнительные контакты под зажим (если планируется установить СБМ20).

Важно следить за индикаторами радиационного фона для обеспечения безопасности. Если количество пиков или вспышек превышает 25 в минуту, значит место или предмет заражены. Постоянная индикация сигнализирует о критическом уровне радиации. Счетчик Гейгера имеет специальную схему для стабильного поддержания выходного напряжения.

Этот счетчик Гейгера получает напряжение 400 В через токоограничительный резистор, который сохраняет стабильное выходное напряжение даже при изменении напряжения питания. Поэтому возможно использовать этот прибор с любым источником питания от 5 до 13 В – блок питания от зарядного устройства или аккумуляторные батареи. Благодаря этому чувствительность к измерению фона радиации оста-

ется неизменной, что очень важно при работе в полевых условиях.

В состоянии покоя сопротивление счетчика Гейгера стремится к бесконечности, но когда заряженная частица проходит через резистор, происходит его короткое замыкание, и сопротивление становится низким. Резистор служит нагрузкой для счетчика Гейгера. Напряжение на резисторе в покое находится на низком уровне, почти на нуле. Однако когда заряженная частица пролетает через трубку, напряжение резко возрастает, причем его рост ограничивается диодом, который не позволяет ему превысить напряжение питания, а также происходит прямое падение на этом диоде.

Важно учитывать, что импульсы, регистрируемые счетчиком Гейгера, имеют крайне малую длительность. Если подавать их непосредственно на звукоизлучатель, то звуковые сигналы будут также очень короткими, напоминающими одиночные щелчки. Не все из них будут достаточно заметны для человеческого слуха. Мигание светодиода в этом случае вообще будет практически незаметным. Для более эффективного восприятия информации человеческими органами чувств необходимо увеличить продолжительность импульса, растянув его до оптимального размера. Для этой цели используется микросхема типа LM358P, на которой размещены два односторонних вибратора.

В качестве передатчика выступает модуль GSM, GPRS на чипе SIM800L – это миниатюрный GSM-модем, который можно использовать в различных проектах, таких как охрана дачи или дома, сигнализация в машине и многое другое. Данный модуль (рис. 2) по функционалу ничем не уступает обычному сотовому телефону, и с его помощью можно отправлять SMS-сообщения, совершать или принимать телефонные звонки, подключаться к Интернету через GPRS, TCP / IP и многое другое. А также модуль поддерживает четырехдиапазонную сеть GSM / GPRS.



Рис. 2. GSM-модуль на чипе SIM800L

Для обработки данных, полученных с дозиметра, служит плата Arduino UNO CH340G.

Измерительный комплекс позволяет измерять фон ИИ и передавать показания по GSM-сети.

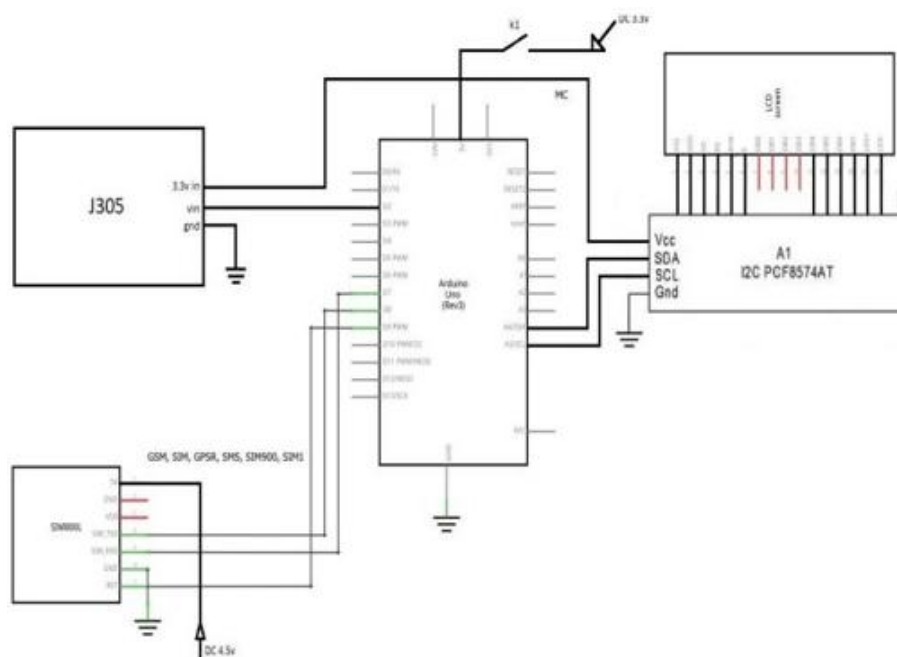


Рис. 3. Принципиальная схема датчика

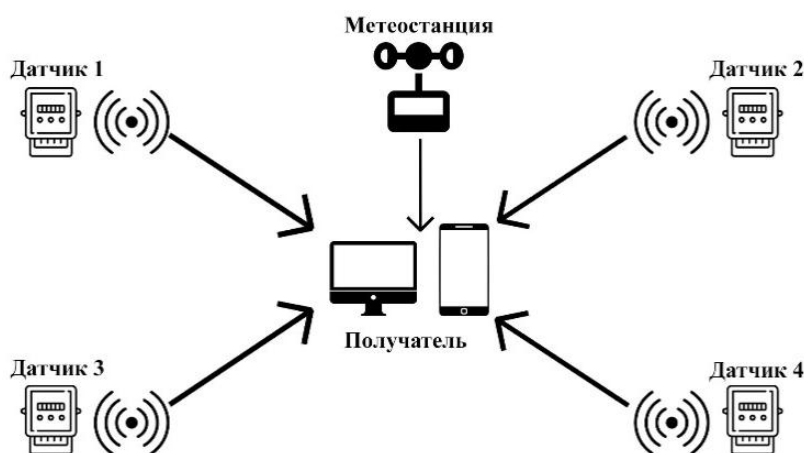


Рис. 4. Принцип работы системы

Принцип работы данной системы (рис. 4) состоит в следующем: по периметру предприятия устанавливаются датчики (дозиметры) с подключенными сим-картами для передачи данных. При определенном времени данные с датчика пересылаются на сервер. В это же время происходит сбор информации с метеостанции о влажности, скорости и направлении ветра, температуре и т. д. При сборе всех данных на сервере видно состояние датчиков, мощность излучения и наличие опасных зон для пребывания на них людей. В случае аварии

поступает уведомление о повышении уровня ионизирующего излучения и направлении радиоактивного облака.

В данном случае установлено четыре датчика по разные стороны и одна метеостанция на высотном здании. После отправки данных с датчиков и метеостанции на сервер возможно посмотреть их показатели в любой точке с персонального компьютера или смартфона.

Для этого необходимо перейти на сайт и выбрать объект.



Рис. 5. Карта объектов России

На карте показаны объекты где необходим радиационный мониторинг. Выбираем пред-

приятие ЕвроХим и переходим на вкладку с данными.

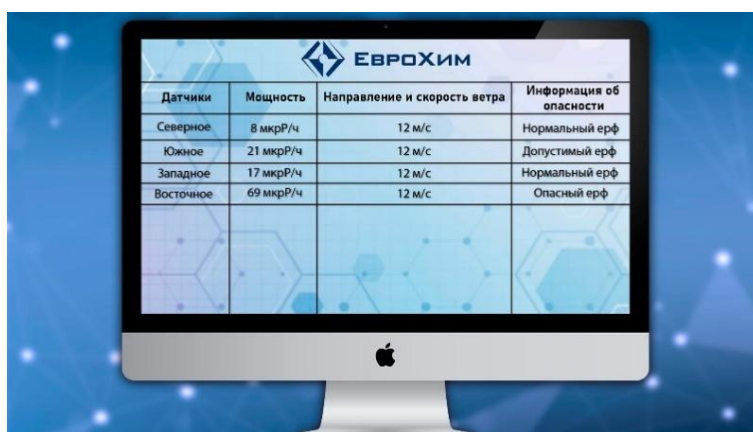


Рис. 6. Данные с датчиков предприятия Еврохим

Погрешность прогноза загрязнения окружающей среды в результате аварийных радиоактивных выбросов в атмосферу складывается из погрешности модели переноса примесей и погрешностей исходных данных.

В задачах прогноза распространения радиоактивных примесей в атмосфере широкое распространение получила гауссова модель рассеяния общего вида:

$$D(x, y, z) = \frac{QK}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}\sigma_x(x)\sigma_y(x)\sigma_z(x)} \exp\left(-\frac{(x-x_u-ut)^2}{2\sigma_x(x)^2} - \frac{(y-y_u)^2}{2\sigma_y(x)^2}\right) \times \left(\exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z(x)^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z(x)^2}\right)\right), \quad (1)$$

где D – мощность дозы (МД) в точке пространства (x, y, z) , Зв/ч; K – коэффициент перехода от активности к МД в заданных единицах измерения; x, y – координаты точки на местности, м; x_u, y_u – координаты аварийного источника, м; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – дисперсии распределения примеси в облаке, м; u – скорость среднего ветра, м/с; Q – активность источника, Бк; H – высота источника, м.

Кратность ослабления гамма-излучения с высотой h аппроксимируется экспоненциальной зависимостью:

$$K(h) = \exp(ah^{0.8}). \quad (2)$$

Исследования показали, что точки неравномерно разбросаны по территории и находятся на большом расстоянии друг от друга. Это дает основание предполагать, что передача сигнала измерений через GSM-сеть будет эффективной.

Для обоснования данного выбора была разработана карта покрытия GSM-сети с отмеченными точками, требующими непрерывного мониторинга. Учитывая, что большинство точек охватывается GSM-сетью, можно считать ее использование разумным в процессе определения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шилин, А. А. Анализ влияния электромагнитных помех от высоковольтной линии электропередачи на каналы передачи информации GSM/GPRS / А. А. Шилин, Ф. С. Ле // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 18 (145) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки» ; вып. 6). – С. 72–76.

2. Бабков, В. Ю. Сотовые системы мобильной радиосвязи: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи квалификации (степени) "бакалавр" и квалификации (степени) "магистр"» / В. Ю. Бабков, И. А. Цикин. – 2-е изд., [перераб. и доп.]. – СанктПетербург : БХВ-Петербург, 2013. – 432 с.

3. Синоптические карты с фронтальным анализом // Гидрометцентр России : офиц. сайт. – 2022. Режим доступа: <https://meteoinfo.ru/mapsynop>

4. Трамперт, В. AVR-RISC микроконтроллеры : пер. с нем. / В. Трамперт. – Киев : МК-Пресс, 2006. – 464 с.

5. Хала, И. Радиоактивность, ионизирующее излучение и ядерная энергетика / И. Хала, Д. Д. Навратил ; пер. с англ. под ред. Б. Ф. Мясоедова, С. Н. Калмыкова. – Москва : ЛКИ, 2013. – 432 с.

УДК 621.43.047

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-2-47-40-45

А. И. Нефедьев¹, Г. И. Шаронов², В. Г. Шаронова²

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТРАНЗИСТОРНЫХ И КОНДЕНСАТОРНО-ТИРИСТОРНЫХ МОДУЛЕЙ ЗАЖИГАНИЯ ПРИ РАБОТЕ С ГАЗОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

¹Волгоградский государственный технический университет

²Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

nefediev@rambler.ru

Автор, ответственный за переписку: Алексей Иванович Нефедьев, nefediev@rambler.ru

Статья посвящена сравнительным испытаниям транзисторных и конденсаторно-тиристорных модулей зажигания при работе с газовым двигателем под управлением микропроцессорной системы управления М20. Приведены обобщенные структурные схемы транзисторного и конденсаторно-тиристорного модулей зажигания. Проведено исследование токовременных параметров первичной и вторичной цепей катушки зажигания и их влияния на показатели работы ДВС. Показано, что лучшие параметры искрового разряда достигаются при использовании конденсаторно-тиристорных модулей зажигания в качестве окончательного каскада микропроцессорной системы управления двигателем.

Ключевые слова: искровой разряд, конденсаторно-тиристорный модуль зажигания, транзисторный модуль зажигания, катушка зажигания

A. I. Nefed'ev¹, G. I. Sharonov², V. G. Sharonova²

COMPARATIVE TESTS OF TRANSISTOR AND CAPACITOR-THYRISTOR IGNITION MODULES WHEN OPERATING WITH A GAS ENGINE

¹Volgograd State Technical University

²Penza State University of Architecture and Construction

This article is devoted to comparative tests of transistor and capacitor-thyristor ignition modules when working with a gas engine under the control of the M20 microprocessor control system. Generalized block diagrams of transistor and capacitor-thyristor ignition modules are presented. A study was carried out of the current parameters of the primary and secondary circuits of the ignition coil and their influence on the performance of the internal combustion engine. It has been shown that the best spark discharge parameters are achieved when using capacitor-thyristor ignition modules as the final stage of a microprocessor engine control system.

Keywords: spark discharge, capacitor-thyristor ignition module, transistoric ignition module, ignition coil

Введение

В настоящее время увеличивается количество автомобилей с двигателями внутреннего

сгорания (ДВС), работающих на метане. Наряду с достоинствами такого топлива имеется и существенный недостаток – большой уровень

выбросов несгоревших углеводородов (СН) из-за невысокой скорости горения метановоздушной смеси. Вторым недостатком ДВС, работающего на метане, является высокое давление в цилиндрах. Для обеспечения бесперебойного искрообразования необходима система зажигания, обеспечивающая искровой разряд повышенной мощности и пробой межэлектродного искрового промежутка 0,6–0,7 мм в свече зажигания. Классическая транзисторная система зажигания обеспечивает бесперебойное искрообразование только при искровом промежутке в свече зажигания не более 0,3 мм, при этом

мощность искрового разряда является недостаточной для полного сгорания метановоздушной смеси. Для замены транзисторной системы зажигания были разработаны конденсаторно-тиристорные модули зажигания, обладающие высокой мощностью и длительностью искрового разряда [1, 2].

Модули зажигания

Структурные схемы транзисторного модуля зажигания (ТрМЗ) и конденсаторно-тиристорного модуля зажигания (КТМЗ) приведены на рис. 1 и 2 соответственно [3–7].

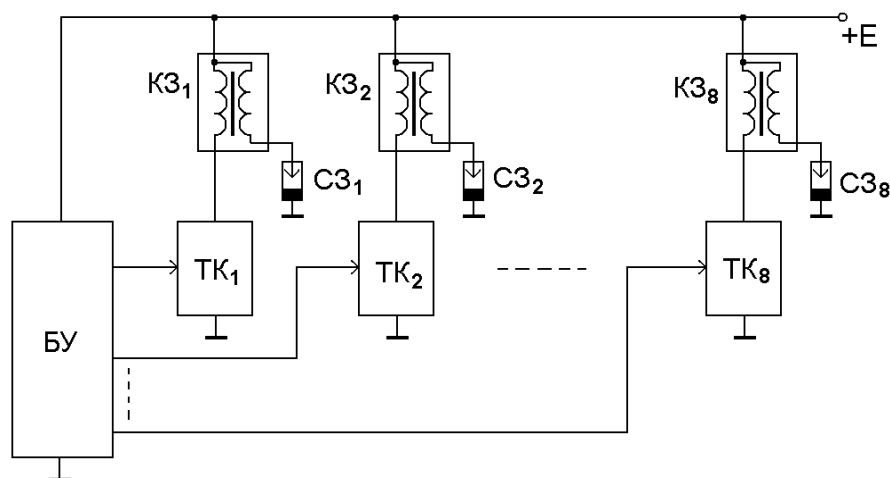


Рис. 1. Транзисторный модуль зажигания (ТрМЗ):

БУ – блок управления, ТК – транзисторный коммутатор, КЗ – катушка зажигания, СЗ – свеча зажигания, Г – генератор постоянного напряжения, К – тиристорный коммутатор

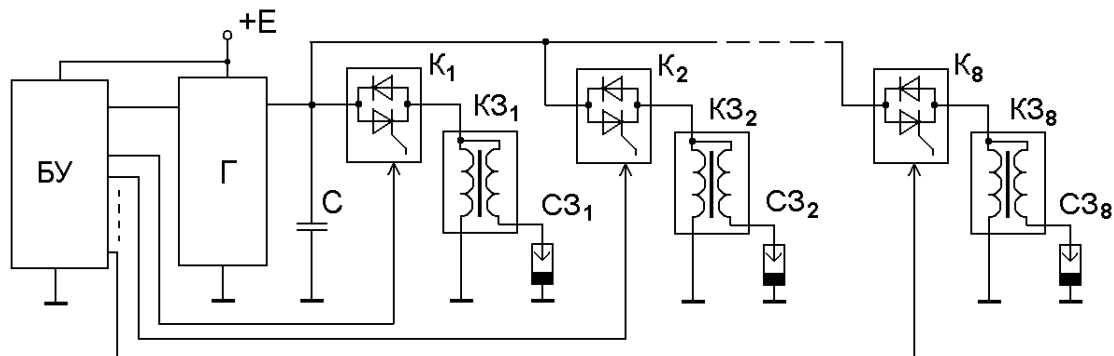


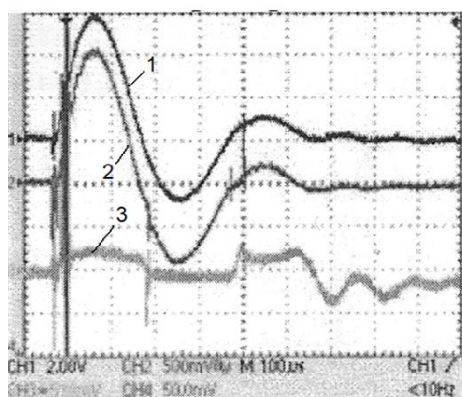
Рис. 2. Конденсаторно-тиристорный модуль зажигания (КТМЗ)

Моторные испытания

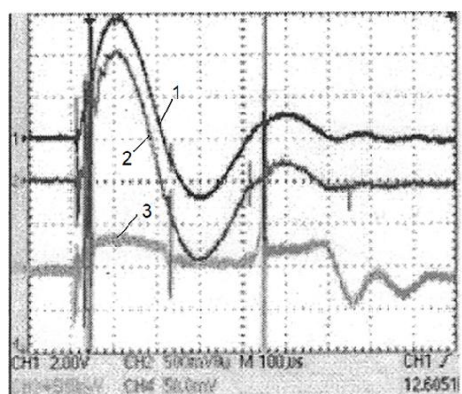
График тока первичной цепи катушки зажигания, а также графики тока и напряжения вторичной цепи, формируемые оконечными каскадами микропроцессорной системы управления двигателем (МСУД) на базе КТМЗ и ТрМЗ, показаны на рис. 3 и 4.

На рис. 3 приведены графики токов первичной (1) и вторичной (2) обмоток индивидуаль-

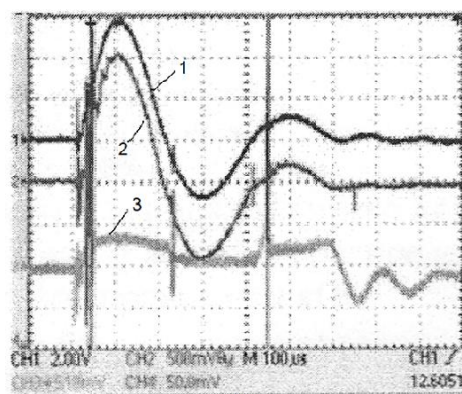
ной катушки зажигания типа 27.3705 и напряжения на свече зажигания (3) при работе с газовым двигателем КамАЗ под управлением МСУД «М20» с модулем зажигания КТМЗ в качестве оконечного каскада при частотах вращения коленчатого вала (n), равных 800 об/мин на холостом ходу (рис. 3, а), 1500 об/мин при нагрузке 10 % (рис. 3, б) и 100 % (рис. 3, в), и 2200 об/мин при нагрузке 10 % (рис. 3, г) и 100 % (рис. 3, д).



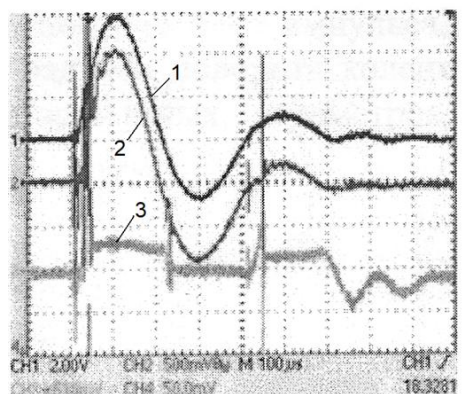
а



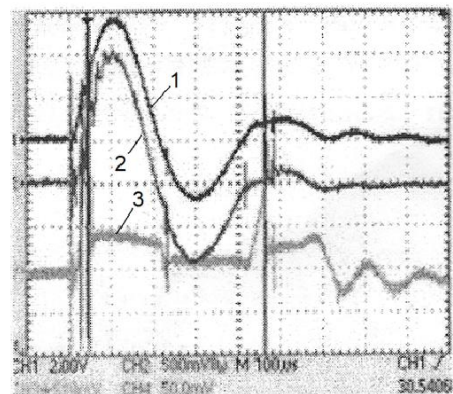
б



в



г



д

Рис. 3. Графики токов первичной (1) и вторичной (2) обмоток индивидуальной катушки зажигания типа 27.3705 и напряжения на свече зажигания (3) при работе с КТМЗ со свечой зажигания BRISK SILVER с межэлектродным зазором 0,7 мм

На рис. 4 приведены графики напряжения вторичной обмотки индивидуальной катушки зажигания типа 27.3705 при работе с газовым двигателем КамАЗ под управлением МСУД «М20» с модулем зажигания ТрМЗ в качестве оконечного каскада при частотах вращения коленчатого вала (n), равных 800 об/мин на холостом ходу (рис. 3, а), 1500 об/мин при нагрузке 10 % (рис. 3, б) и 100 % (рис. 3, в), и 2200 об/мин при нагрузке 10 % (рис. 3, г) и 100 % (рис. 3, д).

При анализе полученных зависимостей было установлено, что на скорость распространения фронта пламени, продолжительность сгорания и соответственно на крутящий момент, расход топлива и выбросы вредных веществ с отработавшими газами параметры искрового разряда оказывают существенное влияние.

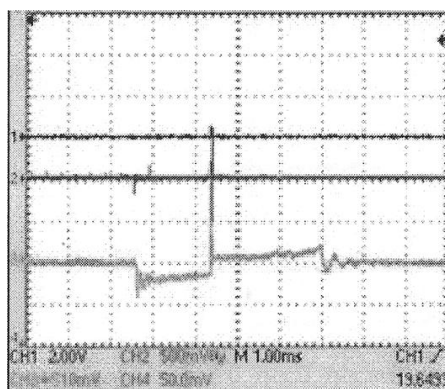
Испытания ДВС с использованием в качестве оконечного каскада МСУД ТрМЗ, формирующего длительный слаботочный (не более 80 мА)

инициирующий разряд, показали меньшую скорость распространения фронта пламени, увеличение продолжительности сгорания смеси при соответственно меньших температурах и давлении в цилиндре по сравнению с КТМЗ, на что указывают меньшие выбросы NOx и CH при более высокой температуре выхлопных газов. Уменьшение выбросов CH объясняется увеличенной на 40 °С температурой выхлопных газов.

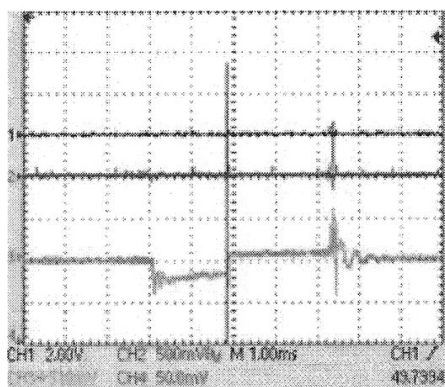
Применение КТМЗ в качестве окончательного каскада МСУД «М20» позволило по сравнению с штатным ТрМЗ уменьшить удельный и часо-

вой расходы топлива на 7–9 % во всем диапазоне нагрузок ДВС при частоте вращения коленвала 1500 и 2200 об/мин, что указывает на увеличение скорости распространения фронта пламени, снижение продолжительности сгорания газовой смеси и соответственно увеличение крутящего момента.

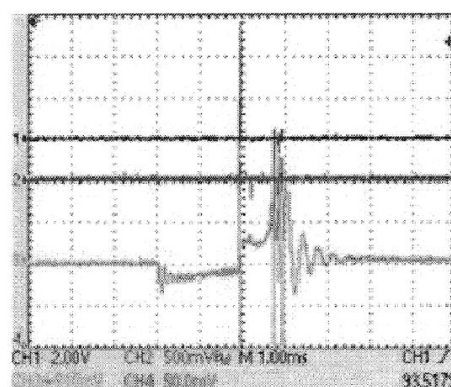
Так, на режимах нагрузок до 30 % при $n = 1500$ об/мин минимальное значение расхода топлива получено при испытании ДВС с окончательным каскадом МСУД КТМЗ (межэлектродный зазор в свече зажигания 0,7 мм).



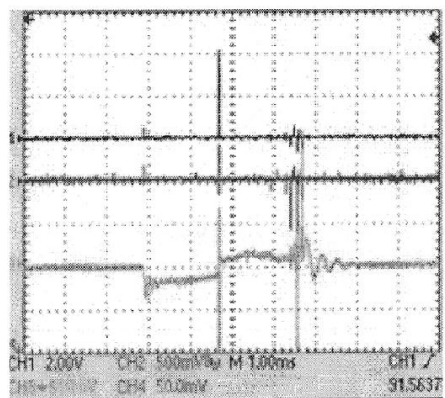
а



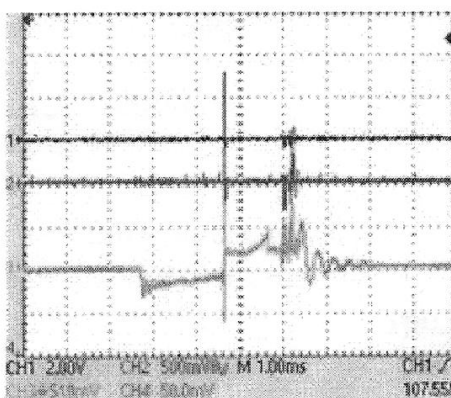
б



в



г



д

Рис. 4. Графики напряжения вторичной обмотки катушки зажигания типа 27.3705 при работе с штатным ТрМЗ в составе МСУД «М20» со свечой зажигания BRISK SILVER с межэлектродным зазором 0,3 мм

Причем увеличенный до 1,0 мм межэлектродный зазор не обеспечивает уменьшения расхода топлива на данном режиме. При $n = 2200$ об/мин во всем диапазоне нагрузок минимальный расход топлива ДВС зафиксирован с окончательным каскадом МСУД на базе КТМЗ (межэлектродный зазор 1,0 мм). На режимах нагрузок до 15 % при $n = 1500$ об/мин и 2200 об/мин с окончательным каскадом МСУД КТМЗ (межэлектродный зазор 1,0 мм) увеличенные выбросы NOx свидетельствуют о повышении температуры в цилиндре. Повышение температуры, в соответствии с законом Аррениуса [8], разгоняет скорость химических реакций, что увеличивает скорость распространения фронта пламени и уменьшает продолжительность сгорания. Перерасход топлива при уменьшении продолжительности сгорания смеси объясняется неоптимальным углом опережения зажигания (УОЗ). Известно, что с сокращением продолжительности сгорания смеси УОЗ необходимо уменьшать [9].

В диапазоне нагрузок 15–75 % при $n = 1500$ об/мин применение КТМЗ в качестве окончательного каскада МСУД позволило увеличить температуру в цилиндре, на что указывают повышенные (по сравнению с другими модулями) выбросы NOx и пониженные выбросы CH, что свидетельствует об увеличении скорости распространения фронта пламени.

На режиме нагрузок свыше 75 % при $n = 1500$ об/мин наибольшие выбросы NOx соответствуют испытаниям с окончательными каскадами МСУД КТМЗ с межэлектродным зазором 0,7 мм. Наличие первой более сильноточной индуктивной фазы и увеличение до 0,4 мс (два полупериода) длительности второй фазы разряда позволило существенно повысить скорость распространения фронта пламени [4].

КТМЗ по сравнению с ТрМЗ вследствие большей удельной энергии (амплитудное значение индуктивных фаз разряда практически не зависит от частоты вращения и нагрузки ДВС) в увеличенном межэлектродном зазоре свечи позволяет улучшить экологические и экономические параметры.

Применение КТМЗ с межэлектродным зазором 1,0 мм в качестве окончательного каскада МСУД позволило увеличить скорость распространения фронта пламени при соответственном повышении температуры в цилиндре, что показывают увеличенные выбросы NOx и пониженные выбросы CH [3].

Повышение межэлектродного зазора приводит к увеличению энергии и компенсирует уменьшение длительности разряда КТМЗ, то есть за счет увеличения (при неизменном значении величины тока) падения напряжения в искровом промежутке свечи зажигания.

При межэлектродном зазоре свечей зажигания 0,7 мм увеличение выбросов NOx, уменьшение расхода топлива и выбросов CH обеспечивает преимущественно окончательный каскад МСУД на базе КТМЗ.

Выводы

На режиме XX малых нагрузок при $n = 2200$ об/мин и больших нагрузок при $n = 1500$ об/мин формирование начальной сильноточной фазы и следующей за ней слаботочной индуктивной фазы разряда длительностью 0,4 мс позволяет поджечь в увеличенном межэлектродном зазоре существенно больший объем смеси в начальный момент времени, и тем самым обеспечить эффективное поддержание во времени процесса распространения фронта пламени.

При $n = 1500$ об/мин на средних нагрузках формирование (после первой фазы) второй сильноточной двухполупериодной индуктивной фазы разряда обеспечивает наибольший эффект. Объяснить это можно тем, что по мере отдаления фронта пламени от искрового канала (первая фаза с увеличенной амплитудой тока до 275 мА, и вторая двухполупериодная сильноточная фаза) поддерживается передача повышенного значения тепловой энергии дуговых фаз разряда еще незажженной смеси.

При $n = 2200$ об/мин на средних нагрузках применение КТМЗ показало ухудшение процесса воспламенения смеси, связанное с негативным влиянием повышенной турбулентности на процесс воспламенения в увеличенном до 1,0 мм межэлектродном зазоре.

При $n = 2200$ об/мин на нагрузках близких к максимальным, различия в зазорах свечей зажигания не оказывают существенного влияния на процесс поджога и развития процесса горения смеси. Преимущество КТМЗ над ТрМЗ обеспечивается формированием индуктивных фаз разряда с повышенной удельной энергией в увеличенном зазоре свечей зажигания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние форсированных токовых параметров искрового инициирующего разряда на показатели газового двигателя / Г. И. Шаронов, С. М. Францев, В. И. Выходов, Э. Р. Домке // Вестник Московского автомобильно-

дорожного института (государственного технического университета). – 2009. – № 4(19). – С. 30–34.

2. Шаронов, Г. И. Интенсификация токовременных параметров искрового инициирующего разряда газового двигателя / Г. И. Шаронов, С. М. Францев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 2(6). – С. 128–135.

3. Транзисторные и тиристорные модули зажигания со встроенными средствами исследования / Г. И. Шаронов, В. В. Лянденбургский, И. В. Нефедов, В. А. Шилин // Мир транспорта и технологических машин. – 2014. – № 2(45). – С. 40–480.

4. Трясогузов, А. Г. Конденсаторно-тиристорные модули зажигания для ДВС / А. Г. Трясогузов, Г. И. Шаронов, А. И. Нефедьев // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: эксплуатация и развитие автомобильного транспорта : матер. XII междунар. заочн. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 15 апр. 2016 г.) / под общ. ред. Э. Р. Домке ; ФГБОУ ВО «Пензенский гос. ун-т архитектуры и строительства», Автомобильно-дорожный ин-т. – Пенза, 2016. – С. 185–192.

5. Шаронов, Г. И. Конденсаторные модули зажигания для двигателей внутреннего сгорания: монография /

Г. И. Шаронов, А. И. Нефедьев, Л. А. Симонова; Казанский федеральный ун-т, Набережночелнинский ин-т. – Казань: монография, 2016. – 138 с.

6. Шаронов, Г. И. Конденсаторная система зажигания в качестве оконечного каскада электронной системы управления газового двигателя КамАЗ / Г. И. Шаронов, А. И. Нефедьев, С. М. Францев // Проблемы автомобильно-дорожного комплекса России: эксплуатация и развитие автомобильного транспорта: матер. VIII междунар. заоч. науч.-техн. конф. (Пенза, 24 нояб. 2012 г.) / ФГБОУ ВПО «Пензенский гос. ун-т архитектуры и строительства», Автомобильно-дорожный ин-т. – Пенза, 2012. – С. 144–156.

7. Нефедьев, А. И. Преобразователь напряжения для конденсаторно-тиристорного модуля зажигания / А. И. Нефедьев, А. Г. Трясогузов // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2023. – № 2 (43). – 29–32.

8. Основы химической кинетики: Учебное пособие / К. И. Болячевская, А. А. Литманович, Г. Ю. Остаева, А. А. Панасенко, Е. В. Полякова; под ред. И. М. Паписова. – М.: МАДИ (ГТУ), 2007. – 80 с.

9. Ютт, В. Е. Электрооборудование автомобилей / В. Е. Ютт. – 2-е изд. – М.: Транспорт, 1995. – 304 с.

УДК 621.311

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-2-47-45-49

П. Д. Кутейников

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕКЛОУЗЕРОВ С РЕФЛЕКТОМЕТРАМИ

Волгоградский государственный технический университет

suhanov.pavel@inbox.ru

Возможность обеспечения качественного бесперебойного электроснабжения в значительной степени определяется надежностью воздушных линий электропередачи (ВЛ). Для поиска места повреждения линии в наши дни используется метод поочередного отключения участков сети. Этот метод является весьма затратным по времени, что оказывает серьезный экономический ущерб для потребителей. В данной статье предложен метод поиска поврежденного участка сети при помощи реклоузеров с использованием рефлектометров, а также рассчитан экономический ущерб от недоотпуска электроэнергии для разных секторов потребителей.

Ключевые слова: надежность электроснабжения, аварийные режимы линий электропередачи, рефлектометры, недоотпуск электроэнергии, экономический ущерб от недоотпуска

P. D. Kuteynikov

INCREASING OF THE POWER SUPPLY RELIABILITY THROUGH THE USE OF RECLOSERS WITH REFLECTOMETERS

Volgograd State Technical University

The ability to provide high-quality uninterrupted power supply is largely determined by the reliability of overhead power lines (OHL). To find the location of a line fault, the method of disconnecting sections of the network one by one is used nowadays. This method is very time-consuming, which causes serious economic damage to consumers. This article proposes a method for searching for a damaged section of the network using reclosers using reflectometers, and also calculates the economic damage from the undersupply of electricity for different consumer sectors.

Keywords: reliability of power supply, emergency modes of power lines, reflectometers, undersupply of electricity, economic damage from undersupply

Введение

Электроэнергия является одной из важнейшей составляющей жизни современного человека. Электричество обеспечивает людей теплом, светом, водоснабжением и дистанционной связью с внешним миром. Обеспечение бесперебойного электроснабжения является довольно актуальной проблемой в наши дни, когда количество потребителей и, как следствие, нагрузка на сеть возрастает каждый день.

Отключение электроэнергии может быть классифицировано как:

- запланированное – когда потребители ранее были уведомлены;
- случайное – вызвано временными или постоянными сбоями, в основном связанными с внешними событиями, такими как отказы оборудования или вмешательство третьей стороны. Случайное прерывание классифицируется как длительное (>3 мин), короткое (<3 мин) или переходное (<1 сек).

В случае запланированных отключений, когда у потребителей существует возможность принять необходимые меры для минимизации ущерба, случайные перебои, особенно длительные, могут иметь самые разные последствия. Для обычных жителей в числе таких может быть отключение бытовых приборов, либо, при возникновении скачка напряжения в начальной стадии аварии, выход техники из строя или опасность поражения током человека.

Для бизнеса или производства последствия могут быть более серьезными. Среди них – потеря доступа к важным документам или базам данных в цифровой форме или отключение ответственных серверов. Недоотпуск электроэнергии для бизнеса и предприятий опасен также с экономической точки зрения в плане простоя производства, нарушения технического процесса.

Существует множество методов определения места аварии для оперативного ремонта и возвращения сети в рабочее состояние [1, 2]. Рассмотрим сеть электроснабжения потребителей 6–10 кВ с использованием реклоузеров. Реклоузер – это устройство, предназначенное для автоматического отключения, а также повторного включения цепи переменного тока в режимах КЗ и без КЗ по предварительно заданной последовательности циклов отключения и включения с последующим возвратом АПВ в исходное состояние [3, 4]. Реклоузеры предназначены для реконфигурации сети без непосредственного участия человека.

В сетях с использованием реклоузеров имеют место случаи неселективности срабатывания аппаратов защиты [5]. Причинами данного происшествия могут быть неисправности при изготовлении, неправильный выбор уставки и др.

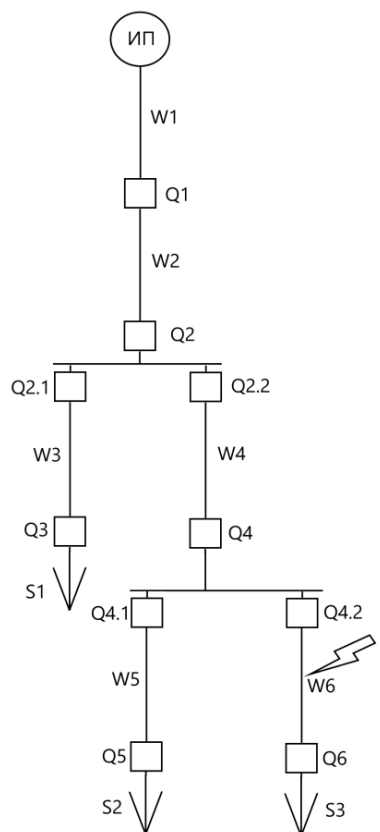


Рис. 1. Схема сети электроснабжения с поврежденной ВЛЭП

Применение реклоузеров может повысить надежность систем электроснабжения потребителей, поскольку они обеспечивают переключение коммутационных аппаратов без участия оперативного персонала. Также существует метод поиска поврежденной линии электропередач при помощи попеременного отключения каждого участка сети реклоузерами [6]. Однако в случае неселективного срабатывания защитных аппаратов, упомянутого выше, данный метод повлечет за собой отключение электроснабжения потребителей на довольно длительное время. Для более подробного объяснения данного метода на рис. 1 приведена схема электроснабжения потребителей с повредившейся линией W6.

В примере из-за неселективного отключения сработал коммутационный аппарат Q1. Для поиска поврежденного участка линии отключается аппарат Q2 и подается напряжение в сеть.

Если устройство релейной защиты не сработало, то можно сделать вывод, что линия W2 цела. Далее включаются выключатели Q2 и Q2.1 при отключенных остальных. При подаче напряжения в сеть и несрабатывании релейной защиты выясняется, что линия W3 цела. Затем включаются выключатели Q2 и Q2.2 при отключенных остальных. При подаче напряжения в сеть и несрабатывании релейной защиты становится ясно, что линия W4 цела. Далее при подаче напряжения в сеть при включенных выключателях Q4 и Q4.1 и отключенных остальных подтверждается целостность W5 при условии несрабатывания релейной защиты. После подобного алгоритма действий для выключателей Q4 и Q4.2 выясняется, что авария произошла на линии W6.

Неоспоримым преимуществом данного ме-

тода поиска аварийного участка является возможность включения остального неповрежденного участка линии без необходимости выезда оперативного персонала. Однако, в том числе и в приведенном примере, процесс поиска поврежденной линии с последующим включением целых участков может занимать длительное время, что приносит значительные убытки за счет недоотпуска электроэнергии.

Для ускорения поиска поврежденного участка цепи предлагается использовать метод отраженных импульсов при помощи установки в реклоузеры рефлектометров [7].

Рефлектометр представляет из себя прибор, принцип действия которого основан на локации зондирующего импульса по контролируемому участку линии и на измерении времени задержки отраженного от места аварии импульса.

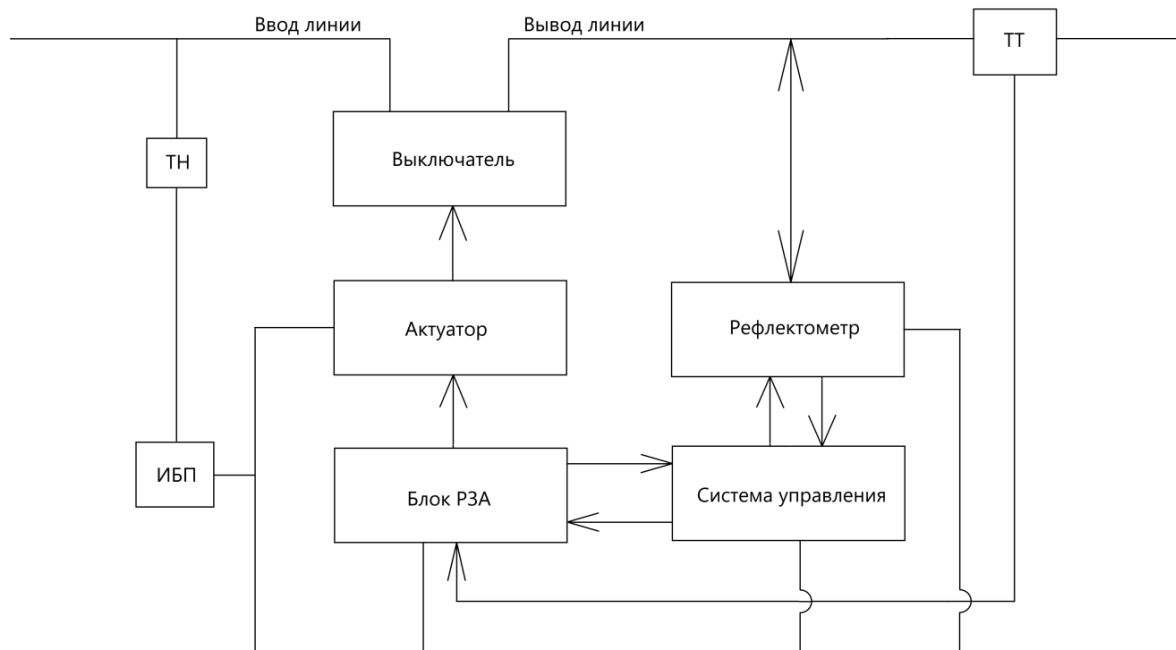


Рис. 2. Схема реклоузера с использованием рефлектометра

Применение метода отраженных импульсов в линии под напряжением предполагает использование высокочастотных фильтров и заглушителей. Однако при неселективном отключении сети существует возможность дать команду на отключение всех выключателей. Каждый участок сети оказывается изолированным с двух сторон. Затем при помощи рефлектометров происходит единовременное зондирование каждого участка – по линиям подается короткий электрический импульс. Если линия повреждена, то импульс отражается обратно в прибор. Далее происходит регистрация импульсов, отраженных от места повреждения и неодно-

родностей волнового сопротивления линии. Для корректного определения места повреждения необходимо произвести выделение полезного сигнала на фоне случайных помех и отражений от неоднородностей линий. После этого определяется расстояние до места повреждения по временной задержке отраженного импульса относительно зондирующего. Таким образом происходит определение аварийного участка линии. Затем целые участки включаются в работу, а поврежденный остается изолированным. В примере, приведенном на рис. 1, будут единовременно отключены линии W2, W3, W4, W5 и W6, определено место повреждения и затем

целые линии включатся в работу. Преимущество данного метода заключается в малых затратах времени на поиск поврежденного участка линии и, как следствие, уменьшении недоотпуска электроэнергии.

Ущерб от недоотпуска электроэнергии в USD при известном электропотреблении P рассчитывается по формуле:

$$Y = a \cdot P + b \cdot t \cdot P,$$

где a – постоянная (фиксированная) часть ущерба (USD/кВт); b – переменная часть ущерба (USD/кВт·ч); t – продолжительность отсутствия электроснабжения (ч); P – потребляемая мощность (кВт).

Значения a и b принимаются в зависимости от характера потребительского сектора (табл. 1).

Таблица 1

Потребительский сектор	Сельский	Бытовой	Промышленный	Обслуживание	Муниципальный
Постоянная составляющая «а», USD/кВт	0	0	1,2	1,1	0,5
Переменная составляющая «b», USD/кВт·ч	8,1	1,6	12,2	7,8	4,8

Для построения графиков зависимостей стоимости недоотпуска электроэнергии от времени отсутствия электроснабжения были взя-

ты значения для сельского, бытового и промышленного секторов с потребляемой мощностью 3000 Вт.

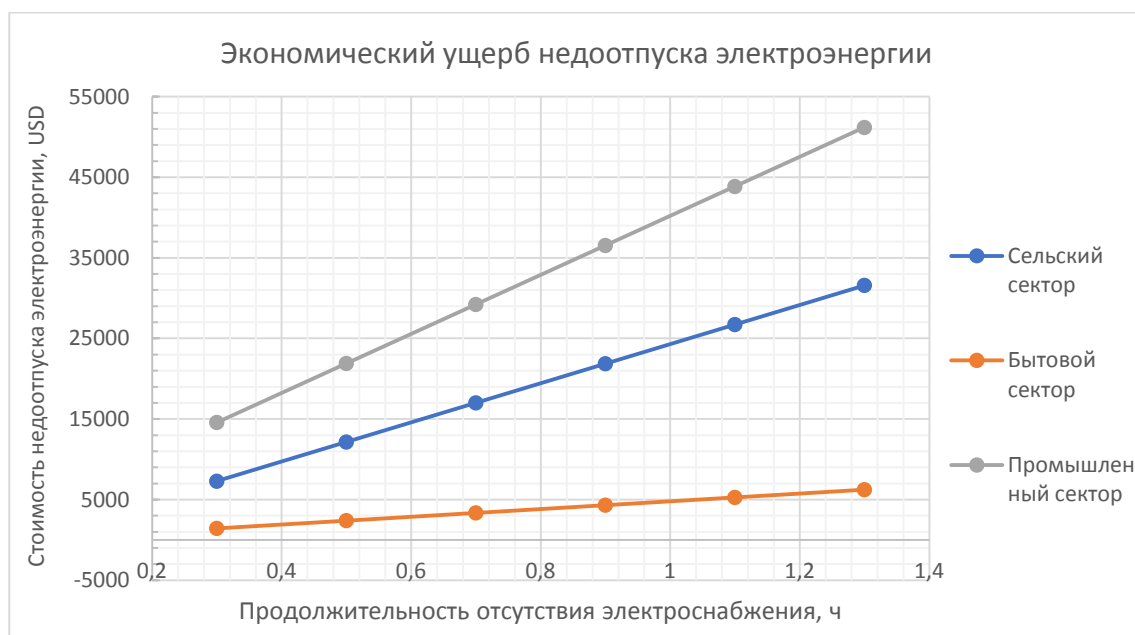


Рис. 3. График зависимости стоимости недоотпуска электроэнергии от времени отсутствия электроснабжения

Вывод

Предложенный метод имеет неоспоримое преимущество по сравнению с использованием обычных реклоузеров – весомое снижение временных затрат на поиск поврежденного участка линии, сохраняя при этом достоинство в виде отсутствия необходимости непосредственного участия оперативного персонала в поиске аварии. Однако у рефлектометров есть и недостат-

ки, среди которых реакция на неоднородности, не являющиеся повреждениями.

Из анализа стоимости недоотпуска электроэнергии следует, что экономический ущерб более ощутим для промышленного сектора потребителей, чем для бытового, в 10–11 раз. Таким образом, предложенный метод более востребован для применения на крупных заводах, производствах и промышленных предприятиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аржанников, Е. А. Методы и приборы определения места короткого замыкания на линиях: учеб. пособие / Е. А. Аржанников, А. М. Чухин. – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т, 1998. – 74 с.
2. Блинов, И. В. Мониторинг воздушных линий электропередачи с использованием индикаторов повреждений / И. В. Блинов, Е. В. Парус, Е. Ю. Полищук // Электроэнергетические системы и сети. – 2013. – № 4. – С. 42–44.
3. Реклоузер как инструмент повышения надежности / Т. М. Сивеев, А. С. Сорокин, А. Г. Груздов, Д. А. Дегтярев // Столыпинский вестник. – 2022. – Т. 4, № 5. – EDN DNQJEM.
4. Afroz Alam. Switch and recloser placement in distribution system considering uncertainties in loads, failure rates and repair rates / Afroz Alam, Vinay Pant, Biswarup Das // Electric Power Systems Research, Volume 140, November 2016. – P. 619–630.

5. Попова, И. Э. Улучшение работы систем электрообеспечения за счет применения новых технических устройств / И. Э. Попова // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2021. – № 1(57). – С. 27–34. – EDN XXJALV.

6. Чекунов, М. А. Повышение надежности электрических сетей 6(10) КВ посредством применения автоматических пунктов секционирования / М. А. Чекунов // Современные проблемы науки и образования : материалы Международной (заочной) научнопрактической конференции, Нефтекамск, 18 августа 2020 года. – Нефтекамск: Научно-издательский центр «Мир науки» (ИП Вострецов Александр Ильич), 2020. – С. 89–94. – EDN TNKRSA.

7. Шилин, А. Н. Расчет погрешностей рефлектометров для мониторинга линий электропередачи / А. Н. Шилин, А. А. Шилин, Н. С. Артющенко // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 9. – С. 52–59. – DOI 10.14489/td.2015.09.pp.052–059. – EDN UCLULP.

УДК 623.592

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-2-47-49-52

*А. В. Сомов, А. И. Нefeld'ев***ВЕЛОТРЕНАЖЕР С КОНТРОЛЕМ СОСТОЯНИЯ
ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ ПОСЛЕ ТРАВМ****Волгоградский государственный технический университет**

direktor7033@mail.ru, nefediev@rambler.ru

Автор, ответственный за переписку:

Александр Викторович Сомов, direktor7033@mail.ru

В статье приводятся результаты разработки велотренажера с устройством контроля состояния пациента при тренировке. Приведены структурная схема и принцип его работы, а также показан внешний вид макета устройства контроля на основе электрокардиографа. Предложены значения нагрузок по этапам курса велокардио-реабилитации. Показано, что использование велотренажера с устройством контроля состояния пациента могут повысить эффективность тренировок.

Ключевые слова: велотренажер, электрокардиограф, велоэргометр, индикатор, тренировка

*A. V. Somov, A. I. Nefed'ev***EXERCISER BIKE WITH CONDITION CONTROL
FOR REHABILITATION AFTER INJURIES****Volgograd State Technical University**

The article presents the results of the development of an exercise bike with a device for monitoring the patient's condition during training. The block diagram and principle of operation are presented, and the appearance of the layout of the control device based on the electrocardiograph is shown. Load values are proposed for the stages of the cycle-cardio-rehabilitation course. It has been shown that using an exercise bike with a patient monitoring device can improve the effectiveness of training.

Keywords: exercise bike, electrocardiograph, bicycle ergometer, indicator, training

Реабилитация после травм или тяжелых заболеваний является сложным и ответственным процессом. Одна из главных задач – восстановление двигательной активности и работоспособности мышечно-связочного аппарата. С этой целью применяются специальные реабилитационные тренажеры. Одним из наиболее распространенных типов этих изделий является

педальный тренажер, предназначенный для тренировки мышц ног.

Тренажеры являются важным инструментом в реабилитации при различных травмах и заболеваниях. Они позволяют сократить сроки реабилитации, содействуют улучшению кровообращения, повышают тонус мышечного аппарата и снижают мышечные спазмы [1–3].

Цель работы: изучение влияния оптимальной тренировочной программы больных ГБУЗ «ВОКГВВ» после различных операций на нижние и верхние конечности является определенной оптимизация всех адаптационных систем обеспечения, так как многие больные продолжительное время находились на больничной койке в условиях стационара, их двигательная активность была минимальной или же достаточно сильно ограниченной.

При тренировке использован метод эргометрии. Максимальная нагрузка фиксировалась по обнаружению изменений на ЭКГ, при этом тренировка прекращалась. Занятия проводились с 10-х суток после различных операций на велоэргометрах Schiller [4], у которых точность подаваемой нагрузки соответствует требованиям DIN VDE 0750-238, и на мини-велотренажерах Vohbot TT-8003 [5]. Мини-велотренажер Vohbot TT-8003 показан на рис. 1, имеет функцию регулировки нагрузки и очень удобен для восстановления после травм. Конструкция позволяет применять его для тренировки как мышц ног, так и мышц рук.

Для улучшения взаимодействия пациента и велотренажера был разработан кардиограф с блоком сигнализации превышения максимальной нагрузки при тренировке. Основой

электрокардиографа являлась стандартная плата микроконтроллера *STM32F407VGT6* фирмы *STMicroelectronics*, имеющий в своем составе двухканальный 12-разрядный ЦАП [6].



Рис. 1. Мини-велотренажер Vohbot TT-8003

Три электрода подключаются к плате через разъем и крепятся на теле пациента. Примененные электроды окрашены в следующие цвета: электрод 1 (LA, левая рука) – зеленый, электрод 2 (RA, правая рука) – красный, электрод 3 (RL, правая нога) – желтый.

Структурная схема разработанного устройства приведена на рис. 2.

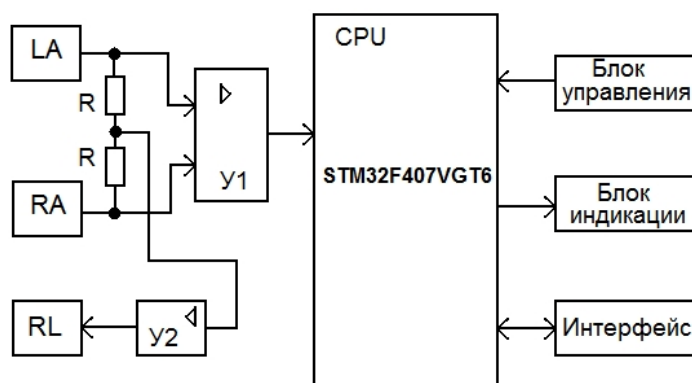


Рис. 2. Структурная схема электрокардиографа

На рис. 3 приведена схема усилителя биопотенциалов электрокардиографа.

Для уменьшения влияния синфазных помех применяются специальные компенсационные схемы. Ввиду сравнительно малого сопротивления тканей человека синфазная помеха на всей его поверхности практически одинакова. Напряжение синфазной помехи снимается с одного или нескольких активных электродов и подается на инвертирующий усилитель Y_2 , выход которого подключается к электроду RL на биообъекте.

За счет противофазного подключения компенсирующего напряжения происходит существенное снижение уровня синфазной помехи на входе канала усиления. Качество компенсации определяется значением коэффициента усиления усилителя Y_2 .

Основой усилителя биопотенциалов является инструментальный усилитель DA3 типа INA114 с коэффициентом усиления $K_3 = 10$. Для уменьшения влияния помех потенциал экрана отведений RA и LA поддерживается равным среднему значению дифференциального сигнала.

$$K_1 = -R_2 / R_3 = 39$$
[illegible]

Рис. 3. Схема усилителя биопотенциалов электрокардиографа

$$\Psi_{CC} = 60/R - R$$

Блок-схема алгоритма программы микроконтроллера приведена на рис. 4.

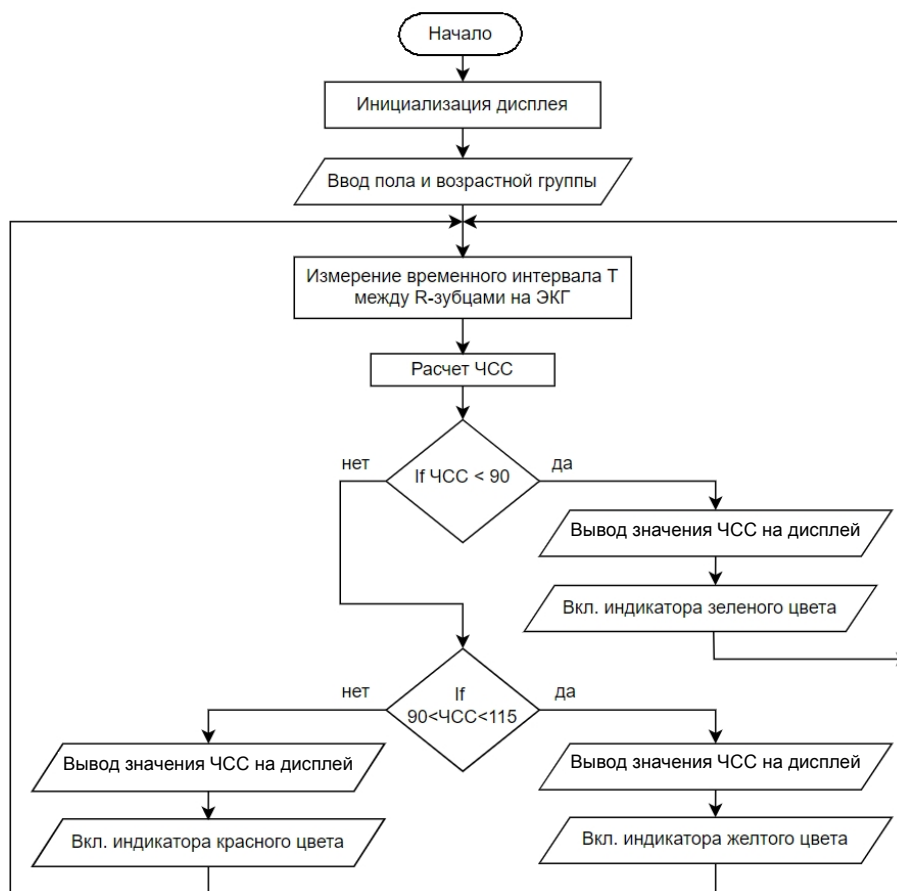


Рис. 4. Блок-схема алгоритма программы

В качестве информационного табло велокардиотренажера применен алфавитно-цифровой ЖК модуль [7] типа WH1604A-NGG-CT фирмы WINSTAR. На табло выводится информация: 1-я строка – возрастная группа, вторая строка – пол, 3-я строка – нагрузка, и 4-я строка – пульс пациента. При тренировке пациент следит за пульсом при рекомендованной нагрузке.

Плата микроконтроллера STM32F407VGT6

с тремя электродами и дисплеем показана на рис. 5.

Реабилитационный курс рассчитывался на три недели и соответственно на три этапа. Реабилитационная нагрузка варьировалась от 25 до 90 Вт.

Рекомендованные значения нагрузок по этапам курса вело- и кардиореабилитации приведены в табл. 1.

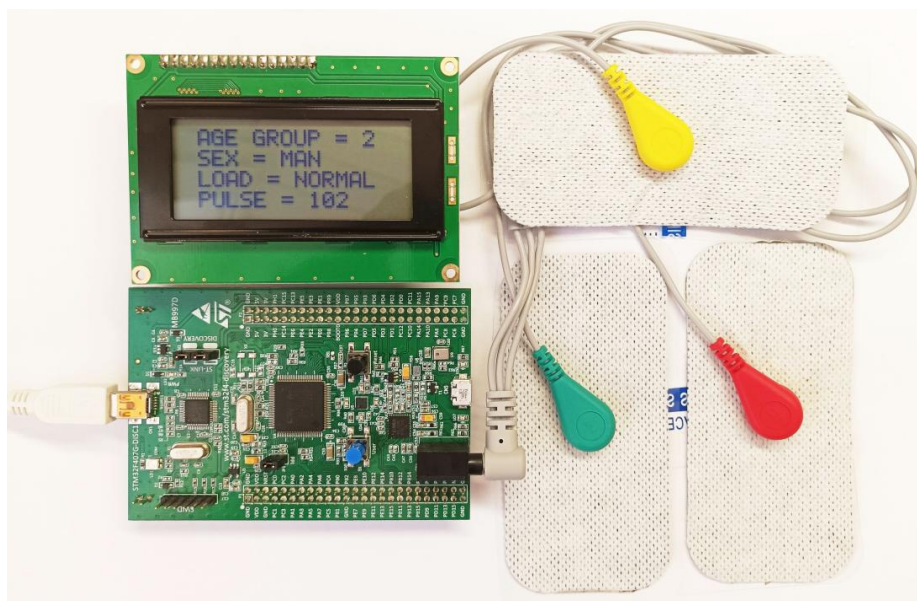


Рис. 5. Плата микроконтроллера STM32F407VGT6 с тремя электродами и дисплеем

Реабилитационные нагрузки

Этап	Неделя	Велотренажер, Вт	Ходьба, Вт	Скандинавская ходьба, Вт	Нагрузка
1-й	1-я	25–30	21,5–25,8	24,5–29,8	Минимальная
2-й	2-я	40–60	34,4–51,6	39,4–58,6	Номинальная
3-й	3-я	70–90	60,2–77,4	68,2–87,4	Предельная

Результаты работы с велокардиотренажером в ГБУЗ «ВОКГВВ» показали, что правильно подобранные параметры велоэргометрических нагрузок и достоверная индикация параметров могут повысить двигательные и функциональные возможности пациентов, перенесших различные операции на нижние и верхние конечности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федулова, Д. В. Физическая реабилитация спортсменов после травмы передней крестообразной связки и мениска коленного сустава с применением баланс-тренинга / Д. В. Федулова, К. А. Бердюгин; под ред. Н. М. Белокрылова. – Екатеринбург: ООО «Типография Для Вас», 2022. – 124 с.
2. Ешпанова, Г. Т. Использование тренажеров в лечебной физической культуре для реабилитации спортсменов / Г. Т. Ешпанова // Молодой ученый. – 2017. – № 6 (140). – С. 213–217.
3. Практические рекомендации по использованию средств для восстановления работоспособности спортсменов на различных этапах соревновательной деятельности / Н. Ф. Туманова, А. Е. Шестопалов, А. В. Жолинский, В. С. Фещенко, Е. И. Разумец // Лечебная физкультура и спортивная медицина. – 2018. – № 3 (147). – С. 28–37.
4. Велоэргометры Schiller. URL: <https://stkraft.com/funktionalnaya-diagnostika/veloergometry/schiller-3/> (дата обращения: 29.03.2024).
5. Мини-велотренажер Boxbot TT-8003. URL: <https://sport-econom.ru/product/mini-velotrenajer-boxbot-tt-8003-serebristiichernii/> (дата обращения: 29.03.2024).
6. Han, Y. Design of Data Transfer Module Based on STM32 in Monitoring System of Cold Chain Transportation / Y. Han, L. Meng // Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control. – 2015. – P. 78–81.
7. WH1604A-NGG-CT. URL: <https://www.platan.ru/cgi-bin/qwery.pl?id=2010007313> (дата обращения: 29.03.2024)

УДК 629.331:629.06

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-2-47-53-56

Г. В. Бойко, А. П. Федин, В. А. Федина, К. И. Великая, В. В. Андреева
**О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ
В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
АГРЕГАТАМИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Волгоградский государственный технический университет

boyko@vstu.ru

Автор, ответственный за переписку: Григорий Владимирович Бойко, boyko@vstu.ru

В настоящее время актуальной и важной задачей является развитие автоматизированных систем управления разными агрегатами и системами автомобиля. Одной из таких систем является антиблокировочная система торможения автомобиля (АБС), которая обеспечивает безопасность движения в режиме торможения. В силу множества достоинств для управления такими системами используются регуляторы. В данной статье рассмотрены различные виды регуляторов и отдельно – возможность использования нечетких и ПИД-регуляторов для управления работой АБС.

Ключевые слова: моделирование движения автомобиля, антиблокировочная система торможения, тормозной регулятор АБС, ПИД-регулятор, нечеткая логика

G. V. Boyko, A. P. Fedin, V. A. Fedina, K. I. Velikaya, V. V. Andreeva

**ON THE POSSIBILITY OF USING VARIOUS REGULATORS
IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF VEHICLE UNITS**

Volgograd State Technical University

At present, the development of automated control systems for various units and systems of the vehicles is an urgent and important task. One such system is the Anti-lock Braking System (ABS), which ensures the safety of movement in braking mode. Because of the many advantages, different regulators are used to manage such systems. This article considers various types of regulators and separately considers the possibility of using fuzzy and PID regulators to manage the ABS.

Keywords: vehicle motion simulation, anti-lock braking system, ABS brake regulator, PID controller, fuzzy logic

Введение

В настоящее время активно развиваются системы, которые позволяют автоматизировать управление различными агрегатами и системами транспортных средств (управляющие системы). Благодаря достижениям в сфере микроэлектроники и в конструировании приводов и исполнительных механизмов появилась возможность с высокой точностью и быстродействием управлять агрегатами и системами автомобиля в автоматическом режиме [1–4].

Управляющие системы обычно состоят из следующих типов устройств:

- 1) управляющие устройства (исполнительные механизмы);
- 2) устройства, анализирующие дорожные условия и параметры движения автомобиля (различные виды видеокамер и датчиков);
- 3) вычислители, при помощи которых в условиях реального времени производится расчет операций, необходимых для функционирования автоматизированных управляющих систем.

В управляющих системах, обеспечивающих заданные параметры движения автомобиля, в настоящее время используются регуляторы различных типов.

Одной из сложных управляющих систем автомобиля, которая отвечает за безопасность дорожного движения, является антиблокировочная система торможения (АБС). Одной из актуальных и сложных технических задач является задача конструирования эффективных антиблокировочных систем.

Схема работы АБС

Независимо от конструкции любая АБС должна включать следующие элементы:

- датчики, функцией которых является выдача информации об угловой скорости колеса, давлении рабочего тела в тормозном приводе, замедлении автомобиля и других;
- блок управления, обычно электронный, куда поступает информация от датчиков, который после логической обработки информации дает команду исполнительным механизмам;

электронный блок управления состоит из четырех модулей: модуль усиления входного сигнала, модуль вычислений, модуль управления, модуль контроля исправности АБС;

– исполнительные механизмы (модуляторы давления), которые в зависимости от посту-

пившей из блока управления команды снижают, повышают или удерживают на постоянном уровне давление в тормозном приводе колес.

Рассмотрим схему работы антиблокировочной системы торможения автомобиля с обратной связью, которая представлена на рис. 1.

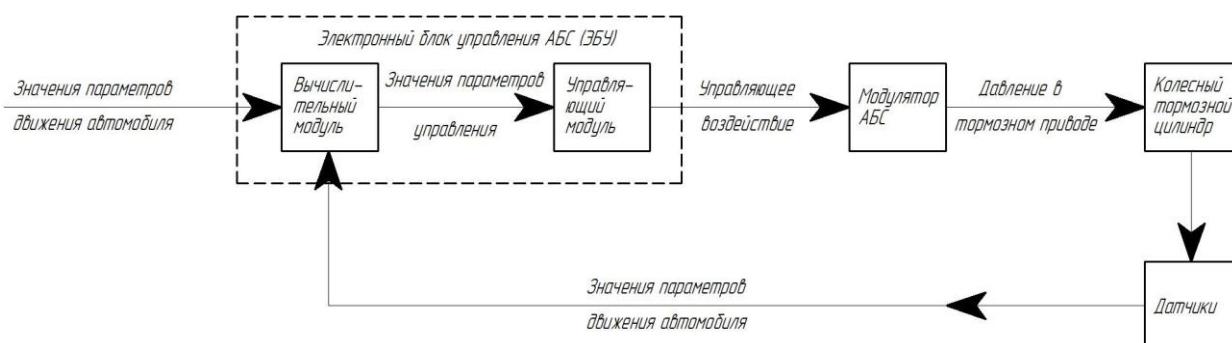


Рис. 1. Схема работы антиблокировочной системы торможения автомобиля с обратной связью

Электронный блок управления АБС (ЭБУ) можно представить в виде двух модулей: вычислительный и расчетный. Обычно АБС включается в работу при нажатии на педаль тормоза и срабатывании соответствующего датчика. С этого момента значения параметров движения автомобиля поступают в вычислительный модуль АБС. Результаты необходимых расчетов передаются в управляющий модуль АБС, в нем на основе расчетных данных происходит генерация управляющего воздействия. Управляющее воздействие генерируется на основе заложенного в АБС алгоритма работы. В настоящее время существует огромное количество различных алгоритмов работы АБС. Любой алгоритм основан на сравнении текущих значений выбранных параметров торможения автомобильного колеса с их граничными значениями, которые определяют возможность эффективной работы АБС. Параметры и их граничные значения определяются конструкторами антиблокировочных систем. Разработанные алгоритмы работы АБС являются коммерческой тайной производителя и держатся в секрете, чтобы обеспечить конкурентные преимущества предлагаемого продукта. Далее в управляющем модуле происходит усиление сгенерированного управляющего воздействия, и оно передается на модулятор АБС. В результате воздействия на исполнительные механизмы модулятора происходит изменение давления жидкости в тормозном приводе, давление может увеличиваться или уменьшаться, а также

в некоторых алгоритмах используется так называемый режим «отсечки», когда давление остается неизменным. Далее давление тормозной жидкости передается в колесные тормозные цилиндры и происходит затормаживание или растормаживание автомобильного колеса. От колесных датчиков значения параметров торможения автомобильного колеса поступают в вычислительный модуль АБС, после чего повторяется процесс расчета и генерируется новое управляющее воздействие с последующей его реализацией в колесном тормозном цилиндре. Процесс работы АБС является циклическим и должен быть реализован в режиме реального времени.

Применение ПИД-регулятора для управления работой АБС

Динамичное развитие электронных и микропроцессорных систем обуславливает возможность эффективного применения регуляторов, основанных на ПИД-регулировании (пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор) для управления антиблокировочной системой торможения.

В случае применения ПИД-регулятора в работе АБС схема электронного блока управления АБС может быть представлена как на рис. 2. Вместо управляющего модуля появляются блок расчета ошибки параметра управления и ПИД-регулятор. Работа такого регулятора основана на компенсации ошибки между текущим значением параметра управления и его

заданным оптимальным значением – уставкой параметра управления. Входом для такого регулятора является значение ошибки между текущим значением параметра управления и его

заданным оптимальным значением, а выходом – управляющее воздействие, которое приводит к изменению величины давления в тормозном приводе [9, 10].

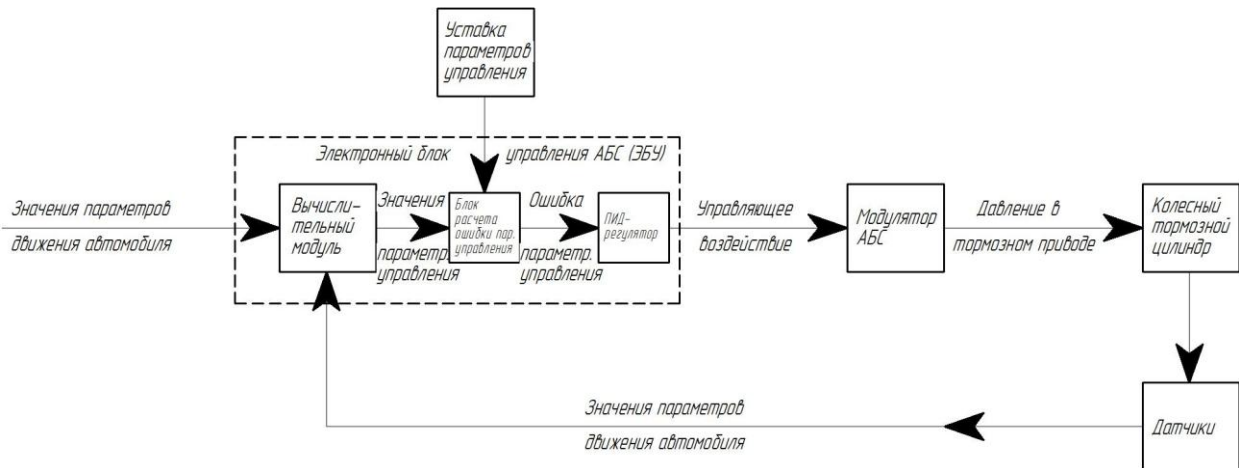


Рис. 2. Схема работы антиблокировочной системы торможения автомобиля с обратной связью с использованием ПИД-регулятора

В качестве параметров управления могут использоваться коэффициент относительного проскальзывания, угловая скорость и ускорение колеса.

Применение нечеткого регулятора для управления работой ABS

В настоящей статье для примера рассмотрен нечеткий контроллер, который имеет два входных параметра: ошибку коэффициента относительного проскальзывания, которая представляет собой разность между фактическим текущим значением коэффициента относительного проскальзывания и его установленным фиксированным значением, и скорость изменения этого параметра. В качестве установленного фиксированного значения принимается значение 0,2, при котором обеспечивается наилучшее сцепление колес с дорожной поверхностью. В этом случае задача регулятора – поддерживать текущее значение коэффициента относительного проскальзывания как можно ближе к значению 0,2.

Ниже представлена база нечетких правил, в которой используются следующие понятия [5–8]:

- ОБ: отрицательное большое значение,
- ОМ: отрицательное малое значение,
- Н: нулевое значение,
- ПБ: положительное большое значение,
- ПМ: положительное малое значение.

Выходным сигналом регулятора является давление в тормозном приводе, которое изме-

няется при соответствующих изменениях входных параметров. В этом случае правила для нечеткого регулятора выглядят следующим образом [11]:

1. Если ошибка скольжения равна ПБ, а скорость изменения ошибки равна ПБ, то давление равно ОБ.
2. Если ошибка скольжения равна ПБ, а скорость изменения ошибки равна ПМ, то давление равно ОБ.
3. Если ошибка скольжения равна ПБ, а скорость изменения ошибки равна Н, то давление равно Н.

.....
25. Если ошибка скольжения равна ОБ, а скорость изменения ошибки равна ОБ, то давление равно ПБ.

Выше представлен один из вариантов базы правил. Разные варианты имеют свои преимущества и недостатки. Исследователи стремятся создать такую базу правил, которая бы обеспечивала наилучшую эффективность торможения при сохранении устойчивости и управляемости движения. Под эффективностью торможения в данном случае понимается величина тормозного пути и время торможения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ульченко, И. А. Повышение безопасности колесных машин на основе совершенствования алгоритмов работы системы предотвращения столкновений. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2022 г., г.Москва.

2. Llorca D., Milanés V., Parra I., Gavilán M., Daza I. G. Autonomous Pedestrian Collision Avoidance Using a Fuzzy Steering Controller // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, IEEE. Vol. 12. – 2011. – N 2. – P. 390–401.
3. Hamid U. Z., Saito Y., Zamzuri H., Rahman M. A., Raksincharoensak P. A review on threat assessment, path planning and path tracking strategies for collision avoidance systems of autonomous vehicles // International Journal of Vehicle Autonomous Systems. Vol. 14. – 2018. – N 2. – 134 p.
4. Driankov D., Saffiotti A. Fuzzy logic techniques for autonomous vehicle navigation. – Studies in Fuzziness and Soft Computing, Physica, Springer, 2001. – 388 p.
5. Hessburg T., Tomizuka M. Fuzzy logic control for lane change maneuvers in lateral vehicle guidance // Univ. Calif., Berkeley, CA, Calif PATH Working Paper, 1995. – 11 p.
6. Milanés V., Pérez J., Godoy J., Onieva E. A fuzzy aid rear-end collision warning/avoidance system // Expert Systems with Applications. Vol. 39. – 2012. – N 10. – P. 9097-9107.
7. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с.
8. Devineau G., Polack P., Altche F., Moutarde. F. Coupled Longitudinal and Lateral Control of a Vehicle using Deep Learning: 2018 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2018. – 13 p.
9. Бойко, Г. В. Application of PID Control Principles in the Tasks of Modeling the Movement of Wheeled Vehicles Equipped with an Anti-Lock Braking System / Г. В. Бойко, А. П. Федин, J. Redl // Society 5.0. Cyber-Solutions for Human-Centric Technologies / eds.: A. G. Kravets, A. A. Bolshakov, M. V. Shcherbakov. – Cham (Switzerland) : Springer Nature Switzerland AG, 2023. – P. 321–334. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35875-3_24. – (Book ser.: Studies in Systems, Decision and Control (SSDC) ; vol. 437).
10. Modeling the Movement of Vehicles with an Anti-lock Braking System on Various Types of Road Surface Using the Principles of PID Control / Г. В. Бойко, А. П. Федин, М. Петренко, И. Лесковец, J. Redl // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science : 5th International Conference CIT&DS 2023 (Volgograd, Russia, September 11–15, 2023) : Proceedings / eds.: A. G. Kravets, M. V. Shcherbakov, P. P. Groumpos ; Volgograd State Technical University [et al.]. – Cham (Switzerland) : Springer Nature Switzerland AG, 2023. – P. 155–167. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44615-3_11. – (Book ser.: Communications in Computer and Information Science (CCIS); vol. 1909).
11. California State University, Northridge. design of a controller for abs anti-lock braking system using fuzzy logic control. A graduate project submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Science in Electrical Engineering by Angad Anil Aras. December 2013.

Ответственный за выпуск редактор РИО
А. Н. Сергеева

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–64543 от 22 января 2016 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет» (ВолГТУ)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)
Гл. редактор, тел.: +7 (8442) 24-80-03
E-mail: lysak2@vstu.ru

Темплан 2024 г. (научные издания). Поз. № 18ж. Дата выхода в свет 21.06.2024 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,51. Уч.-изд. л. 6,17.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 337.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО Издательства ВолГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

Отпечатано в типографии Издательства ВолГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.