

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 1 (38)
2022



16+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ





Издается
с января 2004 г.

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

ISSN 2500-0586

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

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

Редакционная коллегия:

И. И. Артюхов – д.т.н., проф., СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
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. П. Дармания – д.т.н., проф., ВГАУ,
г. Волгоград
А. М. Иванов – д.т.н., проф.,
МГТУ (МАДИ), г. Москва
А. В. Келлер – д.т.н., проф. НАМИ, г. Москва
В. В. Кортаев – 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
Мертен Клеменс – д.т.н., проф.,
университет г. Штутгарт, Германия
В. А. Марков – д.т.н., проф., МГТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. Е. Новиков – д.т.н., проф., ВолгГТУ
Б. В. Скворцов – д.т.н., проф., СНИУ
им. академика С. П. Королева, г. Самара
Е. А. Федянов – д.т.н., проф., ВолгГТУ
В. Т. Фомичев – д.т.н., проф., ВолгГТУ
А. Н. Шилин – д.т.н., проф., ВолгГТУ

Ответственный секретарь
П. С. Васильев – к.т.н., доц., ВолгГТУ

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала по каталогу
Агентства «Роспечать»
для Российской Федерации –
94193(ОК+ЭК).

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

№ 1 (38)
Март
2022

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) 23-00-76
e-mail: rector@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 Academician of RAS,
D. Sc. (Technical), Professor

Editorial Board:

I. I. Artuchov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU, Saratov
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. P. Darmanyan – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSAU, Volgograd
A. M. Ivanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
MADI, Moscow
A. V. Keller – D. Sc. (Engineering), Prof.,
NAMI, Moscow
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
M. Clemens – D. Sc. (Engineering), Prof.,
University of Stuttgart, Germany
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. E. Novikov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
B. V. Skvortsov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
Samara University, Samara
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
B. T. Fomichev – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. N. Shilin – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd

Executive Secretary
P. S. Vasilyev – PhD, Associate Prof.

The journal is distributed by subscription.
Index of the journal in the catalogue
of the Agency «Rospechat» for the Russian
Federation – 94193(OK+ЭК).

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», 2022

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:
ПИ .N° (ФЦ77-64543, registration date: 22 January 2016

№ 1 (38)
March
2022

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: rector @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 accord-
ance 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

- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| Авдеюк Д. Н. 21 | Кузнецова Н. С. 21 |
| Артюмаков В. А. 21 | Кутейников П. Д. 13 |
| Верхоглядов А. П. 54 | Макартичан С. В. 54 |
| Воротников И. Н. 49, 59 | Мастепаненко М. А. 49, 59 |
| Габриелян Ш. Ж. 49, 59 | Митрофанов А. Н. 35 |
| Гусев В. Г. 31 | Мишуков С. В. 49, 59 |
| Дементьев С. С. 13 | Нефедьев А. И. 31, 45 |
| Дикарев П. В. 6 | Шаронова В. Г. 31 |
| Жбанников А. С. 23 | Шилин А. А. 6, 21 |
| Кетов Д. Ю. 45 | Шилин А. Н. 35 |
| Кодочигова А. В. 39 | Юдин С. Ю. 6 |
| Коптелова И. А. 23 | |

AUTHOR INDEX

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| Artyumakov V. A. 21 | Mastepanenko M. A. 49, 59 |
| Avdeyuk D. N. 21 | Mishukov S. V. 49, 59 |
| Dementiev S. S. 13 | Mitrofanov A. N. 35 |
| Dikarev P. V. 6 | Nefediev A. I. 31, 45 |
| Gabrielyan Sh. Zh. 49, 59 | Sharonova V. G. 31 |
| Gusev V. G. 31 | Shilin A. A. 6 |
| Ketov D. Yu. 45 | Shilin A. N. 35 |
| Kodochigova A. V. 39 | Verkhoglyadov A. P. 54 |
| Koptelova I. A. 23 | Vorotnikov I. N. 49, 59 |
| Kuteinikov P. D. 13 | Yudin S. Yu. 6 |
| Kuznetsova N. S. 21 | Zhbannikov A. S. 23 |
| Makartichyan S. V. 54 | |

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Дикарев П. В., Шилин А. А., Юдин С. Ю.</i> Система распознавания аварийных режимов воздушных линий электропередачи с использованием нечеткой логики.....	6
<i>Дементьев С. С., Кутейников П. Д.</i> Информационно-измерительная система для контроля пропускной способности воздушных линий электропередачи с защищенными проводами.....	13
<i>Шилин А. А., Кузнецова Н. С., Авдеюк Д. Н., Артюмаков В. А.</i> Анализ инструментальной погрешности рефлектометра для определения места повреждения воздушной линии электропередачи.....	21
<i>Жбанников А. С., Коптелова И. А.</i> Разработка аппаратно-программного комплекса контроля температурных режимов трансформаторов электрических сетей...	23
<i>Нефедьев А. И., Шаронова В. Г., Гусев В. Г.</i> Конденсаторно-транзисторная система зажигания газового ДВС.....	31
<i>Шилин А. Н., Митрофанов А. Н.</i> Цифровое моделирование преобразований стохастических сигналов в гидроакустических системах.....	35
<i>Кодочигова А. В.</i> Выбор технологий беспроводной передачи данных для медицинских приложений WBAN.....	39
<i>Кетов Д. Ю., Нефедьев А. И.</i> Применение DDS-генератора для мониторинга технического состояния электроэнцефалографа.....	45
<i>Воротников И. Н., Мастепаненко М. А., Габриелян Ш. Ж., Мишуков С. В.</i> Повышение точности измерений влажности и примесей продуктов на основе метода сравнения с мерой в составе информационно-измерительной системы.....	49
<i>Макартичан С. В., Верхоглядов А. П.</i> Устройство для контроля неравномерности распределения влаги в древесине.....	54
<i>Воротников И. Н., Мастепаненко М. А., Габриелян Ш. Ж., Мишуков С. В.</i> Разработка и исследование алгоритма работы информационно-измерительной системы контроля качества сыпучих сельскохозяйственных продуктов.....	59

CONTENTS

<i>Dikarev P. V., Shilin A. A., Yudin S. Yu.</i> System for recognition of emergency modes of overhead power lines using fuzzy logic.....	6
<i>Dementiev S. S., Kuteinikov P. D.</i> Information and measuring system for monitoring the throughput of overhead power lines with protected wires.....	13
<i>Shilin A. A., Kuznetsova N. S., Avdeyuk D. N., Artyumakov V. A.</i> Analysis of instrumental error of a reflectometer to determine the location of damage to an overhead power line.....	21
<i>Koptelova I. A., Zhbannikov A. S.</i> Development of a hardware-software complex for monitoring the temperature regimes of transformers of electrical networks.....	23
<i>Nefediev A. I., Sharonova V. G., Gusev V. G.</i> Capacitor-transistor ignition system of a gas engine.....	31
<i>Shilin A. N., Mitrofanov A. N.</i> Digital modeling of transformations of stochastic signals in hydroacoustic systems.....	35
<i>Kodochigova A. V.</i> Selecting wireless data technologies for medical WBAN applications.....	39
<i>Ketov D. Yu., Nefediev A. I.</i> Application of DDS-generator for monitoring the technical condition of electroencephalograph.....	45
<i>Vorotnikov I. N., Mastepanenko M. A., Gabrielyan Sh. Zh., Mishukov S. V.</i> Improving the accuracy of measurements of moisture and impurities of products based on the method of comparison with a measure as part of an information-measuring system.....	49
<i>Makartichyan S. V., Verkhoglyadov A. P.</i> Device for monitoring the uneven distribution of moisture in wood.....	54
<i>Vorotnikov I. N., Mastepanenko M. A., Gabrielyan Sh. Zh., Mishukov S. V.</i> Development and research of the operation algorithm of the information-measuring system for quality control of bulk agricultural products.....	59

П. В. Дикарев¹, А. А. Шилин², С. Ю. Юдин³

**СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: shilin.jr@gmail.com², dikarev.pavel@mail.ru¹, eltech@vstu.ru³

В статье приведена структурная схема системы диагностирования аварийных ситуаций воздушных линий электропередачи (ВЛЭП), основанная на использовании нечеткой логики. Составлены функциональные принадлежности напряжений. Принцип работы системы основан на регистрации изменения электромагнитного поля вокруг линии и опоры при аварийных режимах. Измеренные сигналы анализируются с помощью нейрокомпьютера, который обладает блоком обработки информации с нечеткой логикой, позволяющим определить аварийный режим и его вид. Информация о работе сети с нейрокомпьютера передается по каналам GSM/GPRS связи на диспетчерский пункт.

Ключевые слова: интеллектуальные сети, мониторинг ЛЭП, аварийные режимы, релейная защита.

P. V. Dikarev¹, A. A. Shilin², S. Yu. Yudin³

**SYSTEM FOR RECOGNITION OF EMERGENCY MODES
OF OVERHEAD POWER LINES USING FUZZY LOGIC**

Volgograd State Technical University

The article presents a structural scheme of system for diagnosing emergencies of overhead power lines (OHTL), based on the use of fuzzy logic. Composed voltage membership functions. The system records the changes around the line and support the electromagnetic field in emergency mode. The measured signals are analyzed using a neurocomputer, which has an information processing unit with fuzzy logic, which makes it possible to determine the emergency mode and its type.. Information about the network operation from the neurocomputer is transmitted via GSM/GPRS communication channels to the control room.

Keywords: smart grids, monitoring of power lines, emergency modes, relay protection.

Введение

В настоящее время развитие электроэнергетики является одним из важнейших направлений мировых научно-технических процессов. Эта проблема особенно актуальна для России, энергосистема которой характеризуется большими потерями, высоким износом и, соответственно, низким уровнем надежности. Поэтому вопрос выбора направления модернизации энергосистемы России очень важен. В электроэнергетике можно выделить два основных направления модернизации:

- увеличение мощности, связанное с повышением количества электрических станций для выработки электроэнергии;

- экономия электроэнергии за счет повышения коэффициента полезного действия потребителей и снижения потерь в сетях за счет оптимизации режимов их работы.

Второе направление модернизации является менее затратным и более эффективным и по этому направлению развивается энергетика во многих развитых странах мира. Это направление реализуют создаваемые в настоящее время интеллектуальные электрические сети (Smart Grids), которые представляют комплекс технических средств, работающих в автоматическом режиме и выявляющих наиболее слабые и аварийно опасные участки сети. В случае необходимости эти сети изменяют свои характеристики

ки и топологию с целью предотвращения аварии и снижения потерь. Интеллектуальные электрические сети представляют собой систему, состоящую из двух основных частей – энергетической (силовой) и информационной. Информационная часть системы должна быть реализована на современной технической базе и поэтому является основой повышения уровня «интеллекта» [1].

В электроэнергетике существует проблема оперативного определения места и вида аварийного режима воздушных линий электропередачи (ВЛЭП). Существуют информационно-измерительные системы регистрации вида и мест повреждения, содержащие преобразователи напряжений и токов каждой фазы установленные на опорах. По результатам контроля токов и напряжений с помощью логической схемы определяется режим работы электрической сети. В случае возникновения чрезвычайной ситуации информация о месте и характере происшествия направляется в диспетчерский пункт. Основным недостатком такой системы, электрически соединенной с линией, является сложность установки и дальнейшего обслуживания системы. Кроме того, при аварийном режиме информационный сигнал может принимать разные значения в большом диапазоне, что затрудняет определение вида аварии.

Физические основы регистрации аварийных режимов. Во время нормальной работы линии электропередачи и особенно высоковольтные создают вокруг себя электромагнитное поле, на изменение которого влияют аварийные режимы (короткие замыкания и обрывы). Эти изменения могут быть использованы для идентификации и распознавания аварийных режимов линий электропередачи. Для выявления причинно-следственных связей между аварийными режимами и изменением электромагнитного поля необходимо использовать сведения о физических процессах вокруг линий электропередачи [2, 3].

В настоящее время для регистрации изменений электромагнитного поля с частотой 50 Гц целесообразно раздельно контролировать две его составляющие: электрическое поле, зависящее от напряжения, и магнитное поле, определяемое током в проводе. Очевидно, что для реализации раздельного контроля необходимы два измерительных преобразователя.

Идентификационные признаки режимов.

Для проектирования нейροкомпьютерной системы распознавания аварийных режимов необходима информация о причинно-следственных связях характеристик электромагнитного поля с видом повреждения в трехфазной системе электроснабжения. Поэтому был проведен анализ этих связей для электрической сети напряжения 6(10)-35 кВ с изолированной нейтралью. При проведении анализа был использован идеальный случай, а именно, когда все фазные напряжения равны и расстояния от проводов до датчика одинаковы.

Однако в реальных электрических сетях практически невозможно обеспечить равенство фазных напряжений, а при установке датчика обеспечить одинаковые расстояния до проводов. Отклонение напряжений в системах энергоснабжения нормируется ГОСТом и составляет $\delta_U = \pm 5\%$. Поэтому для разработки идентификационных признаков отдельно был рассмотрен случай изменения суммарной напряженности электрического поля, вызванной отклонением фазных напряжений.

Так, значение напряженности, пропорциональное суммарному напряжению для отклонения $\delta_U = \pm 5\%$, составляет

$$U_{m\Sigma} = 0,085 \cdot U_m. \quad (1)$$

В случае работы всех фаз измеряемая напряженность электрического поля, пропорциональная напряжению $U_{m\Sigma} = 0,085 \cdot U_m$, незначительно отличается от нулевого значения, и поэтому для повышения достоверности определения режима это отличие целесообразно увеличить за счет асимметрии расположения датчика. Далее при рассмотрении аварийных режимов отклонения напряжений не учитывались, поскольку величина отклонения мала в сравнение с ее значением. Аналогично были определены изменения индукции магнитного поля, вызванные отклонением фазных токов при аварийных режимах. Таким образом, по значению регистрируемых параметров магнитных и электрических полей можно определять режимы работы энергетической сети. Результаты причинно-следственных связей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Идентификационные признаки режимов работы энергетической сети

Режимы	Напряженность электрического поля, пропорциональная суммарному напряжению		Индукция магнитного поля, пропорциональная суммарному току	
Нормальный режим	$0 < \sum U_m < 0,1U_m$ ($\sum U_m \approx 0,1U_m$)		$\sum I_m \approx 0,1I_m$	
Аварийные режимы	До места аварии	После места аварии	До места аварии	После места аварии
Обрыв одной фазы	$\sum U_m \approx 0,1U_m$	$\sum U_m \approx U_m$	$\sum I_m \approx I_m$	$\sum I_m \approx I_m$
Обрыв двух фаз	$\sum U_m \approx 0,1U_m$	$\sum U_m \approx U_m$	$\sum I_m \approx I_m$	$\sum I_m \approx I_m$
Обрыв трех фаз	$\sum U_m \approx 0,1U_m$	$\sum U_m \approx 0$	$\sum I_m \approx 0$	$\sum I_m \approx 0$
КЗ одной фазы	$\sum U_m \approx \sqrt{3}I_m$	$\sum U_m \approx \sqrt{3}I_m$	$\sum I_m > I_m$	$\sum I_m \approx I_m$
КЗ двух фаз	$\sum U_m \approx \sqrt{3}I_m$	$\sum U_m \approx \sqrt{3}I_m$	$\sum I_m > I_m$	$\sum I_m \approx I_m$
КЗ трех фаз	$\sum U_m \approx 0$	$\sum U_m \approx 0$	$\sum I_m > I_m$	$\sum I_m \approx 0$

Необходимо отметить, что полученные соотношения справедливы для идеального случая, а именно, при определенном расположении проводов и измерительных преобразователей, а также при отсутствии внешних полей. Однако в реальных случаях на работу измерительных преобразователей будут оказывать воздействия естественные атмосферные поля, которые существуют над поверхностью и обусловлены различными процессами в атмосфере. Большое влияние на линии электропередачи оказывают грозозащитные тросы [3]. Таким образом, для проектирования информационно-измерительных систем представленные выше соотношения являются лишь фундаментальной основой и поэтому при проектировании должны параметры и характеристики системы корректироваться с учетом влияющих факторов. На основе этих соотношений была разработана информационно-измерительная система.

Информационно-измерительная система (рис. 1) содержит блок первичной обработки информации, в состав которого входят измерительные преобразователи двух величин: напряженности электрической поля E и индукции магнитного поля B . Преобразователи электрического поля представляют собой конденсаторы емкостью C , а преобразователи магнитного поля представляют собой катушки индуктивности. При монтаже преобразователей конденсаторы монтируются таким образом, чтобы обкладки конденсатора были перпендикулярны вектору напряженности E , а ось катушки совпадала с вектором индукции B . Преобразовате-

ли 1 и 2, регистрируют суммарную напряженность электрического поля E , создаваемую всеми проводами линии. Преобразователи 1 и 2 устанавливаются в плоскости, которая перпендикулярна проводам ВЛЭП, с угловым относительным смещением φ по окружности, центр которой совпадает с центром окружности, проходящей через центры поперечных сечений трех проводов.

Измерительный преобразователь магнитного поля 3, регистрирует индукцию магнитного поля B , создаваемую проводами линии. Кроме того, блок первичной обработки информации содержит измерительный преобразователь тока короткого замыкания (КЗ) по опоре ВЛЭП 4, который регистрирует магнитное поле тока КЗ. Сигналы с измерительных преобразователей 1, 2, 3, 4 поступают на входы блока обработки сигналов 5, который содержит набор усилителей 6, 7, 8, 9 и устройство определения сдвига фаз сигналов 10, на вход которого поступают сигналы с усилителей 6 и 7. При нормальном режиме вектор электрического поля E вращается с угловой скоростью $\omega = 2\pi f$ относительно центра окружности, проходящей через три провода ВЛЭП. Сигналы измерительных преобразователей электрического поля 1 и 2 отличаются сдвигом фаз φ , определяющимся угловым смещением. Необходимо отметить, что вращение вектора электрического поля E обусловлено временным сдвигом фаз напряжений в трехфазной системе и пространственным расположением проводов [3]. Поэтому в нормальном режиме на выходе устройства определения сдвига фаз сигналов 10 инициируется единичный сигнал. При работе двух фаз вектор элек-

трического поля пульсирует, но не вращается и его значение максимально по направлению линии, проходящей через оси проводов двух работающих фаз, а минимально по направлению оси симметрии этих двух проводов. Поэтому по анализу сигналов с усилителей 6 и 7 можно определить фазу, в которой произошел обрыв. Устройство определения сдвига фаз сигналов 10 позволяет повысить достоверность распознавания двух режимов: режим нормального функционирования ВЛЭП и режим полного отключения сети. Поскольку в трехфазной системе при нормальной работе суммы токов и напряжений близки к нулю, а при полном отключении сети суммы токов и напряжений равны нулю, т. е. отличаются незначительно, то при некоторых случайных факторах распознать два режима с помощью сигналов с преобразователей 1, 2 и 3 практически сложно. Сигналы с усилителей 6, 7, 8, 9 и устройства определения сдвига фаз сигналов 10 поступают на блок обработки информации с нечеткой логикой 11, выполненного в виде нейрокомпьютера, где происходят последовательно операции фаззификации, логического заключения и дефаззификации входных переменных. Фаззификация представляет собой нахождение значений функ-

ций принадлежности нечетких множеств, а именно напряженности электрического поля и индукции магнитного поля. Логическое заключение позволяет определить степень истинности входных переменных по каждому из правил, а операция дефаззификации выходного значения представляет собой процедуру нахождения обычного значения для каждой из выходных лингвистических переменных.

Сигналы об аварийном режиме и его координате с блока 11 передаются с помощью блока передачи информации 12, выполненного в виде GSM/GPRS модема, на диспетчерский пункт. Сигнал с блока обработки информации 11 в нормальном режиме не инициирует передачу информации на диспетчерский пункт. Если происходит аварийный режим (например, замыкание одной фазы по опоре на землю), то соответственно изменяются сигналы на выходах измерительных преобразователей 1, 2, 3 и 4. Кроме того, в этом случае отсутствует сигнал на выходе устройства 10. Эта комбинация сигналов обрабатывается нейрокомпьютером 11 и вырабатывается сигнал, соответствующий аварийному режиму. Этот сигнал инициирует передачу информации блоком 12 на диспетчерский пункт.

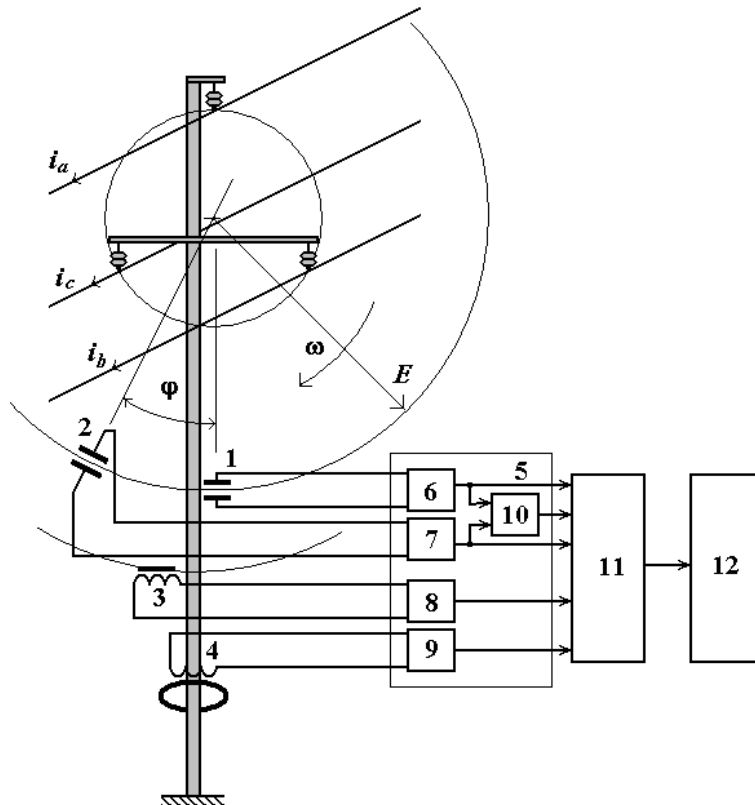


Рис. 1. Структурная схема нейрокомпьютерной системы определения аварийного режима с нечеткой логикой

Использование блока обработки информации с нечеткой логикой

Традиционный способ представления элемента множества A состоит в применении характеристической функции $\mu_A(x)$ которая равна 1, если этот элемент принадлежит к множеству A , или равна 0 в противном случае. В нечетких системах элемент может частично принадлежать к любому множеству. Степень принадлежности к множеству A , представляющая собой обобщение характеристической функции, называется функцией принадлежности $\mu_A(x)$, причем $\mu_A(x) \in [0,1]$. Значения функции принадлежности являются рациональными числами из интервала $[0,1]$, где 0

означает отсутствие принадлежности к множеству, а 1 – полную принадлежность.

Входными параметрами нечеткого аппарата блока обработки информации предлагаемой системы являются напряженность электрического поля, которая пропорциональна суммарному напряжению и индукция магнитного поля, которая в свою очередь пропорциональна суммарному току.

Составим функцию принадлежности для напряженности электрического поля $U_{m\Sigma}$ в соответствии с табл. 1. Изобразим функцию принадлежности напряженности электрического поля на рис. 2.

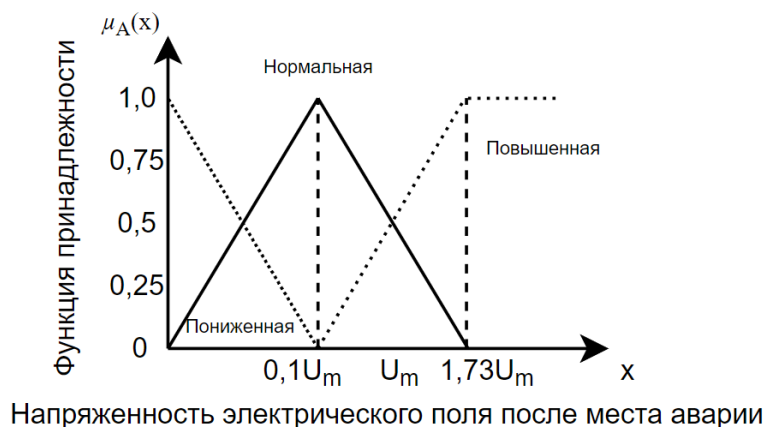


Рис. 2. Функция принадлежности напряженности электрического поля

Данная функция принадлежности напряженности электрического поля подходит при регистрации значений напряженности после

места аварии. Математический вид функции принадлежности напряженности электрического поля:

$$\begin{aligned} \mu_{A1}(x) = \text{Пониженная} &= \begin{cases} 1 & \text{при } x = 0 \\ 0 & \text{при } x \leq 0,1U_m \end{cases} \\ \mu_{A2}(x) = \text{Нормальная} &= \begin{cases} 1 & \text{при } x = 0,1U_m \\ 0 & \text{при } x \geq 1,73U_m \text{ или } x = 0 \end{cases} \\ \mu_{A3}(x) = \text{Повышенная} &= \begin{cases} 1 & \text{при } x \geq 1,73U_m \\ 0 & \text{при } x \leq 0,1U_m \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Составим функцию принадлежности для индукции магнитного поля $I_{m\Sigma}$ в соответствии

с табл. 1. Изобразим функцию принадлежности индукции магнитного поля на рис. 2.

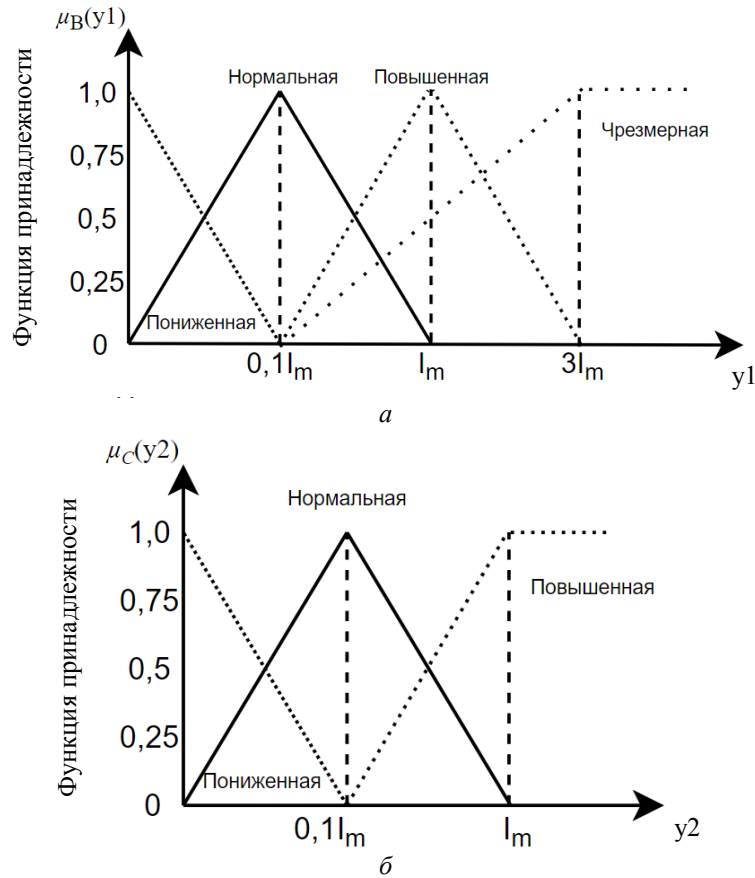


Рис. 3. Функции принадлежности индукции магнитного поля до и после места аварии:
 а – индукция магнитного поля до места аварии; б – индукция магнитного поля после аварии

Математический вид функции принадлежности индукции магнитного поля до места аварии:

$$\begin{aligned}
 \mu_{B1}(y_1) = \text{Пониженная} &= \begin{cases} 1 & \text{при } y_1 = 0 \\ 0 & \text{при } y_1 \leq 0,1I_m \end{cases} \\
 \mu_{B2}(y_1) = \text{Нормальная} &= \begin{cases} 1 & \text{при } y_1 = 0,1I_m \\ 0 & \text{при } y_1 \geq I_m \text{ или } y_1 = 0 \end{cases} \\
 \mu_{B3}(y_1) = \text{Повышенная} &= \begin{cases} 1 & \text{при } y_1 = I_m \\ 0 & \text{при } y_1 \leq 0,1I_m \text{ или } y_1 \geq 3I_m \end{cases} \\
 \mu_{B4}(y_1) = \text{Чрезмерная} &= \begin{cases} 1 & \text{при } y_1 \geq 3I_m \\ 0 & \text{при } y_1 \leq 0,1I_m \end{cases}
 \end{aligned} \quad (3)$$

Математический вид функции принадлежности индукции магнитного поля после места аварии:

$$\begin{aligned}
 \mu_{C1}(y_2) = \text{Пониженная} &= \begin{cases} 1 & \text{при } y_2 = 0 \\ 0 & \text{при } y_2 \leq 0,1I_m \end{cases} \\
 \mu_{C2}(y_2) = \text{Нормальная} &= \begin{cases} 1 & \text{при } y_2 = 0,1I_m \\ 0 & \text{при } y_2 \geq I_m \text{ или } y_2 = 0 \end{cases} \\
 \mu_{C3}(y_2) = \text{Повышенная} &= \begin{cases} 1 & \text{при } y_2 \geq I_m \\ 0 & \text{при } y_2 \leq 0,1I_m \end{cases}
 \end{aligned} \quad (4)$$

Составим базу правил нечеткой логики на основе представленных функций принадлежности напряженности электрического поля и индукции магнитного поля. Входными параметрами нечеткого аппарата примем 3 входных па-

раметра, а именно: x – напряженность электрического поля после места аварии, y_1 и y_2 – индукция магнитного поля до и после места аварии соответственно.

Таблица 2

База правил логического заключения нечеткого аппарата

№	Правило логического заключения
1	Если x = нормальная и y_1 = нормальная и y_2 = нормальная, тогда режим работы сети – нормальный.
2	Если x = повышенная и y_1 = повышенная и y_2 = повышенная, тогда режим работы сети – аварийный, обрыв одной фазы.
3	Если x = повышенная и y_1 = повышенная и y_2 = повышенная, тогда режим работы сети – аварийный, обрыв двух фаз.
4	Если x = пониженная и y_1 = пониженная и y_2 = пониженная, тогда режим работы сети – аварийный, обрыв трех фаз.
5	Если x = повышенная и y_1 = чрезмерная и y_2 = повышенная, тогда режим работы сети – аварийный, короткое замыкание одной фазы.
6	Если x = повышенная и y_1 = чрезмерная и y_2 = повышенная, тогда режим работы сети – аварийный, короткое замыкание двух фаз.
7	Если x = пониженная и y_1 = чрезмерная и y_2 = пониженная, тогда режим работы сети – аварийный, короткое замыкание трех фаз.

Как можно заметить, возникает сложность в точном определении вида аварийного режима при обрыве одной и двух фаз, а также при коротком замыкании одной и двух фаз.

Таким образом, наличие функциональной принадлежности и сформированной базой правил нечеткой логики позволяют разработать систему с нечеткими входными параметрами, которые после прохождения блока обработки информации с нечеткой логикой позволяют системе выдать четкий результат об обстановке на ВЛЭП. Разработанная система распознавания вида повреждения на воздушных линиях электропередачи позволяет повысить оперативность и точность определения вида аварийного режима на ВЛЭП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шилин, А. Н. Нейрокомпьютерная система распознавания аварийных режимов воздушных линий электропередачи / А. Н. Шилин, А. А. Шилин // Электро. Элек-

тротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 6. – С. 8–14.

2. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – М.: Энергия, 1981.

3. Рюденоберг, Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах: пер. с англ. / Р. Рюденоберг. – М.: Издательство иностранной литературы, 1955.

4. Дикарев, П. В. Методы нечеткой логики в задачах расчета уставок устройств релейной защиты и автоматики / П. В. Дикарев, В. М. Власов, Ф. С. Кособрухов // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности : сб. науч. ст. по итогам XI междунар. науч. конф. (29–30 ноября 2021 г.). Ч. 1 / редкол.: О. В. Соловьева, М. И. Яхкинд ; НПП «Медпромдеталь», ООО «Газпром трансгаз Казань». – Казань, 2021. – С. 62–64.

5. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.

6. ТКП 641-2019 (33240) «Линии электропередачи воздушные. Ветровые воздействия, гололедные нагрузки и ветровые воздействия при гололеде» // Министерство энергетики Республики Беларусь. – утвержден 18.11.2019; введен в действие 01.02.2020.

7. Кесельман, Л. М. Основы механики воздушных линий электропередачи [Текст] / Л. М. Кесельман. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 352 с.

УДК 681.518.5:621.315.24

*С. С. Дементьев¹, П. Д. Кутейников²***ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ЗАЩИЩЕННЫМИ ПРОВОДАМИ**¹Волгоградский государственный технический университет²Национальный исследовательский университет

«Московский энергетический институт»

e-mail: c165tc34@yandex.ru¹, eltech@vstu.ru²

В статье рассматривается проблема эффективной и долговременной эксплуатации воздушных линий электропередачи с защищенными проводами (ВЛЗ). Обосновывается необходимость контроля пропускной способности ВЛЗ. Доказывается влияние перегрева изоляции на износ линии. Предлагается информационно-измерительная система для контроля пропускной способности ВЛЗ по току с «плавающей» исходя из климатических условий уставкой срабатывания: подачи управляющего воздействия или сигнализации. Рассматриваются алгоритм функционирования системы, а также варианты ее технической реализации и применения на существующих и вновь сооружаемых ВЛЗ.

Ключевые слова: воздушные линии с защищенными проводами, самонесущий изолированный провод, пропускная способность линий электропередачи, тепловой режим защищенных проводов, реклоузеры.

*S. S. Dementyev¹, P. D. Kuteynikov²***INFORMATION AND MEASURING SYSTEM FOR MONITORING
THE THROUGHPUT OF OVERHEAD POWER LINES WITH PROTECTED WIRES**¹Volgograd State Technical University²National Research University

«Moscow Power Engineering Institute»

The article deals with the problem of efficient and long-term operation of overhead power lines with protected wires (OHL). The necessity of controlling the throughput of the OHL is substantiated. The effect of insulation overheating on line wear is proved. An information-measuring system for monitoring the throughput of an overhead line by current with a «floating» (taking into account climatic conditions) setting of operation (supplying a control action or signaling) is proposed. The algorithm of the system operation, options for its technical implementation and application of the system on existing and constructed OHL are considered.

Keywords: overhead lines with protected wires, self-supporting insulated wire, capacity of power transmission lines, thermal regime of protected wires, reclosers.

В настоящее время строительство воздушных линий электропередачи, выполненных с применением проводов с защитной изолирующей оболочкой (защищенных проводов), стремительно набирает темпы. В первую очередь, реализация проектов подобных линий, обозначаемых стандартной на сегодняшний день аббревиатурой «ВЛЗ», продиктовано исключительными преимуществами, которые предоставляет данная технология, а именно:

1) исключение вероятности межфазных коротких замыканий при схлестывании проводов друг с другом и попадании на них посторонних предметов, существенное снижение риска замыканий на землю;

2) существенное снижение риска гололедных аварий вследствие практически полного отсутствия условий для намерзания льда и снега на проводе с гладкой поверхностью изоляции;

3) существенное повышение безопасности линии для обслуживающего персонала, гражданского населения, минимизация возможности поражения электрическим током птиц;

4) экономия территории земли, необходимой для отвода под воздушную линию электропередачи, уменьшение соответствующих лесных просек, а также затрат на их периодическую расчистку;

5) возможность сооружения ВЛЗ более высокого класса напряжения в габаритах классической воздушной линии (ВЛ) с неизолированным проводом, рассчитанной на меньшее напряжение.

Резюмируя все вышесказанное, можно отметить следующее: ВЛЗ (рис. 1) обладают существенно более высокой надежностью, нежели привычные линии электропередачи, позволяют снизить эксплуатационные расходы, а также откры-

вают новые возможности по модернизации сетей электроснабжения (для повышения пропускной способности и снижения потерь) путем перевода линий на более высокое напряжение – так, например, ВЛЗ 35 кВ, выполненная проводом СИП-3 (рис. 2), может быть возведена на опорах (в габаритах) ВЛ 10 кВ [1].

Тем не менее повсеместное распространение ВЛЗ ставит новые вопросы, касающиеся специфики их эксплуатации. К числу таковых следует отнести, во-первых, контроль деградации и старения изоляции проводов, используемых на ВЛЗ, ввиду восприимчивости материала изоляции к ультрафиолетовому излучению, а также

объективно более напряженного температурного режима эксплуатации – изменения условий теплообмена с окружающей средой за счет наличия дополнительной оболочки. Вместе с тем следует упомянуть и об общей тенденции к увеличению токовой нагрузки на линии электропередачи, что объясняется: а) возросшими перетоками мощности в сети по причине распространения нетрадиционных источников электроэнергии [7]; б) совокупным повышением уровня электропотребления на фоне снижения количества выбросов парниковых газов и, как инструмента этого, электрификации транспорта и ряда промышленных производств.



Рис. 1. Монтаж ВЛЗ 10 кВ с проводом СИП-3

Таким образом, проблема обеспечения благоприятного температурного режима эксплуатации ВЛЗ является весьма актуальной, в связи с чем необходимо исследование возможности

автоматизации контроля пропускной способности ВЛЗ по нагреву путем разработки и внедрения соответствующей информационно-измерительной системы (ИИС).

Анализ теплового режима изолированного провода

Согласно теории теплообмена, провод в изолирующей оболочке аналогичен трубчатому теплообменнику, при этом в качестве теплоносителя выступает материал проводника, преобразующий электрическую энергию в тепловую при прохождении по нему тока.

Рассмотрим процесс стационарной теплопередачи с поверхности токопроводящей жилы провода, аналогичного по своей конфигурации СИП-3 $1 \times 70 \text{ мм}^2$. Запишем уравнение устано-



Рис. 2. Самонесущий изолированный провод 10-35 кВ

вившегося теплового режима изолированного провода, для чего выделим основные факторы, определяющие нагрев и охлаждение провода.

Нагрев провода обуславливается как протеканием электрического тока (в дальнейшем обозначим выделяемую при этом мощность $P_{эл}$), так и воздействием солнечной радиации (P_c). Мощность тепловыделения, сопровождаемого работой электрического тока, будет рассчитываться с учетом скин-эффекта посредством использования справочных данных, касающихся удельного сопротивления провода переменному току частотой 50 Гц. Нагрев провода, вызванный утечками тока по изоляции, а также стальному сердечнику, будем считать пренебрежимо малым.

Расход тепловой энергии осуществляется за счет наличия потерь теплопередачи через слой изоляции (мощности, расходуемой на нагрев изоляции $P_{из}$), а также сложного теплообмена с поверхности провода – совокупного действия конвективного теплообмена и теплового излучения (мощности теплообмена конвекцией и излучением P_T).

Следовательно, справедливо выражение

$$P_{эл} + P_c = P_{из} + P_T, \quad (1)$$

где по отношению к 1 м провода с учетом формул, приведенных в [2, 5], по аналогии можем записать

$$P_{эл} = 3I^2 R_{20} [1 + \alpha(20 - t_{ж})] \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

$$P_c = \varepsilon_{п} D_{пр} q_c \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

$$P_{из} = k_{из} \pi d_{ж} (t_{ж} - t_{из}), \quad (4)$$

$$P_T = \alpha_T \pi D_{пр} (t_{из} - t_{в}), \quad (5)$$

при этом в свою очередь, в уравнениях (2)–(5) I – величина протекающего тока, А; R_{20} – активное сопротивление токопроводящей жилы при температуре 20 °С, Ом/км; $t_{ж}$, $t_{из}$, $t_{в}$ – температуры жилы, изоляции и окружающего воздуха соответственно, °С; $\varepsilon_{п}$ – коэффициент поглощения солнечной радиации материалом изоляции; $D_{пр}$ – внешний диаметр изолированного провода, мм; q_c – интенсивность солнечной радиации, Вт/м²; $k_{из}$ – коэффициент теплопередачи слоя изоляции, Вт/(м²·°С); $d_{ж}$ – диаметр токопроводящей жилы, мм; α_T – коэффи-

циент теплоотдачи с поверхности изоляции, Вт/(м²·°С).

Коэффициент теплопередачи в (4) есть величина, обратная термическому сопротивлению изоляции $R_{из}$, т. е. [2]

$$k_{из} = \frac{1}{R_{из}},$$

при этом

$$R_{из} = \frac{\Delta \cdot 10^{-3}}{\lambda_{из}},$$

где Δ – толщина слоя изоляции, мм; $\lambda_{из}$ – коэффициент теплопроводности ее материала, Вт/(м·°С).

Очевидно, что при наличии нескольких слоев изоляции, а также различных загрязнений, пленок воды и т. д. коэффициент теплопередачи может быть представлен как

$$k_{из} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n R_{сл.i}},$$

где n – количество следующих друг за другом слоев (стенок) между жилой и воздухом; $R_{сл.i}$ – термическое сопротивление каждого i -го слоя.

Коэффициент теплоотдачи с поверхности изоляции определяется как сумма соответствующих коэффициентов, учитывающих действие конвекции α_k (чаще всего вынужденной конвекции при горизонтальном направлении потока воздуха – ветре) и излучения $\alpha_{л}$ [5]:

$$\alpha_T = \alpha_k + \alpha_{л},$$

при этом

$$\alpha_{л} = \frac{5,67\varepsilon_{и}}{t_{из} - t_{в}} \left[\left(\frac{273 + t_{из}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{в}}{100} \right)^4 \right], \quad (6)$$

где $\varepsilon_{и}$ – постоянная излучения материала изоляции (степень ее черноты).

Таким образом, не вдаваясь в подробности вычисления коэффициента α_k ввиду того, что данный алгоритм подробно излагается в [5] и заключается в итерационных расчетах коэффициентов Рейнольдса, Грасгофа, Нуссельта, исходя из всех приведенных выше выражений, можем записать формулу для определения допустимой величины токовой нагрузки $I_{доп}$ провода в текущих условиях окружающей среды:

$$I_{доп} = \sqrt{\frac{k_{из} \pi d_{ж} (t_{ж} - t_{из}) + \alpha_T \pi D_{пр} (t_{из} - t_{в}) - \varepsilon_{п} D_{пр} q_c \cdot 10^{-3}}{3R_{20} [1 + \alpha(20 - t_{ж})] \cdot 10^{-3}}}. \quad (7)$$

Анализируя полученное уравнение, можно предположить, что предельная величина тока, безопасного для состояния изоляции и токоведущих жил ВЛЗ, варьируется в достаточно широком диапазоне по мере изменения климатических условий – начиная от перемены скорости и направления обдува провода ветром и заканчивая чередованием солнечной активности и температуры воздуха как в масштабе суток (день–ночь), так и времени года.

Для оценки влияния условий окружающей среды на температуру изолированного провода выполним численный анализ его температурного поля с применением соответствующего программного комплекса, моделирующего двумерное поле методом конечных элементов (МКЭ).

Ввиду того, что задаваемые в качестве исходных данных параметры конвективного теплообмена и излучения сами определяются температурой провода, что видно, например, из

выражения (6), данный расчет проводился итерационно, путем поочередного ввода все более точного значения α_t до практически полной сходимости. Геометрия задачи, сетка конечных элементов и результат одного из расчетов – картина распределения температуры в сечении провода при заданных условиях внешней среды и токовой нагрузке ($t_b = 10^\circ\text{C}$, скорость ветра $v = 7\text{ м/с}$, угол атаки $\psi = 90^\circ$ (перпендикулярно оси пролета), $q_c = 500\text{ Вт/м}^2$, $I = 100\text{ А}$) – показаны на рис. 3.

В ходе серии аналогичных расчетов были получены графические иллюстрации (рис. 4) зависимости температуры токоведущей жилы провода от состояния внешней среды (температуры воздуха, скорости направленного по нормали к оси пролета ветрового потока) при потоках солнечного излучения на уровне от 500 (рис. 4, а) до 100 Вт/м^2 (рис. 4, б) при токе $I = 100\text{ А}$.

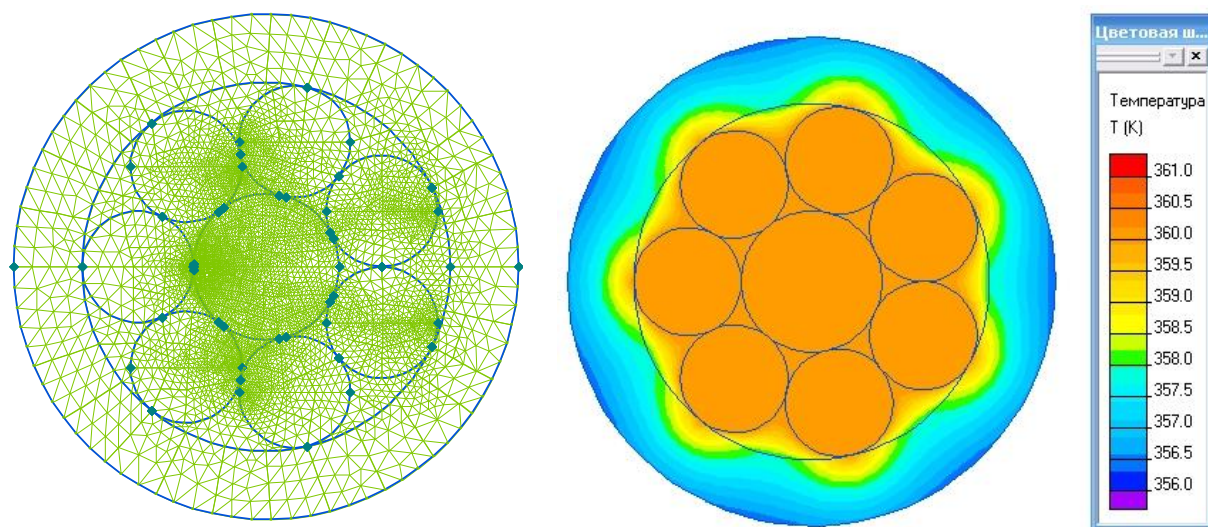


Рис. 3. Анализ распределения нагрева внутри изолированного провода: сетка конечных элементов и картина температурного поля

Как видно из приведенной на рис. 4 серии графиков, *эффективное применение проводов в изоляции на ВЛЗ невозможно без обеспечения мониторинга пропускной способности линии по нагреву в текущих климатических условиях*. Разные условия окружающей среды влияют на то, что линия может быть как недогружена, так и перегружена одинаковой по величине токовой нагрузкой. При этом ресурс изоляции при ее периодических нагревах свыше допустимых 90°C также уменьшается, о чем свидетель-

ствует приводимое в [4] выражение, полученное из уравнения Аррениуса:

$$n = 2^{-\left(\frac{t_{\text{норм}} - t_{\text{пер}}}{\Delta t}\right)},$$

где n – отношение сроков службы изоляции при нормальной температуре $t_{\text{норм}} = 90^\circ\text{C}$ и температуре перегрузки $t_{\text{пер}}$; Δt – величина приращения температуры, вызывающей сокращение срока службы изоляции в 2 раза (для классов изоляции «А», «В», «Н» 8, 8–10, 12 $^\circ\text{C}$ соответственно [4]).

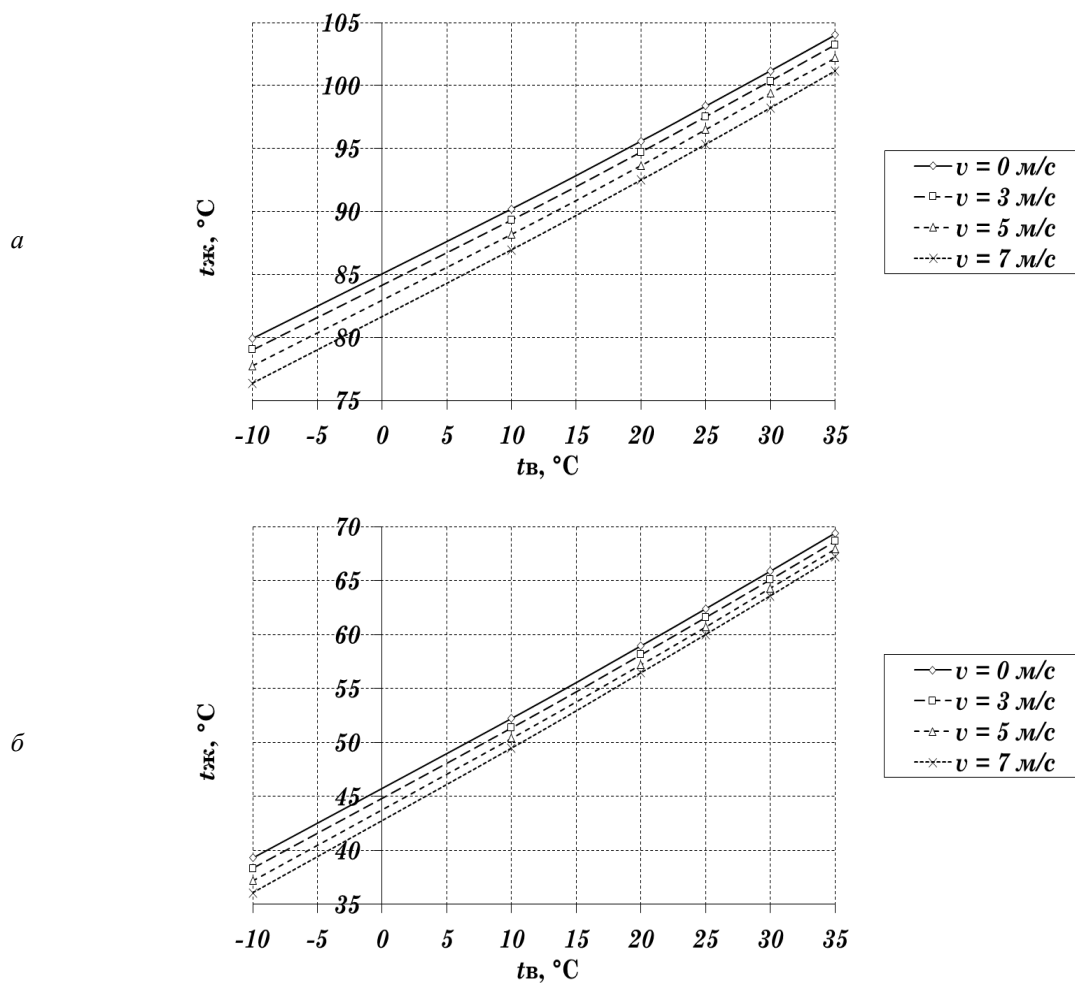


Рис. 4. Графики зависимостей нагрева жилы изолированного провода от температуры окружающей среды при различных условиях охлаждения ветром и интенсивности солнечной радиации от 500 (а) до 100 Вт/м² (б)

Таким образом, используя данную формулу, можем определить, что повышение температуры изоляции сверх допустимой до 101 $^\circ\text{C}$ приводит к уменьшению срока службы провода в 2,59, 2,14 и 1,89 раз для изоляций классов «А», «В», «Н» соответственно. Следовательно, очевидно, что *периодические, частые перегревы жил и изоляции в особенности в жаркое время года, а также на территориях, отличающихся интенсивным солнечным излучением, сильно уменьшают срок эксплуатации ВЛЗ по причине ее износа.*

Мониторинг пропускной способности ВЛЗ

Определение текущей термической стойкости ВЛЗ может осуществляться как в рамках функционирования противоаварийной автоматики, так и системы информирования дежурного персонала компании, эксплуатирующей линию.

В первом случае, оперируя «плавающей» с учетом условий внешней среды уставкой, т. е.

фиксируя и сравнивая текущие значения пропускной способности ВЛЗ и токовой нагрузки, информационно-измерительная и управляющая система с заданной задержкой по времени действует на отключение линии или же не предпринимает управляющего воздействия.

Во втором случае система служит исключительно сигнализирующим о перегрузке линии средством, при этом корректность и своевременность управляющего воздействия определяется исключительно человеческим фактором.

Аппаратная реализация. В обоих перечисленных вариантах конфигурация ИИС с учетом приведенных выше результатов анализа теплового режима работы ВЛЗ должна включать в себя следующие основные компоненты (рис. 5): накладной датчик температуры изоляции 1, датчик температуры окружающей среды 2, датчик солнечной радиации 3, анеморумбометр 4, датчик тока 5 на эффекте Холла или

в виде трансформатора тока, микропроцессорное устройство обработки информации 6 в виде одноплатного компьютера (микроЭВМ), точка доступа *wi-fi* 7 для организации беспроводной локальной сети с целью передачи информации.

Электропитание ИИС может выполняться с применением отбора мощности от линии и/или фотоэлектрических (солнечных) преобразователей, осуществляющих по возможности работу аккумуляторной батареи в буферном режиме.

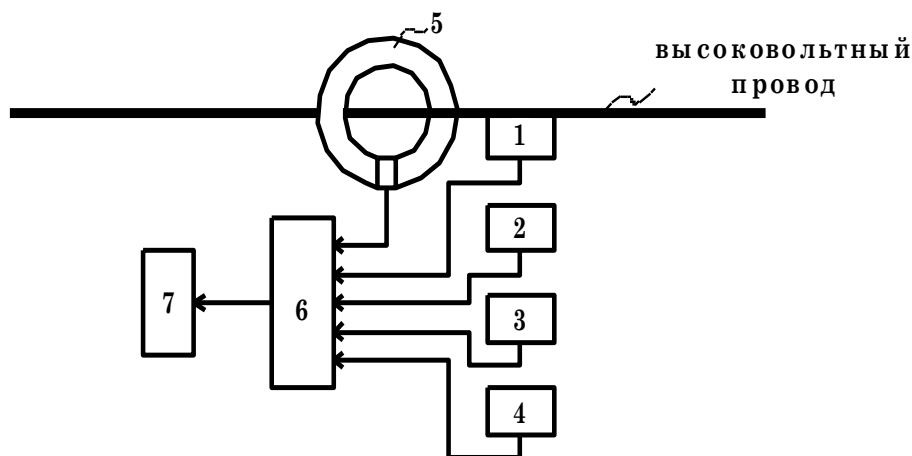


Рис. 5. Структурная схема ИИС

Компоненты ИИС могут быть интегрированы в конструкцию сетевых пунктов секционирования линий с вакуумными выключателями, современных реклоузеров (рис. 6), а также размещаться отдельным блоком на опоре ВЛЗ и вблизи нее или же частично интегрироваться в конструктивные элементы линии, например, опорные изоляторы, изолирующие траверсы (рис. 7).

Управляющая программа. Алгоритм испол-

няемых микроЭВМ операций показан на рис. 8 и легко реализуем на языках C++ и C#. На первом шаге алгоритма выполняется опрос датчиков температуры изоляции ($t_{из}$), окружающей среды ($t_{в}$), датчиков солнечной радиации (q_c), тока (I) и анеморумбометра (скорость v , угол атаки ψ ветра, определяющих коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией α_k).



Рис. 6. Одноопорное размещение реклоузера РВА/TEL 6-10 кВ



Рис. 7. Изолирующая траверса веерного типа на ВЛЗ

Эти данные необходимы для расчета температуры жилы провода $t_{ж}$ по формуле, полученной аналогично выражению (7):

$$t_{ж} = \frac{k_{из}\pi d_{ж}t_{из} + \left[\varepsilon_{п} D_{пр} q_c + 3I^2 R_{20} (20\alpha + 1) \right] \cdot 10^{-3} - \alpha_t \pi D_{пр} (t_{из} - t_{в})}{3I^2 R_{20} \alpha \cdot 10^{-3} + k_{из} \pi d_{ж}}.$$

Если фиксируется превышение температуры жилы величины 90°C (с учетом погрешности косвенного определения $t_{\text{ж}}$), выполняется сигнализация о перегрузке линии, а затем, в случае выполнения системы не только ин-

формационно-измерительной, но и управляющей, с заданной выдержкой времени (варьируемой в зависимости от степени перегрузки) осуществляется подача команды на отключение линии.

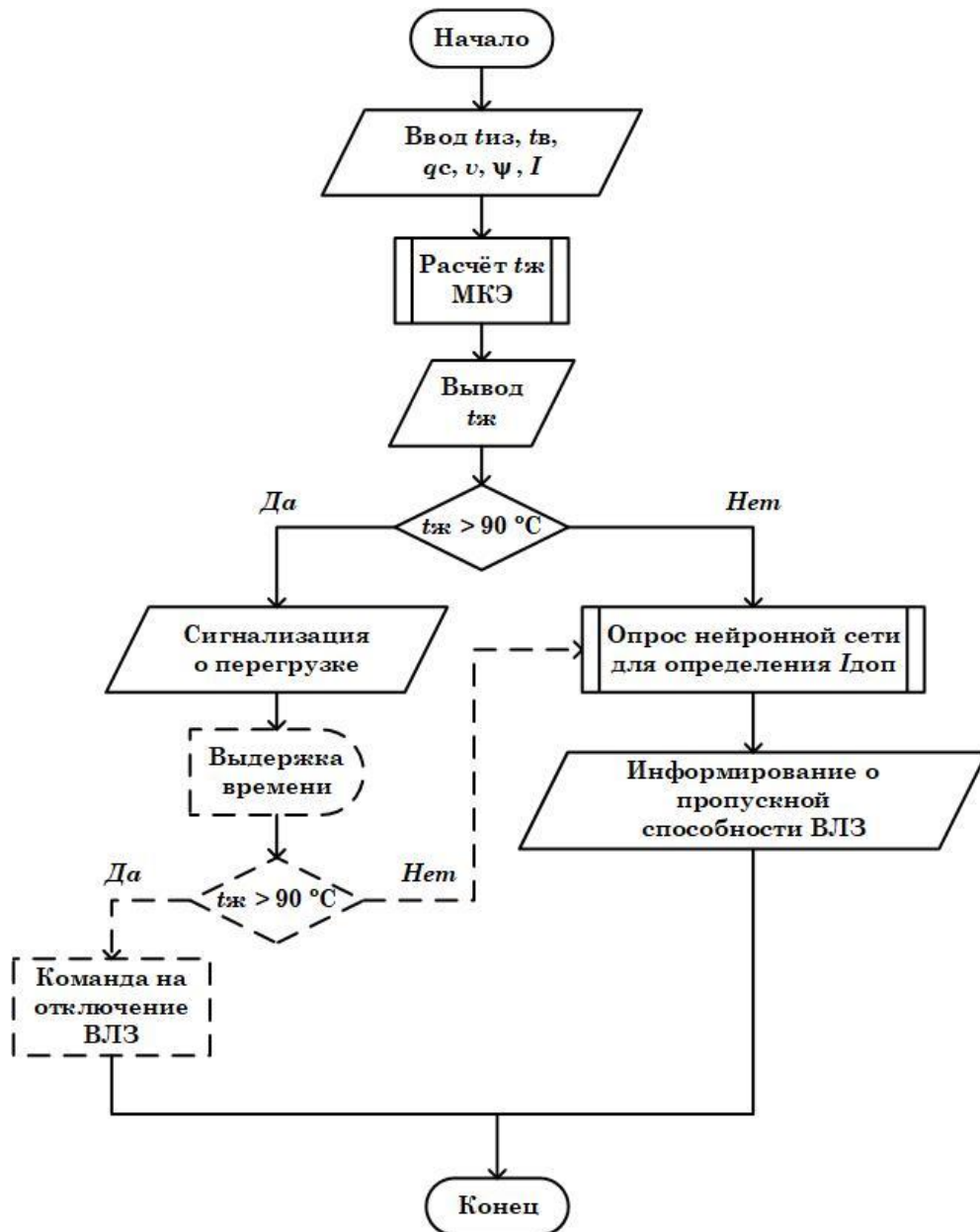


Рис. 8. Алгоритм функционирования ИИС

При нагреве жилы провода менее 90°C выполняется опрос искусственной нейронной сети, выполняющей роль аппроксиматора многомерной функции допустимой величины тока $I_{\text{доп}}(t_{\text{ж}}, t_{\text{в}}, q_{\text{с}}, v, \psi)$, при текущих значениях $t_{\text{в}}, q_{\text{с}}, v, \psi$ и константе $t_{\text{ж}} = 90^{\circ}\text{C}$. В связи с этим отдельно следует упомянуть о том, что непосредственное вычисление значения $I_{\text{доп}}$ по формуле

(7) невозможно ввиду отсутствия данных о величине нагрева изоляции, соответствующей $t_{\text{ж}} = 90^{\circ}\text{C}$ в текущих условиях внешней среды. Следовательно, необходима аппроксимация функции $I_{\text{доп}}(t_{\text{ж}}, t_{\text{в}}, q_{\text{с}}, v, \psi)$ посредством нейронной сети, предварительно «обученной» на полученных расчетным путем примерах соответствия значений тока $I, t_{\text{в}}, q_{\text{с}}, v, \psi$ и $t_{\text{ж}}$. Сфор-

мировав «учебник» для нейронной сети в форме матрицы входных параметров, столбцы которой содержат значения $t_{ж}$, $t_{в}$, q_c , v , ψ , и вектора соответствующих значений тока I и организовав «обучение» (последовательное обновление весов) нейронной сети методом обратного распространения ошибки (описание которого приводится, например, в [3]), становится возможным воспроизведение непрерывной функции тока $I(t_{ж}, t_{в}, q_c, v, \psi)$.

Возможность сколь угодно точной аппроксимации непрерывной функции многих переменных любой сложности с применением простейшей нейронной сети с одним скрытым слоем и сигмовидной функцией активации (элементарного персептрона) утверждается универсальной теоремой аппроксимации, доказанной американским математиком Джорджем Цыбенко в 1989 году [6].

Программная эмуляция нейронной сети осуществляется достаточно просто, при этом файл, содержащий массив предварительно подобранных весовых коэффициентов, может быть загружен в ПЗУ микроЭВМ для обращения к нему управляющей программы, а также возможного обновления.

Полученное значение допустимого в текущих условиях внешней среды тока $I_{доп}$, характеризующего пропускную способность ВЛЗ, позволяет судить о степени недогрузки линии и пределе передаваемой мощности.

Выводы

Эффективная эксплуатация воздушных линий с защищенными проводами невозможна без реализации мониторинга пропускной способности. Величина допустимой токовой нагрузки в значительной мере определяется погодными и климатическими условиями на территории, охватывающей трассу линии. По этой причине указываемые производителями проводов предельные значения токов являются ориентировочными, рассчитанными для усредненных климатических условий (чаще всего при температуре окружающей среды 25 °С, скорости ветра 6 м/с, интенсивности солнечной радиации 1000 Вт/м) и не могут задаваться в ка-

честве уставок для срабатывания коммутационной аппаратуры на отключение ВЛЗ. Одно и то же значение тока, проходящего по линии при различных условиях внешней среды, может характеризовать как режим перегрузки линии, так и ее недогрузку. Таким образом, назначение предлагаемой ИИС заключается в недопущении ускоренного износа ВЛЗ по причине перегрева изоляции и токопроводящих жил, а также более полном использовании потенциала линии в процессе канализации электроэнергии. Предлагаемая ИИС может быть достаточно просто интегрирована в конструкцию классических пунктов секционирования и реклоузеров напряжением 6–35 кВ с целью обеспечения долговременной и надежной эксплуатации линий, выполненных проводами с защитной оболочкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пособие по проектированию воздушных линий электропередачи напряжением 0,38–20 кВ с самонесущими изолированными и защищенными проводами. Книга 4. Система защищенных проводов напряжением 6–20 кВ. редакция 3. Том 1. – СПб.: ENSTO-ОАО «НТЦ электроэнергетики»-РОСЭП, 2008. – 143 с.
2. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / Под ред. Ю. И. Дынерского. – М.: Химия, 1991. – 496 с.
3. Хайкин, С. Нейронные сети. Полный курс : пер. с англ. / С. Хайкин. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
4. Шпиганович, А. Н. Анализ влияния высших гармонических составляющих на безотказность электроизоляционных покрытий / А. Н. Шпиганович, С. В. Довженко // ООО «Тор». – Режим доступа: <https://elcut.ru/publications/shpiganovich.pdf>. – (Дата обращения: 13.02.2022).
5. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий // Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы – Режим доступа: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto_56947007-29.240.55.143-2013.pdf – (Дата обращения: 13.02.2022).
6. Cybenko, G.V. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal function / G.V. Cybenko // Mathematics of Control Signals and Systems. – 1989. – Vol. 2, No. 4. – P. 303–314.
7. Lovrenčić, V. The contribution of conductor temperature and sag monitoring to increased ampacities of overhead lines (OHLs) / V. Lovrenčić, M. Gabrovšek, M. Kovač, N. Gubelj, Z. Šojat, Z. Klobas // PERIODICA POLYTECHNICA. Electrical engineering and computer science. – 2015. – Vol. 59, No. 3. – P. 70–77.

УДК 608.2

А. А. Шилин¹, Н. С. Кузнецова², Д. Н. Авдеюк³, В. А. Артюмаков⁴

АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ РЕФЛЕКТОМЕТРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: shilin.jr@gmail.com¹, artex23@yandex.ru², avdprod@yandex.ru³, eltech@vstu.ru⁴

При проведении аварийно-восстановительных работ соответствующей бригадой субъекта электросетевой организации возникает проблематика оперативного определения места технологического нарушения на линии электроснабжения ввиду большой ее протяженности и труднодоступности из-за особенностей ландшафта местности и (или) климатических условий. В целях сокращения сроков проведения восстановительных работ используется рефлектометр для определения места повреждения на линии электропередачи. Имеющиеся рефлектометры на рынке имеют существенную погрешность, что не позволяет свести время восстановления электроснабжения к минимуму. В работе рассматривается процесс приведения сигнала рефлектометра к одному виду используя времяимпульсный метод преобразования величины в код.

Ключевые слова: рефлектометр, дискретизация, восстановительные работы.

А. А. Shilin¹, N. S. Kuznetsova², D. N. Avdeyuk³, V. A. Artyumakov⁴

ANALYSIS OF INSTRUMENTAL ERROR OF A REFLECTOMETER TO DETERMINE THE LOCATION OF DAMAGE TO AN OVERHEAD POWER LINE

Volgograd State Technical University

When carrying out emergency recovery work by the relevant team of the subject of the electric grid organization, the problem arises of promptly determining the location of a technological violation on the power supply line due to its large length and inaccessibility due to the terrain and (or) climatic conditions. In order to reduce the time for restoration work, a reflectometer is used to determine the location of damage on the power line. The available reflectometers on the market have a significant error, which does not allow minimizing the recovery time of power supply. The paper considers the process of bringing the reflectometer signal to one form using the time-pulse method of converting a value into a code.

Keywords: reflectometer, discretization, restoration work.

Метод импульсной рефлектометрии, используемый в работе устройства рефлектометра, включает в себя процесс дискретизации исследуемого сигнала, а именно процесс регистрации значения сигнала через определенные промежутки времени.

На рис. 1 изображена временная диаграмма сигнала рефлектометра с последующим представлением процесса дискретизации. Под процессом дискретизации понимается использование времяимпульсный метод преобразования величины в код. Схема из рис. 1 показывает формирование прямоугольного сигнала, начало которого соответствует отправке зондирующего импульса в исследуемую линию, а окончательный фронт прямоугольного сигнала формируется по временному промежутку согласно времени возврата отраженного сигнала. После чего получившийся прямоугольный сигнал заполняется тактами, у которых длительность импульса значительно меньше исследуемого.

Для схемы устройства, указанной на рис. 1, запишем:

$$N = T/T_0 = T f_0, \quad (1)$$

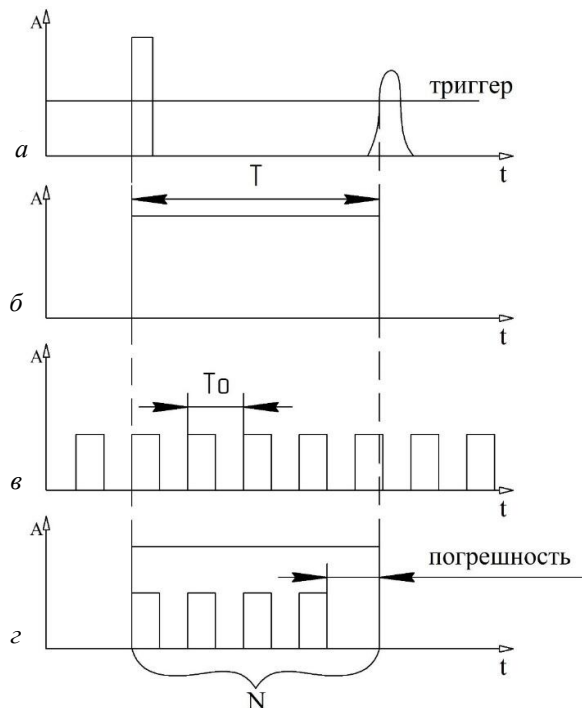


Рис. 1. Время-импульсная диаграмма процесса образования погрешности дискретизации:

а – сигнал, получаемый в процессе работы рефлектометра;
б – выделение полезного сигнала; в – тактовые импульсы;
г – процесс заполнения тактовыми импульсами полезного сигнала

откуда

$$T = N/f_0. \quad (2)$$

Представим выражение для относительной погрешности в виде:

$$\delta = \Delta T/T = \pm(\delta_{f_0} + 1/N), \quad (3)$$

или с заменой N на идеальное выражение (1):

$$\delta = \pm(\delta_{f_0} + 1/f_0 T). \quad (4)$$

Схема дает возможность определять также и частоту входного сигнала:

$$f = 1/T. \quad (5)$$

Рефлектометр отправляет в исследуемой линии зондирующий импульс низкой частоты (примем $f = 10$ Гц). Частота дискретизации известных рефлектометров $f_0 = 160$ МГц. Погрешность частоты примем $\delta_{f_0} = 10^{-6}$ %. Подставляя значения в вышеуказанные формулы, получаем:

$$T = 1/f = 0,1 \text{ с}$$

$$N = f_0 T = 160 \cdot 10^6 \cdot 0,1 = 160 \cdot 10^5$$

Определим погрешность:

$$\delta = \pm \left(10^{-6} + 1/160 \cdot 10^5 \right) \approx \pm 6,3 \cdot 10^{-8} \%$$

На рис. 2 изображено устройство при помощи структурной схемы:

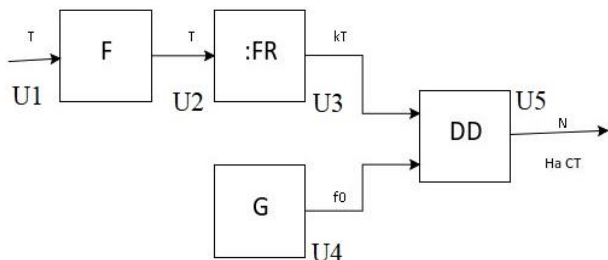


Рис. 2. Структурная схема устройства дискретизации исследуемого сигнала

С формирователя импульсов F сигнала прямоугольной формы через делитель частоты :FR, который делит в k раз частоту, подается сигнал с периодом kT, на один из двух входов логического элемента DD. На другой вход подается импульс, вырабатываемый генератором импульсов G. На выходе логического элемента DD образуется сигнал, переходы которого от 0 к 1 подсчитываются счетчиком импульсов CT.

С уменьшением периода, как видно из (4), аддитивная составляющая погрешности растет. Этот рост можно снизить, благодаря делителю частоты :FR (умножителем периода). В этом случае без учета погрешностей получим

$$N = kT/T_0 = kf_0 T, \quad (6)$$

при этом относительная погрешность определяется выражением:

$$\delta = \pm(\delta_{f_0} + 1/kf_0 T). \quad (7)$$

Коэффициент деления частоты k в (6) и (7) может быть выбран равным 10; 100 и т. д.

Если период T изменяется, то в данном случае результат измерения выражает среднее значение из k периодов, а быстродействие прибора снижается в k раз и определяется значением kT [1].

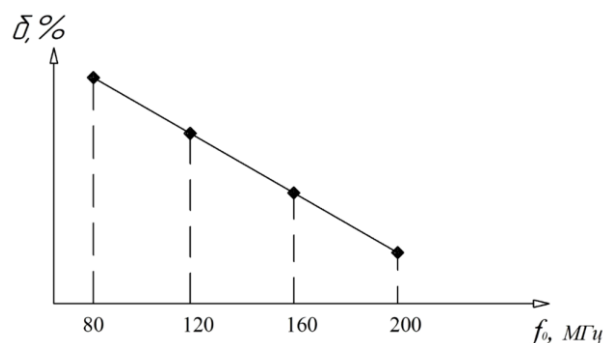


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения от частоты дискретизации

Из рис. 3 видно, что при повышении частоты дискретизации уменьшается погрешность определения расстояния до места повреждения воздушной линии электропередач, а именно уменьшается инструментальная погрешность рефлектометра.

Уменьшение погрешности обусловлено увеличением количества тактовых импульсов, которые могут быть посчитаны в пределах выделенного полезного сигнала. На рис. 4 показана разница с рис. 1 влияния количества тактовых импульсов на изменение погрешности.

Из рис. 4 видно, что при повышении количества тактов, вырабатываемых тактовым генератором, можно добиться уменьшения погрешности ($\delta \rightarrow 0$).

В случае отсутствия синхронизации начала полезного сигнала и начала первого тактового импульса, открывающий отсчет, необходимо определить математическое ожидание погрешности дискретизации

$$m(\Delta_\delta) = 0 \quad (8)$$

и дисперсию, которая определяется выражением

$$D(\Delta_\delta) = \int_{-0,5q}^{0,5q} \Delta_\delta^2 \frac{1}{q} d(\Delta_\delta) \quad (9)$$

$$\delta(\Delta_\delta) = \sqrt{D(\Delta_\delta)} \quad (10)$$

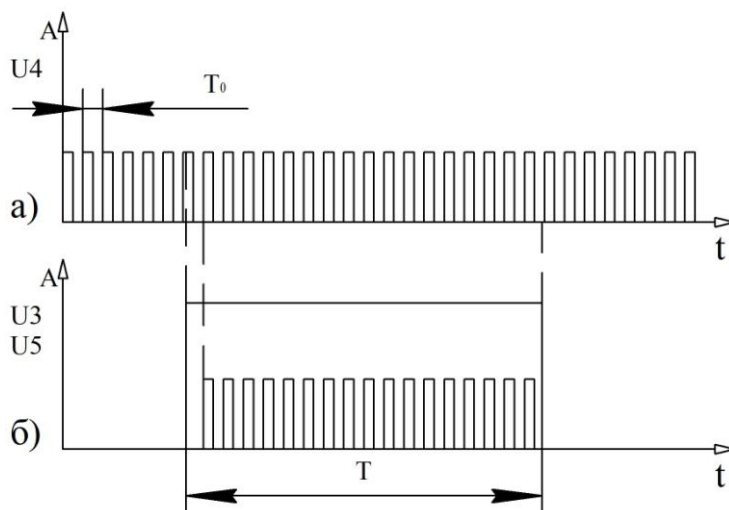


Рис. 4. Время-импульсная диаграмма измерения длительности импульса:
 а – такты, вырабатываемые тактовым генератором; б – заполнение тактами полезного сигнала

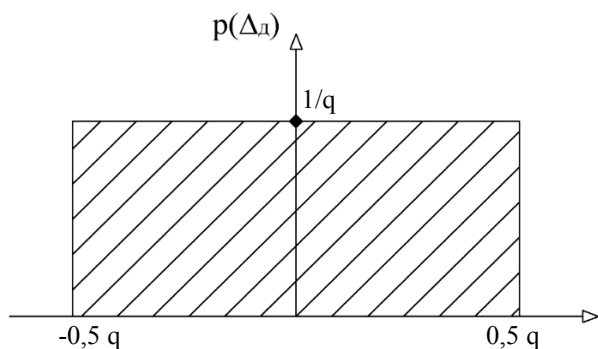


Рис. 5. Плотность распределения погрешности дискретности

Таким образом, погрешность от отсутствия синхронизации составит $\pm 0,5q$ и погрешность дискретизации – $\pm 0,5q$ (рис. 5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кончаловский, В. Ю. Цифровые измерительные устройства : учеб. пособие для вузов по спец. «Информ.-измер. Техника» / В. Ю. Кончаловский. – М.: Энергоатомиздат. – 1985.
2. Кнорринг, В. Г. Цифровые измерительные устройства. Теоретические основы цифровой измерительной техники: учебное пособие / В. Г. Кнорринг. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.
3. Автоматизация измерений и контроля электрических и неэлектрических величин: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во стандартов, 1987

УДК 621.31

И. А. Коптелова¹, А. С. Жбанников²

РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: shilina@yandex.ru¹, sasha022374@yandex.ru²

В статье рассматриваются возможности морфологического синтеза в рамках выбора метода контроля температуры трансформаторной подстанции; указываются основные проблемы действующих методов; показано развитие данного направления исследований.

Ключевые слова: надежность, температурные режимы, трансформатор, морфологический синтез.

I. A. Koptelova¹, A. S. Zhbannikov²

DEVELOPMENT OF A HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR MONITORING THE TEMPERATURE REGIMES OF TRANSFORMERS OF ELECTRICAL NETWORKS

Volgograd State Technical University

The article discusses the possibilities of morphological synthesis in the framework of choosing a method for controlling the temperature of a transformer substation; the main problems of the current methods are indicated; the development of this area of research is shown.

Keywords: reliability, temperature conditions, transformer, morphological synthesis.

Основной проблемой в электроэнергетике является низкая надежность энергообеспечения. Для повышения надежности необходимо внедрять диагностические устройства системы энергосбережения. Из проведенного анализа следует, что элементами с низкой надежностью являются воздушные линии электропередач и подстанции. Основным признаком аварийного и предаварийного режимов трансформаторной подстанции является температура трансформаторной подстанции. Длительная эксплуатация трансформаторов без надлежащей диагностики технического состояния может привести к их выходу из строя и значительному экономическому ущербу. Значительное количество трансформаторов в энергетических компаниях России уже превысили срок их службы в 25 лет, что было определено стандартом ГОСТ 11677-85.

Частыми причинами аварийного режима является короткое замыкание в обмотках трансформатора, контактные соединения проводов трансформатора, которые являются источником температуры при ослаблении контактов и их окислении. Выявление этих причин на ранней стадии позволит предотвратить аварийные режимы.

Основными задачами диагностики подстанции являются: выявление неисправностей и повреждений, определение целесообразности продления срока службы без ремонта, оценка оставшегося срока службы и оценка состояния станций, определение объема ремонта, при необходимости, и создание рекомендаций по продлению срока службы. Кроме того, использование методов диагностики позволяет оценить состояние целых подстанций и, следовательно, классифицировать трансформаторы по состоянию, что, в свою очередь, может снизить эксплуатационные и ремонтные расходы.

В настоящее время для этой цели используются тепловизоры, которые регистрируют температурное поле поверхности трансформатора и соединений. По температурному полю определяется вид неисправности. Основным недостатком такого метода диагностики является сравнительно высокая стоимость тепловизора, не непрерывный контроль режимов, причем контроль должен выполняться в темное время суток для исключения фоновых засветок. Также недостатком является невысокая точность контроля. Это обусловлено тем, что в качестве входной информации в тепловизор является поток излучений, который зависит от тем-

пературы тела и коэффициента излучательной способности материала. Причем значение этого коэффициента заранее неизвестно и теоретически не высчитывается. Коэффициент определяется на основании эксперимента. Это обуславливает методическую погрешность коэффициента, который выставляется заранее и примерно.

Сама информация с тепловизора является избыточной, то есть для диагностики нет необходимости контролировать всю поверхность трансформатора. Избыточная информация усложняет работу цифровых систем, поэтому предлагается использовать контактные методы контроля на основе термопар или терморезисторов. Для определения координат установки датчиков предварительно, с помощью тепловизора, определяются участки поверхности, которые наиболее подвержены нагреванию.

Устанавливаются несколько датчиков на поверхности трансформатора. Микроконтроллер производит опрос датчиков и передает информацию на диспетчерский пункт. Микроконтроллер может также самостоятельно принимать решение о техническом состоянии трансформатора. Этот метод контроля значительно дешевле и более надежно и точно определяет техническое состояние.

На основе оценки всех существующих датчиков, нужно выделить основные пункты, которым должен соответствовать датчик, который бы измерял температура трансформатора:

- 1) точность;
- 2) простота реализации;
- 3) время работы;
- 4) высокое быстродействие датчика;
- 5) низкая стоимость.

Чтобы выбрать технические решения из множества вариантов и с множеством параметров и характеристик, целесообразно использовать методы анализа функциональных затрат (ФСА), которые по сути являются морфологическим методом.

Индивидуальные экспертные методы, которые дополняются определенной математической обработкой результатов, включают в себя метод парного сопоставления и метод расстановки приоритетов. Самым простым и наиболее широко используемым методом является парное сравнение (например, значение свойств, параметров, функций, элементов). Результаты такого обследования представлены в соответствующих матрицах.

На основе вышеперечисленного и с учетом того, что проектируемая система должна работать с силовыми трансформаторами, выбраны основные параметры для морфологического синтеза:

- d_1 – точность,
- d_2 – доступность контроля поверхностей,
- d_3 – ограничение по времени контроля (день/ночь),
- d_4 – влияние электромагнитных и оптических помех,
- d_5 – инвестиционные затраты,
- d_6 – трудоемкость монтажа и эксплуатации.

В поставленной задаче в столбец и строку (табл. 1) записываются параметры термопреобразователей. На пересечении столбца и строки ставится номер того параметра, который оказывается более важным при попарном сравнении.

Таблица 1

Сравнение параметров

Индекс свойств	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	Количество предпочтений
d_1	-	2	2	4	1	1	2
d_2	2	-	2	4	5	6	2
d_3	2	2	-	4	3	3	2
d_4	4	4	4	-	5	4	4
d_5	1	5	3	5	-	5	3
d_6	1	6	3	4	5	-	1

Из результатов анализа следует, что наиболее важным критерием отбора является влияния магнитных и оптических помех, поскольку

этот параметр определяет, насколько верны будут результаты, получаемые при измерениях.

Квадратную матрицу смежности может строиться и по другому правилу: знаки соотношений $>, =, <$ заменяются соответственно коэффициентами предпочтениями 1,5; 1,0; 0,5. Это правило более точно описывает соотношение предпочтений.

Рассмотрим методику выбора термопреобразователя с учетом частных критериев $d_1, d_2 \dots d_6$ из четырех вариантов X_1, X_2, X_3, X_4 . Каждому варианту соответствует тип преобразователя, а именно X_1 – пирометр, X_2 – тепловизор, X_3 – термопара, X_4 – термосопротивление.

Оценки по вышеуказанному способу проводится с использованием комплексных приоритетов $B_{i \text{ ком}}$ по формуле

$$B_{i \text{ ком}} = \sum_{j=1}^n \beta'_j B'_{ij}, \quad (1)$$

где β'_j – относительный приоритет (значимость) j -го критерия; B'_{ij} – относительный приоритет i -го варианта по j -му критерию; n – количество критериев ($n = 6$).

На втором этапе для каждого из критериев создаются квадратные матрицы (табл. 2 – табл. 7). Номер варианта указан в столбцах и строках, а на пересечении – коэффициенты (1,5; 1,0; 0,5), которые указывают, какой вариант предпочтительнее в соответствии с этим критерием.

Следующим шагом является последовательное определение абсолютных приоритетов вариантов B_{ij} , а затем относительных B'_{ij} , которые рассчитываются в долях единицы.

Таблица 2

Матрица смежности по 1-му критерию

Индекс варианта	Точность				Σ	B_{i1}	B'_{i1}
	X_1	X_2	X_3	X_4			
X_1	1,0	0,5	0,5	0,5	2,5	9,25	0,152893
X_2	1,5	1,0	1,0	1,0	4,5	17,25	0,285124
X_3	1,5	1,0	1,0	0,5	4,0	14,75	0,243802
X_4	1,5	1,0	1,5	1,0	5,0	19,25	0,318181
Всего	–	–	–	–	–	60,50	1

Таблица 3

Матрица смежности по 2-му критерию

Индекс варианта	Доступность контроля поверхностей				Σ	B_{i2}	$B'_{i2\text{э}}$
	X_1	X_2	X_3	X_4			
X_1	1,0	1,0	0,5	0,5	3,0	11,00	0,183333
X_2	1,0	1,0	0,5	0,5	3,0	11,00	0,183333
X_3	1,5	1,5	1,0	1,0	5,0	19,00	0,316667
X_4	1,5	1,5	1,0	1,0	5,0	19,00	0,316667
Всего	–	–	–	–	–	60,00	1

Таблица 4

Матрица смежности по 3-му критерию

Индекс варианта	Ограничение по времени контроля (день/ночь)				Σ	B_{i3}	B'_{i3}
	X_1	X_2	X_3	X_4			
X_1	1,0	1,0	0,5	0,5	3,0	11,00	0,183333
X_2	1,0	1,0	0,5	0,5	3,0	11,00	0,183333
X_3	1,5	1,5	1,0	1,0	5,0	19,00	0,316667
X_4	1,5	1,5	1,0	1,0	5,0	19,00	0,316667
Всего	–	–	–	–	–	60,00	1

Таблица 5

Матрица смежности по 4-му критерию

Индекс варианта	Влияние электромагнитных и оптических помех				Σ	B_{i4}	B'_{i4}
	X_1	X_2	X_3	X_4			
X_1	1,0	1,5	0,5	0,5	3,5	13,25	0,210317
X_2	0,5	1,0	1,0	1,0	3,5	14,25	0,226190
X_3	1,5	1,0	1,0	1,0	4,5	17,75	0,281746
X_4	1,5	1,0	1,0	1,0	4,5	17,75	0,281746
Всего	–	–	–	–	–	63,00	1

Таблица 6

Матрица смежности по 5-му критерию

Индекс варианта	Инвестиционные затраты				Σ	B_{i5}	B'_{i5}
	X_1	X_2	X_3	X_4			
X_1	1,0	1,5	0,5	0,5	3,5	12,25	0,192913
X_2	0,5	1,0	0,5	0,5	2,5	13,75	0,216535
X_3	1,5	1,5	1,0	1,5	5,5	21,25	0,334646
X_4	1,5	1,5	0,5	1,0	4,5	16,25	0,255906
Всего	–	–	–	–	–	63,50	1

Таблица 7

Матрица смежности по 6-му критерию

Индекс варианта	Трудоемкость монтажа и эксплуатации				$\Sigma\text{э}$	B_{i6}	B'_{i6}
	X_1	X_2	X_3	X_4			
X_1	1,0	1,0	0,5	0,5	3,0	11,00	0,184874
X_2	1,0	1,0	0,5	0,5	3,0	11,00	0,184874
X_3	1,5	1,5	1,0	1,5	5,5	21,25	0,357143
X_4	1,5	1,5	0,5	1,0	4,5	16,25	0,273109
Всего	–	–	–	–	–	59,50	1

Далее определяются значимости критериев (табл. 8). Рассчитанные относительные приори-

теты β'_j являются коэффициентами значимости критериев.

Таблица 8

Матрица смежности по параметрам

Индекс критерия	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	Σ	β_j	β'_j
d_1	1,0	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	5,5	29,75	0,139181
d_2	1,5	1,0	1,5	0,5	0,5	1,5	6,5	36,75	0,171930
d_3	1,5	0,5	1,0	0,5	1,5	1,5	6,5	35,75	0,167251
d_4	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	8,5	48,00	0,224561
d_5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,0	1,5	5,5	43,75	0,204678
d_6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	3,5	19,75	0,092398
Всего	-	-	-	-	-	-	-	213,75	1

Рассчитанные относительные приоритеты полностью соответствуют ранее полученным (табл. 3).

Комплексный показатель (приоритет) затем рассчитывается для каждого из вариантов $B_{i\text{ком}}$ (табл. 9), который определяется как сумма про-

изведений относительных приоритетов объекта и относительных приоритетов критериев. В последней строке указываются комплексные приоритеты, полученные путем сложения продуктов элементов первого столбца и следующих столбцов таблицы.

Таблица 9

Матрица приоритетов по каждому варианту

Критерии значимости β'_j	Относительный приоритет по каждому варианту			
	X_1	X_2	X_3	X_4
0,139181	0,152893	0,285124	0,243802	0,318181
0,171930	0,183333	0,183333	0,316667	0,316667
0,167251	0,183333	0,183333	0,316667	0,316667
0,224561	0,210317	0,226190	0,281746	0,281746
0,204678	0,192913	0,216535	0,334646	0,255906
0,092398	0,184874	0,184874	0,357143	0,273109
Комп. приор.	0,181715	0,214062	0,306103	0,292574

Вариант, получивший наивысшую оценку $B_{i\text{ком}}$, можно считать лучшим из всех. В нашем случае это $B_{3\text{ком}} = 0,306103$. Поэтому преобразователь под номером 3 (вариант ХЗ – термопара) считается наилучшим.

Проверить полученные результаты можно, применив автоматизированную систему морфологического синтеза *PairComp* (рис. 1). Исходной информацией для программы в рас-

смотренном примере являются типы термопреобразователя, критерии выбора и оценки эксперта. Для вычисления векторов приоритетов критериев и альтернатив по критериям и поиска оптимального решения необходимо заполнить матрицы парных сравнений. Для оценки предпочтительности критериев и альтернатив по критериям используется девятибалльная шкала отношений.

Настройка

Список блоков проектируемого объекта

Количество блоков: 1

№	Наименование
1	термопреобразователь

Альтернативы реализации блока

Блок: термопреобразователь

Количество вариантов: 4

№	Наименование
1	пирометр
2	тепловизор
3	термопара
4	термосопротивление

Используемая шкала оценок

Количество градаций шкалы: 9

Предпочтения	прямо	обратно
1. объекты одинаково важны	1	1
2. промежуточное значение	2	0,5
3. объект немного важнее другого	3	0,333
4. промежуточное значение	4	0,25
5. объект существенно важнее другого	5	0,2
6. промежуточное значение	6	0,167
7. объект явно важнее другого	7	0,143
8. промежуточное значение	8	0,125
9. объект абсолютно важнее другого	9	0,111
0. объекты несравнимы	0	0

Критерии выбора альтернатив блока

Блок: термопреобразователь

Количество критериев: 6

№	Наименование
1	точность
2	доступность контроля поверхностей
3	ограничение по времени контроля
4	влияние электромагн. и оптических помех
5	инвестиционные затраты
6	трудоемкость монтажа и эксплуатации

Рис. 1. Окно настроек автоматизированной системы морфологического синтеза

Метод попарного сравнения

Определение коэффициентов значимости критериев выбора блока № 1 термопреобразователь

	крит. 1	крит. 2	крит. 3	крит. 4	крит. 5	крит. 6
1. точность	1	0,5	0,5	0,5	2,0000	2,0000
2. доступность контроля поверхностей	2,0000	1	2,0000	0,5	0,5	2,0000
3. ограничение по времени контроля	2,0000	0,5	1	0,5	2,0000	2,0000
4. влияние электромагн. и оптических помех	2,0000	2,0000	2,0000	1	2,0000	2,0000
5. инвестиционные затраты	0,5	2,0000	0,5	0,5	1	2,0000
6. трудоемкость монтажа и эксплуатации	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1

Определить неизвестные коэффициенты

Согласованность: 0,0826

Далее >>

Рис. 2. Попарное сравнение критериев задачи

Метод попарного сравнения

Определение абсолютных приоритетов альтернатив реализации блока № 1 термопреобразователь

Критерий выбора: точность

	альт. 1	альт. 2	альт. 3	альт. 4
1. пирометр	1	0,5	0,5	0,5
2. тепловизор	2,0000	1	1,0000	1
3. термопара	2,0000	1	1	0,5
4. термосопротивление	2,0000	1,0000	2,0000	1

Определить неизвестные коэффициенты

Согласованность: 0,0225

Далее >>

Рис. 3. Попарное сравнение альтернатив по первому критерию

Аналогично первому критерию заполняются остальные матрицы парных сравнений. По-

сле заполнения всех матриц, выводится краткий результат работы программы (рис. 4).

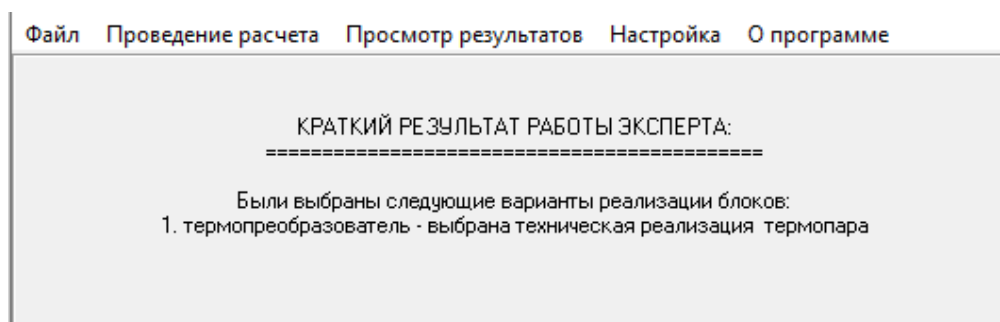


Рис. 4. Вывод краткого результата работы программы

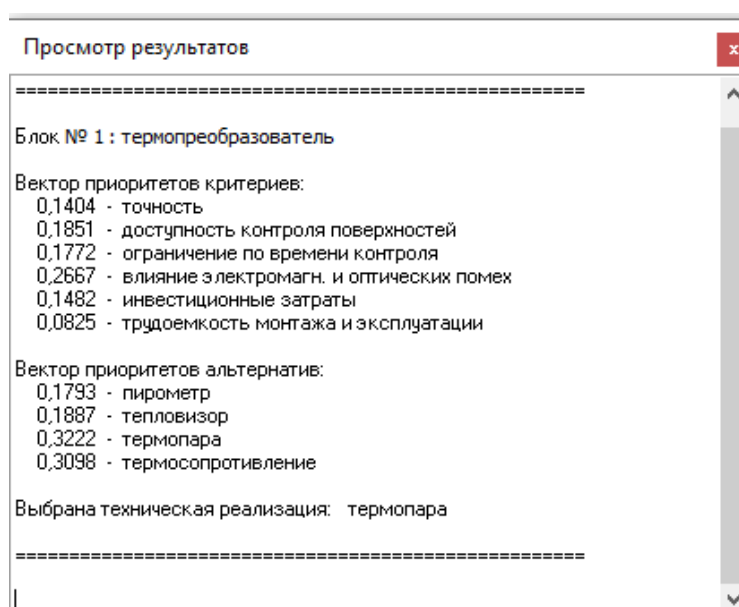


Рис. 5. Окно просмотра результатов работы программы

Рассмотренная автоматизированная система морфологического синтеза позволяет быстро, достоверно и обоснованно выбрать лучший вариант решения из предложенных. Благодаря этому за конечное время можно проанализировать огромное количество решений и остановиться на лучшем. Как видно из полученных результатов, выбрана одна и та же техническая реализация.

С помощью метода морфологического синтеза можно создать наиболее оптимальную конструкцию системы контроля температурных режимов.

Из всего этого можно сделать следующие выводы. Если сравнивать контактный и бесконтактный методы, то для достижения точности при бесконтактном методе требуется идеализирования многих факторов, и, если определенные факторы можно соблюсти или максималь-

но снизить их влияние на результаты измерения, то на другие факторы никак нельзя повлиять. Из-за чего точность бесконтактного метода нестабильна, что усложняет оценку показаний.

Если же рассматривать контактный метод, то, в этом случае, на результат влияет гораздо меньше факторов. Точность показаний температуры у терморезисторов намного выше, чем у термопар. Материал, из которого изготовлены терморезистивные датчики, со временем портится, а термопары могут эксплуатироваться намного дольше. Кроме того, при контроле температуры подстанции необязательно иметь такую высокую точность терморезистивных датчиков. Методы определения температуры датчиков различны, каждый тип требует свой собственный прибор или контроллер, который используется для управления измеренными значениями.

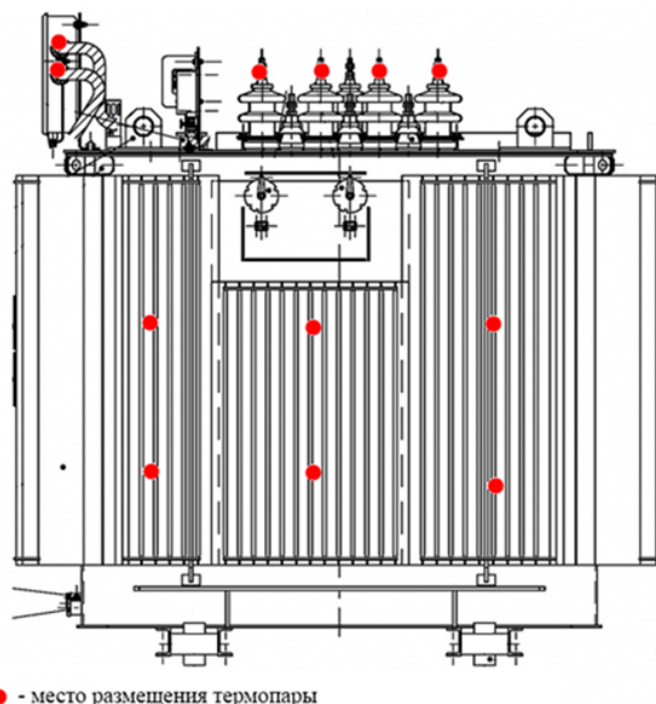


Рис. 6. Места размещения термодатчиков

На трансформаторе нужно выявить основные точки перегрева, которые требуется контролировать. К этим точкам будут прикреплены термодатчики. Еще следует установить термодатчик для измерения верхних слоев масла.

В этой системе используются термодатчики, передающие температуру самого объекта, а не его теплового поля, в отличие от бесконтактного метода, где используется дорогостоящее оборудование, такое как тепловизоры. К тому же термодатчики просты в обслуживании и не нуждаются в дополнительном источнике энергии, а информацию, получаемую с них, намного проще обработать и передать в диспетчерский пункт.

Эта система конкурентоспособна благодаря своей низкой стоимости и высокой надежности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ 11677-75 ; введ. 24.09.85. – Москва : Министерство электротехнической промышленности, 1986. – 48с.
2. Алексеев, Б. А. Крупные силовые трансформаторы: контроль состояния в работе и при ревизии / Б. А. Алексеев. – Москва : Энергопроцесс, 2010. – 88с.
3. Крамарухин, Ю. Е. Приборы для измерения температуры / Ю. Е. Крамарухин. – Москва : Машиностроение, 1990. – 208с.
4. Тепловизионная диагностика подстанций // Тепловизоры. – Режим доступа: <https://teplovizo.ru/teplovizionnaya-diagnostika-podstanciy.htm> (дата обращения. 14.04.20).
5. Бабокин, Г. И. Основы функционирования систем сервиса. В 2 ч. Часть 2 : учебник для вузов / Г. И. Бабокин,

А. А. Подколзин, Е. Б. Колесников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Юрайт, 2020. – 407 с.

6. Климов, А. Г. Диагностическое оборудование и средства неразрушающего контроля для объектов энергетики / А. Г. Климов, В. Р. Козлов. – Москва : Энергетик, 2013. – 42 с.

7. Solar shield: Forecasting and mitigating space weather effects on high-voltage power transmission systems / A. Pulkkinen, M. Hesse, L. Van der Zel, B. Damsky, F. Policelli, D. Fugate, W. Jacobs // Natural Hazards. – [S.I.] : Springer, 2010. – Vol 53. – P. 333 – 345.

8. Elovaara, J. Finnish experience with grid effect of gic's / J. Elovaara // Space Weather. Astrophysics and Space Science Library / ed. by J. Liliensten. – Dordrecht : Springer, 2007. – Vol 344. – P. 311 – 326.

9. Present day challenges in understanding the geomagnetic hazard to national power grids / A. W. P. Tyomson, C. T. Gaunt, P. Cilliers, J. A. Wild, D. Opperman, L. A. McKinnell, P. Kotze, C. M. Ngwira, S. I. Lotz // Advances in Space Research / ed. by A. Belekahi [et al.]. – Amsterdam : Elsevier, 2010. – Vol 45. – P. 1182 – 1190.

10. Badescu, V. Power Engineering : Advances and Challenges. Part B : Electrical Power / V. Badescu, G. C. Lazaroiu, L. Barelli. – Boca Raton : Taylor & Francis Group, 2019. – 436 p.

11. Средства электрических измерений и методы контроля температуры электроустановок // Электрические сети. – Режим доступа: <https://leg.co.ua/info/podstancii/sredstva-elektricheskikh-izmereniy-i-metody-kontrolya-temperatury-elektroustanovok.html> (дата обращения. 12.04.20).

12. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. – Москва: ИД Спектр, 2009. – 544с.

13. Шилин, А. Н. Морфологический синтез оптико-электронных систем измерения размеров нагретых деталей / А. Н. Шилин, И. А. Коптелова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2003. - № 3. - С. 51 – 61.

14. *Лифиц, И. М.* Стандартизация, метрология и сертификация: учебник / И. М. Лифиц. – 7-е изд., перераб. и доп. – Москва: Юрайт-Издат, 2007. – 399с.

15. *Иванова, Г. М.* Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство МЭИ, 2005. – 460 с.

16. *Леснов, В. В.* Комплекс интеллектуальных датчи-

ков для контроля промышленных объектов / В. В. Леснов, В. М. Гладченко // Датчики и системы. – 2007.

17. *Гурвич, И. С.* Защита ЭВМ от внешних помех / И. С. Гурвич. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.

18. *Коптелова, И. А.* Автоматизация концептуального проектирования оптико-электронных систем измерения размеров нагретых деталей / И. А. Коптелова, В. В. Будько // Приборы. – 2006. – № 4. – С. 32–37.

УДК 621.433.04:504

А. И. Нефедьев¹, В. Г. Шаронова², В. Г. Гусев¹

КОНДЕНСАТОРНО-ТРАНЗИСТОРНАЯ СИСТЕМА ЗАЖИГАНИЯ ГАЗОВОГО ДВС

¹Волгоградский государственный технический университет

²Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

e-mail: nefediev@rambler.ru

Повышение надежности работы системы зажигания газового двигателя зависит от качества и надежности искрообразования в цилиндрах двигателя. Статья посвящена исследованию влияния параметров искрового разряда на качество сгорания газозвушной смеси при различных типах катушек зажигания и различных свечах зажигания. Обнаружено, что использование конденсаторно-транзисторной системы зажигания позволяет получить искровой разряд с высокой длительностью и с высокой скоростью нарастания напряжения на свече зажигания. Приведены амплитудно-временные параметры конденсаторно-транзисторной системы зажигания при испытании на шаровом разряднике. Предложена структурная схема коммутатора конденсаторно-транзисторной системы зажигания.

Ключевые слова: конденсаторная система зажигания, свеча зажигания, катушка зажигания, газозвушная смесь, искровой разряд, газовый двигатель.

A. I. Nefed'ev¹, V. G. Sharonova², V. G. Gusev¹

CAPACITOR-TRANSISTOR IGNITION SYSTEM OF A GAS ENGINE

¹Volgograd State Technical University

²Penza State University of Architecture and Construction

Improving the reliability of the ignition system of a gas engine depends on the quality and reliability of sparking in the engine cylinders. The article is devoted to the study of the influence of spark discharge parameters on the quality of combustion of a gas-air mixture with various types of ignition coils and various spark plugs. It has been found that the use of a capacitor-transistor ignition system makes it possible to obtain a spark discharge with a high duration and a high rate of voltage rise on the spark plug. The amplitude-time parameters of the capacitor-transistor ignition system during testing on a spherical spark gap are given. A block diagram of a capacitor-transistor ignition system switch is proposed.

Keywords: capacitor ignition system, spark plug, ignition coil, gas-air mixture, spark discharge, gas engine.

Улучшение эксплуатационных показателей топливной экономичности и экологичности ДВС с искровым зажиганием может быть достигнуто созданием двигателя, способного работать при малых и средних нагрузках на бедных топливозвушных смесях [1, 2].

При использовании в двигателе газозвушной смеси возникают проблемы, связанные с низкой скоростью горения и резким снижением по мере обеднения скорости сгорания природного газа, что является одной из причин повышения выбросов несгоревших углеводородов СН, падения мощности и КПД газового двигателя [3].

В самом начале своего распространения от

свечи скорость пламени близка к скорости ламинарного горения (с учетом расширения продуктов сгорания). Затем скорость распространения пламени постепенно увеличивается. Скорость распространения пламени в основной фазе сгорания подчиняется законам крупномасштабного турбулентного горения, мало зависит от физико-химических свойств горючей смеси и практически почти целиком определяется скоростями крупных турбулентных пульсаций. Это приводит к тому, что длительность основной фазы горения оказывается почти независящей от частоты вращения коленчатого вала и мало зависит от состава смеси.

Факторы, способствующие расширению зоны пламени, как, например, обеднение смеси, разбавление ее инертными газами, снижение давления, требуют увеличения критической мощности искры. Последняя также возрастает при воспламенении турбулизированных смесей, что объясняется увеличенной шириной зоны турбулентного горения по сравнению с зоной ламинарного пламени. Высокая мощность индуктивной фазы разряда, в процессе которой к начальному очажку горения подводится дополнительная тепловая энергия, способствует более стабильному воспламенению в двигателях, особенно на режимах малых нагрузок и при работе на обедненных смесях. Скорость распространения пламени сильно возрастает, если газозоудная смесь находится в интенсивном турбулентном движении.

Таким образом, форсирование начальной фазы, т. е. форсирование начального очага горения, сокращает ее длительность, снижает вероятность пропусков воспламенения, и достигается увеличением межэлектродного зазора свечи зажигания и мощности искры [4].

Формирование инициирующего разряда в современных двигателях внутреннего сгорания (ДВС) обычно осуществляется транзисторным, конденсаторным или комбинированным (конденсаторно-транзисторным или конденсаторно-тиристорным) оконечным каскадом электронной системы управления двигателем (ЭСУД), цикл разряда которого состоит из двух основных этапов. Первый этап – заряд распределенных емкостей вторичной обмотки катушки зажигания и быстрый рост высокого напряжения, а на втором этапе происходит пробой межэлектродного зазора в свече зажигания и формирование инициирующего разряда, имеющего две составляющие: емкостную и индуктивную.

В течение емкостной фазы разряда происходит практически мгновенное нагревание газозоудной смеси искровым каналом до температур, превышающих 10^4 градусов, а основная энергия выделяется в индуктивной фазе, что препятствует затуханию горения, так как количество тепловой энергии этой фазы значительно больше, чем емкостной.

В транзисторных системах зажигания современные характеристики индуктивной составляющей инициирующего разряда определяются в основном параметрами вторичной высоковольтной цепи разряда и не зависят от параметров разомкнутой первичной низковольтной цепи.

Анализ литературы и результаты экспериментальных исследований показывают, что искровой разряд транзисторных систем зажигания с накоплением энергии в индуктивности остро нуждается в повышении разрядного тока даже в ущерб его длительности. В системах же с накоплением энергии в емкости (конденсаторных) реализуется разряд с повышенными токами.

Пробивное напряжение определяется не только электрическим полем, необходимым для возникновения пробоя искрового промежутка свечи зажигания, но и скоростью нарастания напряжения. Известно, что увеличение скорости нарастания напряжения ведет к уменьшению пробивного напряжения [5, 6].

Высокая скорость нарастания напряжения, обеспечиваемая КСЗ, позволяет при соответствующей полярности приложенного напряжения увеличить до 0,75–1,1 мм межэлектродный зазор свечи зажигания, что подтверждено данными, полученными на моторном стенде НТЦ ОАО «КАМАЗ».

Форма напряжения во вторичной цепи катушки зажигания штатной транзисторной системой зажигания в составе ЭСУД «М20» газового двигателя КамАЗ мод.820.52-260 показана на рис. 1. Результаты испытаний сведены в таблицу.

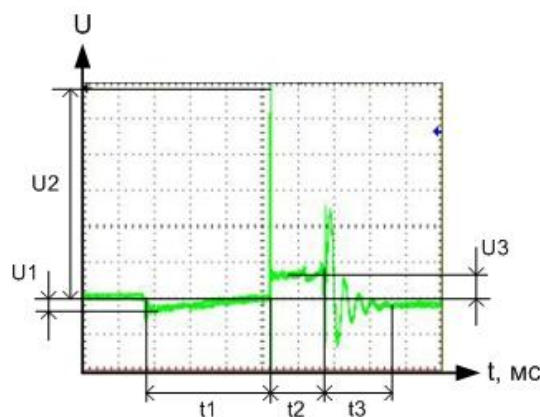


Рис. 1. Форма напряжения во вторичной цепи катушки зажигания штатной транзисторной системой зажигания в составе КМПСУД «М20» газового двигателя КамАЗ

U_1 – напряжение, формируемое во вторичной цепи при накоплении энергии (при линейном нарастании тока в первичной цепи катушки зажигания);

U_2 – напряжение пробоя искрового промежутка свечи зажигания;

U_3 – падение напряжения на участке – внутреннее сопротивление свечи зажигания и искровой промежуток свечи;

t_1 – время накопления энергии в первичной обмотке и магнитопроводе катушки зажигания;

t_2 – время «сброса» энергии катушки зажигания – длительность горения искры.

t_3 – время «рассеивания» остаточной энергии катушки зажигания после прекращения горения искры.

Проведенные моторные испытания транзисторной системы зажигания газового двигателя показали отсутствие пропусков процесса искрообразования в цилиндре двигателя.

При токе разрыва 7,5–8,0 А и напряжении питания бортовой сети 24 В время накопления энергии составляет 1,8 мс, а время «сброса» энергии зависит от режима работы двигателя. При частоте вращения 800 об/мин время «сброса» энергии составляет 2,6 мс и с увеличением частоты вращения и нагрузки двигателя уменьшается до 0,35 мс. При этом эффективность поджога газозвушной смеси резко снижается.

По результатам испытаний был сделан вывод, что для повышения эффективности поджога газозвушной смеси необходимо увеличить энергию искрового разряда.

В результате лабораторных исследований и моторных испытаний восьмиканальной конденсаторной системы зажигания в составе микропроцессорной системы управления зажиганием [7, 8] и на моторном стенде НТЦ КАМАЗ выявлено:

- в цилиндре газового двигателя происходит существенное увеличение амплитуды тока второй индуктивной составляющей искрового разряда, по сравнению с испытанием в камере прибора Э203П, в связи с существенной разницей в температурах за счет выделения тепла в процессе горения топливовоздушной смеси при моторных испытаниях. При повышении температуры увеличивается электропроводность искрового промежутка, что приводит к увеличению тока второй индуктивной составляющей искрового разряда;

- независимость токовременных параметров первой и второй индуктивных составляющих искрового разряда от частоты вращения и нагрузки газового двигателя (для транзисторной системы на нагрузочных режимах характерна аномалия, т. е. в момент резкого нарастания давления в цилиндре «хвостовая» часть разряда гасится, а в обмотках катушки зажигания появляется мощный колебательный процесс рассеивания накопленной энергии).

Моторные испытания показали, что КСЗ позволяют исключить пропуски в системе за-

жигания, снизить расход топлива от 7 до 13 % на различных режимах работы двигателя и уменьшить выбросы углеводородов на холостом ходе до 70 % по сравнению с окончательным транзисторным каскадом BOSCH.

На основании анализа проведенных лабораторных и моторных испытаний КСЗ и штатной транзисторной систем зажигания разработан конденсаторно-транзисторный модуль зажигания (КТМЗ) для ЭСУД с двухфазной индуктивной составляющей искрового разряда, позволяющий совместить все достоинства конденсаторной и транзисторной систем зажигания – высокое значение амплитуды тока первой индуктивной составляющей искрового разряда и высокую скорость нарастания вторичного напряжения [9]. Такое построение КТМЗ позволяет пробить увеличенный искровой зазор свечи зажигания, а также имеется большая длительность второй индуктивной фазы искрового разряда, характерная для транзисторной системы зажигания.

Амплитудно-временные параметры конденсаторно-транзисторной системы зажигания с катушкой зажигания 27.3705, полученные в приборе для проверки свечей зажигания Э203П при давлении 10 атм., показаны на рис. 2. Межэлектродное расстояние в свече зажигания BRISK SUPER было установлено 0,75 мм.

Формы искрового разряда конденсаторно-транзисторной системы зажигания при испытании на шаровом разряднике при искровом зазоре 8 мм при различных скоростях турбулентного потока показаны на рис. 3.

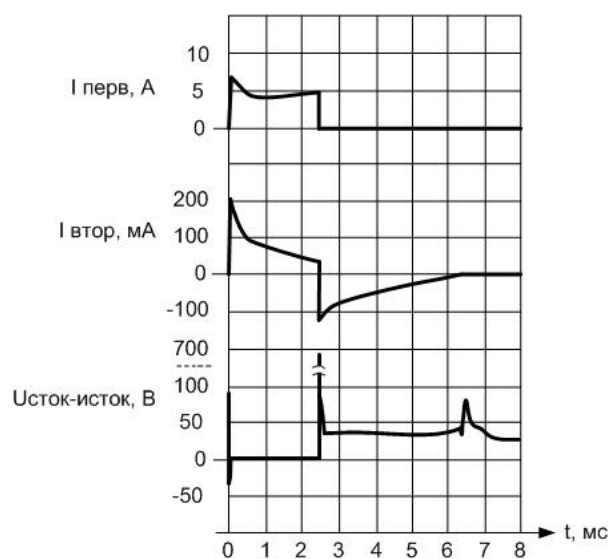


Рис. 2. Амплитудно-временные параметры и напряжение сток-исток полевого транзистора конденсаторно-транзисторной системы зажигания при испытании в камере прибора Э203П

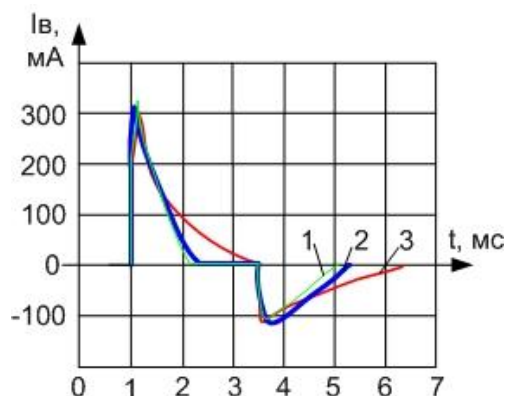


Рис. 3. Формы искрового разряда конденсаторно-транзисторной системы зажигания при испытании на шаровом разряднике:

1 – скорость турбулентного потока 11 м/с; 2 – скорость турбулентного потока 6 м/с; 3 – отсутствие турбулентности

Структурная схема конденсаторно-транзисторной системы зажигания приведена на рис. 4.

Модуль конденсаторно-транзисторной системы зажигания КТМЗ содержит формирователь импульса управления Ф1, определяющий длительность открытого состояния транзисторного ключа Кл. Накопительный конденсатор С заряжается от повышающего преобразователя напряжения ППН [10]. Формирователь импульса управления Ф2 определяет время выключенного состояния повышающего преобразователя напряжения. Для защиты транзисторного ключа Кл от повышенного напряжения применен блок защиты БЗ. Первичная обмотка катушки зажигания КЗ подключена к выходу модуля зажигания. Управляющие импульсы для запуска формирователей импульсов Ф1 и Ф2 подаются от датчика зажигания Д.

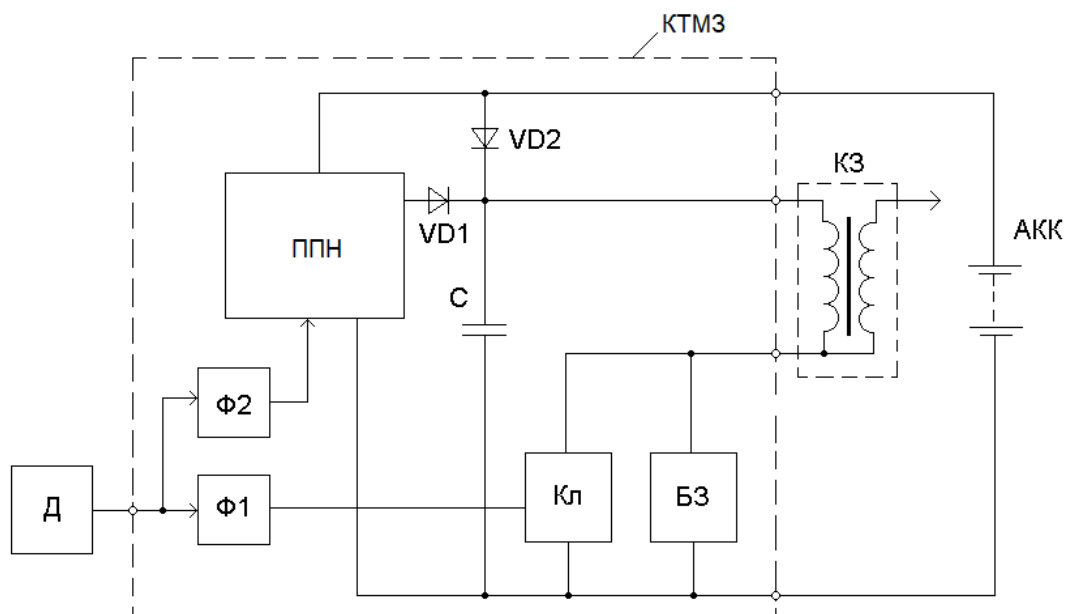


Рис. 4. Структурная схема конденсаторно-транзисторной системы зажигания

Лабораторные и моторные испытания конденсаторно-транзисторной системы зажигания показали, что данная система обеспечивает повышение эффективности поджога газо-воздушной смеси в цилиндрах газового ДВС из-за наличия двуполярного искрового разряда большой мощности и длительности при помощи одного транзисторного ключа, что позволяет исключить пропуски в системе зажигания, снизить расход топлива от 7 до 13 % на различных режимах работы двигателя и уменьшить выбросы углеводородов на холостом ходе до 70 % по сравнению с оконечным транзисторным каскадом BOSCH. Также преимуществом

разработанной конденсаторно-транзисторной системы зажигания является возможность ее использования со стандартной катушкой в составе автомобильной системы зажигания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ютт, В. Е. Электрооборудование автомобилей: учеб. для студентов вузов / В. Е. Ютт. – М.: Транспорт, 1995. – 304 с
2. Барский, И. А. Повышение экономичности газового двигателя с искровым зажиганием на частичных нагрузках / И. А. Барский, П. Р. Вальехо Мальдонадо // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 9. – С. 10–11.
3. Францев, С. М. Влияние характеристики выделения энергии искрового разряда системы зажигания на показа-

тели газового двигателя / С. М. Францев, Г. И. Шаронов, А. И. Нефедьев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки»; вып. 3). – С. 74–76.

4. Контроль параметров искрового разряда в двигателе внутреннего сгорания / А. И. Нефедьев, В. Г. Гусев, Д. И. Нефедьев, В. Г. Шаронова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – 51–57.

5. 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.

6. 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.

7. Нефедьев, А. И. Development of Microprocessor-Based Car Engine Control System / А. И. Нефедьев, Г. И. Шаронов // Procedia Engineering. Vol. 150 : 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A.A. Radionov. – [Elsevier publishing], 2016. – P. 1341-1344.

8. Шаронов, Г. И. Микропроцессорная система управления силовым агрегатом автомобиля / Г. И. Шаронов, А. И. Нефедьев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 3. – 2–4.

9. Патент РФ на ПМ №116578, МПК F02P 3/08. Коммутатор системы зажигания двигателя внутреннего сгорания / А. И. Нефедьев, Г. И. Шаронов; – № 2011150378/07; заявл. 09.12.2011; опубл. 27.05.2012; Бюл. № 15.

10. Нефедьев, А. И. Однотактный обратногоходовый стабилизированный преобразователь постоянного напряжения / А. И. Нефедьев, Г. И. Шаронов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – № 2. – 24–26.

УДК 519.876.5

А. Н. Шилин¹, А. Н. Митрофанов²

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: shanvstu@gmail.com¹, eltech@vstu.ru²

В статье рассматривается метод моделирования процессов прохождения стохастических сигналов в информационно-измерительных системах. На основе этого метода разработана методика расчета дисперсии случайного сигнала на выходе динамического звена, связанная с теоремой о начальном значении оригинала для преобразования Лапласа. Данная методика позволяет определять дисперсию выходного сигнала в аналоговых устройствах. Кроме того, использование полученной методики в области z-переменной позволяет также вычислять дисперсию сигнала на выходе цифровых устройств обработки информации.

Ключевые слова: Гидроакустика, источники шумов, отношение сигнал/шум, преобразование стохастических сигналов, цифровое моделирование стохастических сигналов.

A. N. Shilin¹, A. N. Mitrofanov²

DIGITAL MODELING OF TRANSFORMATIONS OF STOCHASTIC SIGNALS IN HYDROACOUSTIC SYSTEMS

Volgograd State Technical University

The article discusses a method for modeling the processes of passing stochastic signals in information-measuring systems. On the basis of this method, a method for calculating the dispersion of a random signal at the output of a dynamic link has been developed, which is related to the theorem on the initial value of the original for the Laplace transform. This technique allows you to determine the dispersion of the output signal in analog devices. In addition, the use of the obtained technique in the area of the z-variable also makes it possible to calculate the signal dispersion at the output of digital information processing devices.

Keywords: Hydroacoustics, noise sources, signal-to-noise ratio, conversion of stochastic signals, digital modeling of stochastic signals.

Источники фонового шума в море. Фоновый шум в море, вызванный естественными или антропогенными причинами, разделяется на четыре основные категории: гидродинамические, сейсмические, океанические и биологические.

1. *Гидродинамический шум* – вызван движением самой воды в результате приливов, ветров, течений и штормов. Уровень гидродинамического шума определяется состоянием морской поверхности. Высокий уровень гидродина-

намических шумов, вызванных сильными штормами в зоне судна, может привести к полной потере приема сигналов.

2. *Сейсмический шум* – вызываются движением суши под или вблизи моря, как, например, во время землетрясения. Обычно они непродолжительны, поэтому не оказывают существенного влияния на работу гидроакустической системы.

3. *Морское движение*. Влияние морского движения на уровень окружающего шума определяется характеристиками распространения звука в этом районе, количеством судов и расстоянием судоходства от этого района. Частоты этих шумов зависят от расстояния до судов, шумы от близлежащих судов имеют широкий диапазон частот, но по мере увеличения расстояния диапазон частот становится более узким и остаются только более низкие частоты. В глубокой воде низкие частоты могут быть слышны за тысячи километров.

4. *Биологический шум*. Производимые морскими обитателями шумы являются частью окружающего фонового шума и иногда важным фактором гидроакустической системы. Растения и животные, которые загрязняют корабли, пассивны и вносят свой вклад в собственный шум, увеличивая турбулентность воды. Ракообразные, рыбы и морские млекопитающие являются активными производителями звуков, которые легко улавливаются гидролокатором.

Во время и после Второй мировой войны было проведено большое количество исследований морских животных, производящих звук. Звуки, производимые многими видами, были проанализированы с помощью электронных средств и получено большое количество полезной информации. Морские животные подразделяются на три основные группы: ракообразные, рыбы и млекопитающие. Эти группы являются источниками различных шумов.

Системы оптимизации отношения «сигнал/шум». Системы подразделяются на два вида: первый – это обнаружение цели. То есть по принципу «да и нет» без анализа формы сигнала, и система может исказить принимаемый сигнал. Одновременно должно обеспечиваться максимально возможное отношение «сигнал/шум». Назначение системы второго вида – это не только обнаруживать сигнал от объекта, но и определять его форму, причем с минимальным искажением за счет шумов, но с обеспечением максимального отношения сигнал/

шум. При построении импульсных систем используются различные методы повышения отношения «сигнал/шум». Одним из методов является использование фильтров, позволяющих с наименьшими потерями выделять сигнал из смеси сигнала и шума. Фильтры, отвечающие критерию максимума отношения «сигнал/шум», называются оптимальными. Необходимо отметить, что оптимальная фильтрация применима только для сигналов ограниченной длительности, т. е. импульсных сигналов.

В общем виде требования к оптимальному фильтру могут быть сформулированы следующим образом. На вход линейного четырехполюсника с постоянными параметрами и передаточной функцией подается аддитивная смесь сигнала и шума. Причем сигнал полностью известен, а именно заданы его форма, амплитуда и положение на оси. Шум представляет собой стационарный вероятностный процесс с заданными характеристиками – законом распределения вероятности спектром или корреляционной функцией. Требуется синтезировать фильтр, максимальное отношение сигнал/шум, причем условие сохранения формы сигнала не ставится.

Решение поставленной задачи в общем виде сводится к двум этапам:

1) определению передаточной функции (формы частотной характеристики);

2) отысканию структуры и параметров цепи по найденной частотной характеристике.

В связи с широким внедрением цифровых методов обработки информации в управляющих системах, в том числе в гидроакустических системах, часто возникает задача оценки точности обработки сигналов и определения шумов, описываемых случайными функциями. В настоящее время при цифровой обработке сигналов основным численным методом является аппарат z -преобразования [1]. Поэтому решение поставленной задачи связано с использованием этого аппарата и предельных теорем в z - и p -областях. Стандартная методика анализа прохождения случайных сигналов через аналоговые устройства, представленные посредством электрических схем замещения, подразумевает вычисление интеграла Винера-Хинчина [2]. Однако выяснено, что преобразование Лапласа и z -моделирование значительно упрощают операции Винера-Хинчина [3], и была сделана попытка решить задачу с помощью теоремы о начальном значении оригинала для z -преобразования [3]. При этом величина дисперсии

случайного сигнала на выходе динамического звена определялась с помощью формулы:

$$\sigma_{\text{вых}}^2 = \sigma_{\text{вх}}^2 \lim_{z \rightarrow \infty} W(z)W(z^{-1}), \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{вх}}^2$ – дисперсия случайного сигнала в виде белого шума на входе цепи, $W(z)$ – передаточная функция звена в виде z -образа.

Однако при проведении расчетов по формуле (1) выяснено, что результаты численных и классических методов не совпадают. Другой подход к решению поставленной задачи заключался в представлении дискретных передаточных функций основных звеньев цепи и нахождении выходного сигнала посредством рекуррентных алгоритмов. Для нахождения выходного сигнала использовался метод получения рекуррентных алгоритмов путем дискретизации непрерывных формирующих фильтров [4], но этот метод оказался достаточно громоздким.

Поэтому было предложено осуществить непосредственный переход от переменной ω в классическом преобразовании Фурье к переменной p в преобразовании Лапласа, а затем и к переменной z в преобразовании Лорана, учитывая одно- и двухстороннюю природу этих преобразований.

Рассмотрим линейную непрерывную систему с частотной передаточной функцией $W(j\omega)$. Если на вход системы подать непрерывный стохастический сигнал со спектральной плотностью мощности $S_x(\omega)$, то на выходе получим процесс с непрерывной спектральной плотностью мощности $S_y(\omega)$ и корреляционной функцией $R_y(\tau)$, которые связаны соотношением:

$$S_y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_y(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (2)$$

Поскольку характеристики входного и выходного сигналов связаны следующим образом [5]:

$$S_y(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_x(\omega), \quad (3)$$

классический метод определения корреляционной функции выходного сигнала основан на вычислении интеграла:

$$R_y(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(j\omega)|^2 S_x(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega. \quad (4)$$

Из формулы (2) следует, что взаимосвязь между спектральной плотностью и корреляционной функцией выходного сигнала можно записать таким образом:

$$S_y(\omega) = \left[\int_0^{\infty} R_y(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau + \int_0^{\infty} R_y(-\tau) e^{j\omega\tau} d\tau \right]. \quad (5)$$

Аналогично и для спектральной плотности входного сигнала $S_x(\omega)$.

Изображение правой ветви корреляционной функции по Лапласу имеет вид:

$$R_y(p) = \int_0^{\infty} R_y(\tau) e^{-p\tau} d\tau. \quad (6)$$

Поэтому, заменяя в уравнении (5) $j\omega$ на p и, учитывая (3) и (6), приходим к соотношению:

$$R_y(p) + R_y(-p) = W(p)W(-p) \cdot [R_x(p) + R_x(-p)]. \quad (7)$$

Корреляционная функция является симметричной, а преобразование Лапласа – одностороннее преобразование, в отличие от преобразования Фурье, поэтому интерес представляет только положительная ветвь корреляционной функции (ветвь в правой полуплоскости). Соответственно, в формуле (7) должно остаться только слагаемое $R_y(p)$, а второе слагаемое необходимо отбросить. Чтобы совершить подобную операцию, следует разложить правую часть уравнения (7) на сумму двух слагаемых, в одном из которых перед переменной p стоит только знак «плюс», а в другом – «минус».

Возникающие в различных электрических системах погрешности, в частности, погрешности квантования [6], и шумы часто представляют в виде белого шума. Корреляционная функция белого шума как стационарная случайная функция является четной.

$$R_x(\tau) = \frac{S_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega\tau} d\omega = S_0 \delta(\tau). \quad (8)$$

Заменив индекс y на x в формуле (5) и подставив туда выражение (8), получим спектральную плотность белого шума в виде:

$$S_x(\omega) = 2 \int_0^{\infty} S_0 \delta(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = S_0. \quad (9)$$

Поэтому изображение Лапласа от корреляционной функции белого шума:

$$R_x(p) = \frac{S_0}{2}. \quad (10)$$

Если принять во внимание, что теорема о начальном значении для преобразования Лапласа имеет следующий вид:

$$\lim_{t \rightarrow 0} y(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} pY(p), \quad (11)$$

то, учитывая связь между корреляционной функцией и дисперсией, для нахождения дисперсии

сигнала на выходе цепи можно использовать следующее выражение:

$$\bar{\sigma}_y^{-2} = R_y(0) = \lim_{p \rightarrow \infty} p R_y(p). \quad (12)$$

Перейдем от преобразования Лапласа к z -преобразованию (Лорана). В дальнейшем под z -преобразованием будем понимать одно-стороннее преобразование, поэтому необходимо рассматривать корреляционную функцию при положительных значениях времени. Переход от непрерывной передаточной функции $W(p)$ по Лапласу к эквивалентной дискретной $W(z)$ осуществляется методом z -форм. Согласно прямому правилу перехода [7], имеем:

$$\frac{1}{p + \alpha} \rightarrow \frac{z}{z - e^{-\alpha T}}, \quad (13)$$

где T – период дискретизации, α – постоянная величина.

Переход к переменной z можно также осуществить с помощью различных видов аппроксимаций при разложении в ряд функции $z = e^{pT}$:

$$z = e^{pT} \approx 1 + pT$$

(прямая разность или метод Эйлера); (14, а)

$$z = e^{pT} \approx 1 / (1 - pT)$$

(обратная разность); (14, б)

$$z = e^{pT} \approx \frac{1 + pT/2}{1 - pT/2}$$

(метод трапеций). (14, в)

Использование методов аппроксимации позволяет получить формулы для перехода от непрерывной передаточной функции $W(p)$ к дискретной передаточной функции $W(z)$, а именно:

$$p = \frac{z-1}{T}; p = \frac{z-1}{zT}; p = \frac{2}{T} \left[\frac{z-1}{z+1} \right]. \quad (15)$$

Поскольку можно записать [6], что $S_y(z) = W(z)W(z^{-1})S_x(z)$, то, как упоминалось выше, дисперсию на выходе системы предлагалось находить с использованием теоремы о начальном значении оригинала для z -преобразования в виде (1). Однако во многих случаях данная формула приводит к результату, отличному от значения, полученного посредством классических методов расчета.

Такой результат, во-первых, связан с тем, что формула (1) не учитывает односторонности z -преобразования. Во-вторых, при переходе от формулы (12) к выражению (1) теряется множитель p под знаком предела. Заметим, что необходимо также учесть преобразование предела в формуле (12) и, соответственно, вид областей

сходимости при переходе от функции $R_y(p)$ к функции $R_y(z)$.

При подстановке точного значения (13) целесообразно использовать теорему о начальном значении для z -преобразования в таком виде:

$$\bar{\sigma}_y^{-2} = R_y(0) = \lim_{z \rightarrow +\infty} R_y(z). \quad (16)$$

Применение методов аппроксимации (14) подразумевает нахождение дисперсии дискретного сигнала непосредственной подстановкой формул перехода (15) в выражение (12). В зависимости от вида такого перехода дисперсия сигнала на выходе оптоэлектронного тракта определяется следующим образом.

Метод прямой разности или метод Эйлера:

$$\bar{\sigma}_y^{-2} = R_y(0) = \lim_{p \rightarrow \infty} p R_y(p) = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{z-1}{T} R_y(z). \quad (17)$$

$$\text{Здесь } R_y(z) = R_y(p) \Big|_{p=\frac{z-1}{T}}.$$

Метод обратной разности:

$$\bar{\sigma}_y^{-2} = \lim_{z \rightarrow 0} \frac{z-1}{zT} R_y(z). \quad (18)$$

Метод трапеций:

$$\bar{\sigma}_y^{-2} = \lim_{z \rightarrow -1} \frac{2}{T} \left[\frac{z-1}{z+1} \right] R_y(z). \quad (19)$$

В выражениях (18) и (19) $R_y(z)$ находится таким же образом, как и при методе прямой разности (17).

Динамические характеристики линейных систем определяются общим решением соответствующего однородного уравнения при заданных начальных условиях. Если характеристическое уравнение имеет действительные и различные корни λ_k , решение имеет вид:

$$x_{ce}(t) = \sum_{k=1}^n C_k e^{\lambda_k t}. \quad (20)$$

Постоянные C_k определяются по начальным условиям, n – количество корней.

Если имеются комплексные корни, то каждой паре простых комплексных корней $\lambda_k \pm jy_k$ характеристического уравнения, соответствует решение:

$$x_{ce}(t) = C_k e^{\lambda_k t} \cos(y_k t) + C_{k+1} e^{\lambda_k t} \sin(y_k t). \quad (21)$$

Сравнивая выражения для отдельных слагаемых в (20) и (21), можно увидеть, что они соответствуют решениям дифференциальных уравнений для инерционного и колебательного звеньев, и, следовательно, решения сводятся к их сумме. Поэтому методику моделирования рассмотрим на примере этих двух типовых звеньев.

Полученная методика может быть представлена следующим образом:

1. Разложить анализируемую систему на отдельные типовые звенья;

2. Записать передаточные функции $W(p)$, полученные при прохождении каждого шумового сигнала через последовательность звеньев системы;

3. Найти изображение Лапласа от корреляционной функции каждого шумового сигнала на входе системы в виде $R_x(p) + R_x(-p)$;

4. Записать соотношение:

$$R_y(p) + R_y(-p) = W(p)W(-p) \cdot [R_x(p) + R_x(-p)]$$

и разложить правую часть этого уравнения на сумму двух слагаемых, в одном из которых перед переменной p стоит только знак «плюс», а в другом – «минус». Оставить только слагаемое $R_y(p)$, а второе слагаемое отбросить;

5. Используя теорему о начальном значении для преобразования Лапласа, найти дисперсии сигналов на выходе цепи:

$$\sigma_y^2 = R_y(0) = \lim_{p \rightarrow \infty} p R_y(p);$$

6. Перейти от преобразования Лапласа к z -преобразованию (Лорана) прямым способом или посредством различных видов аппроксимаций при разложении в ряд функции $z = e^{pT}$.

Сделать замену переменных в выражении для корреляционной функции на выходе системы и, используя формулы (16)–(19), определить дисперсию сигналов на выходе системы.

Таким образом, предложенная методика определения дисперсии шумового сигнала на выходе цепи позволяет получить расчетные результаты, совпадающие с таковыми при использовании классического метода Хинчина-Винера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шилин, А. Н. Анализ методов синтеза цифровых фильтров по аналоговым моделям / А. Н. Шилин, О. А. Крутякова // Цифровая обработка сигналов. – 2009. – № 4. – С. 3–7.
2. Шаталов, А. С. Частотные методы расчета шумов на выходе линейных электрических цепей и систем управления / А. С. Шаталов // Электричество. – 1966. – № 4. – С. 11–15.
3. Шилин, А. Н. Точность цифровых систем управления с рекуррентными алгоритмами / А. Н. Шилин // Приборы и системы управления. – 1999. – № 7. – С. 5–8.
4. Быков, В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / В. В. Быков. – М.: Изд-во «Советское радио», 1971. – 325 с.
5. Санковский, Е. А. Вопросы теории автоматического управления. (Статистический анализ и синтез САУ) / Е. А. Санковский. – М.: «Высш. школа», 1971. – 232 с.
6. Арутюнов, П. А. Теория и применение алгоритмических измерений / П. А. Арутюнов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

УДК 621.3

А. В. Кодочигова

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЙ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ WBAN

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: eltech@vstu.ru

В этой статье описаны основные характеристики систем WBAN, такие как энергопотребление, помехи, время ожидания, безопасность, конфиденциальность, надежность и выбор подходящего датчика. Также проведен сравнительный анализ наиболее популярных технологий беспроводной связи, чтобы определить их пригодность для медицинских приложений WBAN, включая недавно появившиеся коммуникационные технологии LPWAN.

Ключевые слова: WBAN, LPWAN, беспроводной канал связи, медицинский мониторинг, медицинская диагностика, Bluetooth, BLE, ZigBee, WiFi, LoRaWAN.

A. V. Kodochigova

SELECTING WIRELESS DATA TECHNOLOGIES FOR MEDICAL WBAN APPLICATIONS

Volgograd State Technical University

This article describes the main characteristics of WBAN systems, such as power consumption, interference, latency, security, privacy, reliability, and choosing the right sensor. A comparative analysis of the most popular wireless communication technologies was also carried out to determine their suitability for WBAN medical applications, including the recently emerging LPWAN communication technologies.

Keywords: WBAN, LPWAN, wireless communication channel, medical monitoring, medical diagnostics, Bluetooth, BLE, ZigBee, WiFi, LoRaWAN.

Введение

Нательные беспроводные сети BAN (англ. *body area network*) или WBAN (англ. *wireless body area network*), поддерживающие медицинские приложения, предполагают различные конфигурации для обеспечения медицинского наблюдения, мониторинга, диагностики и терапии [1]. Связь между различными частями сети для отправки данных от пациента к врачу и обратно может осуществляться с помощью различных технологий [2]. Выбор подходящей технологии сегодня является сложной задачей, т. к. представлено широкое разнообразие таких [3]. Каждая из этих технологий имеет собственные характеристики, функциональные особенности и некоторые ограничения для использования в медицинских приложениях. В данной статье выделены наиболее распространенные технологии с целью изучения их пригодности для медицинских приложений WBAN.

Основная часть

В сетях WBAN датчики отвечают за обнаружение физиологических параметров (данных), преобразование их в цифровую форму и передачу в точку доступа. Они могут быть

размещены на теле человека (контактные датчики), рядом с телом (переносные датчики) или имплантированы под кожу (инвазивные датчики). Выделяют два типа сенсоров: первый тип только измеряет данные и отправляет их [4]. Второй тип, называемый исполнительными механизмами, не только измеряет и отправляет данные как первый тип, но и может вводить лекарства на основе собранных данных. Собранные данные отправляются по беспроводным каналам связи на медицинский сервер, где они могут быть проанализированы и сохранены. Это может быть выполнено на основе 2, 3 или 4 уровней в зависимости от архитектуры системы и в зависимости от используемых технологий [5]. Наиболее популярная архитектура, предлагаемая в литературе для WBAN, состоит из трех уровней, как показано на рис. 1: intra-WBAN, inter-WBAN и beyond-WBAN [5].

Первый уровень (Intra-WBAN) относится, прежде всего, к обмену данными между датчиками и персональным носимым устройством (коммутатором), а также к связи между самими датчиками [4]. В некоторых существующих схемах используются кабели для прямого подключения датчиков к коммутатору, что позво-

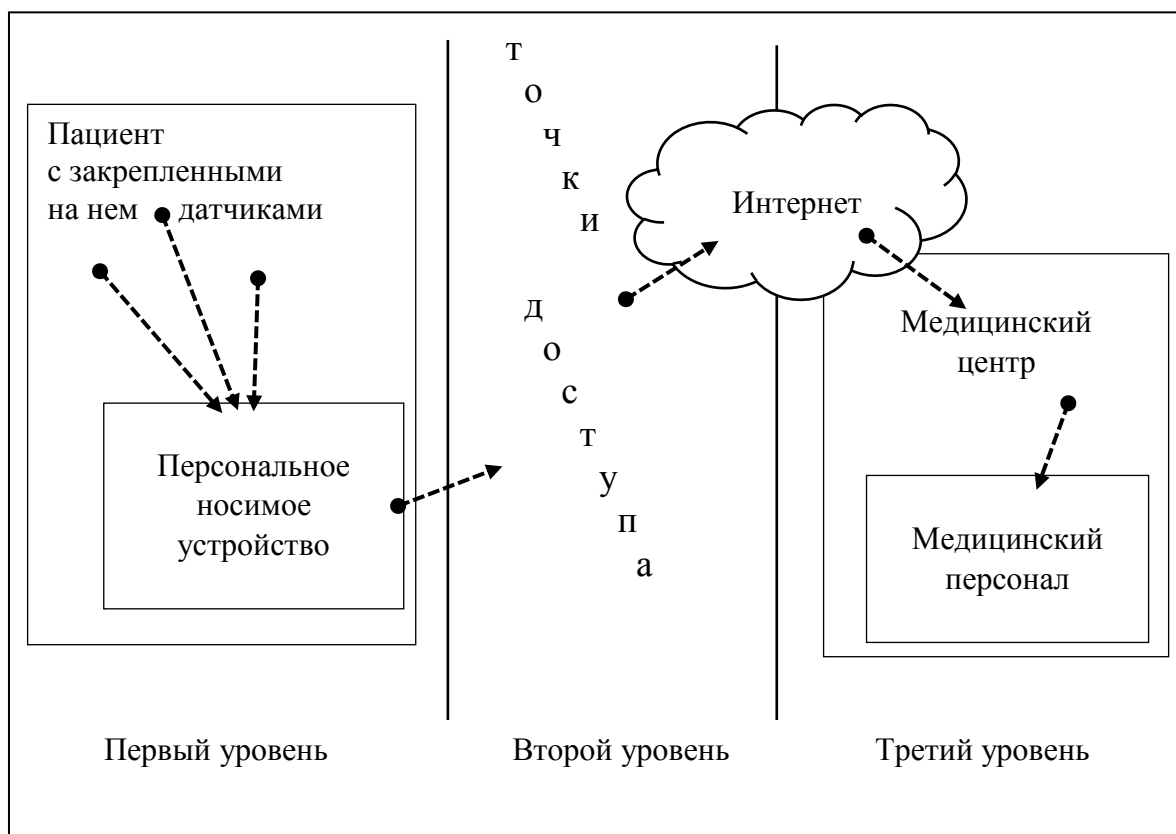


Рис. 1. Архитектура WBAN

ляет избежать необходимости в беспроводной сети на первом уровне [5]. В других схемах данные могут быть переданы по беспроводной сети главный узел для дальнейшей пересылки в коммутатор (многозвенный WBAN) или могут быть переданы непосредственно на коммутатор (односкачковый WBAN), который пересылает данные после обработки на точки доступа базовой сети.

Inter-WBAN включает связь между коммутатором и точкой доступа базовой сети с использованием беспроводных технологий. Уровень Inter-WBAN соединяет WBAN с другими сетями, доступ к которым можно получить доступ через Интернет. Связь между WBAN имеет два типа архитектуры: архитектура на основе инфраструктуры, которая используется в большинстве приложений WBAN, обеспечивающих более безопасную связь, и архитектура на основе Ad-hoc, обеспечивающая быстрое и гибкое размещение [7].

Beyond-WBAN – это связь между точкой доступа и удаленным медицинским центром. Шлюз используется в качестве моста для связи через Интернет или сотовые сети для передачи данных медицинскому персоналу. После получения данных медицинские специалисты могут анализировать их для наблюдения за пациентом с целью предоставления необходимых медицинских рекомендаций [4]. Этот уровень позволяет также восстановить медицинскую информацию о пациенте, которая может потребоваться для планирования соответствующего лечения [6].

Характеристики WBAN

1) Потребляемая мощность

Источники питания небольшого размера используются для питания датчиков в системах WBAN. Некоторые из них, особенно для имплантированных датчиков, не подлежат замене, то есть должны работать в течение нескольких лет без подзарядки [4]. Следовательно, цель WBAN – получить эффективную систему питания при использовании миниатюрных источников питания. Первое, что необходимо учитывать для получения эффективной системы электропитания, – это выбор энергоэффективной беспроводной технологии для WBAN. Во-вторых, при проектировании необходимо предусматривать переход устройств в спящий режим на большую часть времени, чтобы снизить потребление энергии. В-третьих, необходимо минимизировать помехи, поскольку помехи уве-

личивают энергопотребление системы WBAN, где данные должны передаваться более одного раза [4].

2) Задержка

Задержка соответствует времени, необходимому данным для перехода от одного устройства к другому [7]. Оно варьируется от значений ниже одной миллисекунды для 5G/6G до нескольких десятков миллисекунд для 3G/4G и может превышать одну секунду для технологий LPWAN [8]. Низкая задержка передачи данных обеспечивает успешную передачу данных в медицинский центр в режиме реального времени. Медицинские приложения WBAN могут применяться и в экстренных ситуациях, когда задержка доставки данных может привести к смерти пациента, поэтому так важно минимизировать задержку [7].

3) Конфиденциальность и безопасность

Конфиденциальность и безопасность медицинских данных пациента – два обязательных требования для WBAN.

Конфиденциальность означает, что медицинские данные, которые являются формой личных данных, не должны разглашаться людьми, не имеющими разрешения на их использование или просмотр, во избежание злоупотребления медицинской информацией пациентов [7].

Безопасность в WBAN относится к защите медицинских данных пациента во время сбора, передачи и хранения [7]. Любые ложные данные, полученные медицинским персоналом, могут привести к неправильному лечению и, следовательно, к смерти пациента. Как и в традиционных сетях, WBAN предъявляют множество требований к безопасности [8,9,10], основанные из которых следующие:

- Доступность для медицинского персонала;
- Конфиденциальность;
- Аутентификация;
- Целостность.

Несмотря на огромную исследовательскую работу, проведенную в течение последнего десятилетия, конфиденциальность и безопасность для WBAN по-прежнему остается горячей темой для изучения. Многие методы и алгоритмы криптографии предлагаются в нескольких работах в литературе для создания безопасных систем WBAN [11,12,13].

Как мы видим, основными требованиями к WBAN являются создание безопасной частной сети с высокой степенью надежности. Дополнительные требования, такие как низкая за-

держка, высокая энергоэффективность и меньшее поглощение излучения человеческим телом, также имеют большое значение. Далее подробно описаны самые насущные проблемы и некоторые направления исследований по их преодолению.

Потребляемая мощность

Энергопотребление по-прежнему остается одной из основных проблем, когда требуется длительный срок службы датчиков, особенно для имплантированных датчиков, которым, возможно, придется проработать несколько лет с невозможностью замены батарей. Этот факт побудил многих исследователей изучить способы экономии энергии за счет максимального увеличения времени ожидания датчиков и предотвращения столкновений потоков в узлах, таким образом, предотвращения повторной передачи данных. Несколько исследователей изучали методы подзарядки аккумулятора, основанные на движении тела. Другие исследователи разработали беспроводной датчик с автономным питанием, который питается от человеческого тела [14], в то время как в [15] исследователи изучали беспроводную передачу энергии на короткие расстояния к электронным устройствам. Кроме того, исследуется возможность оптимизации энергоэффективности при переходе на 5G. Таким образом, для достижения высокой энергоэффективности, необходимой этим сетям, по-прежнему необходимы дополнительные исследования WBAN на основе 5G. Здесь адаптация канала и рабочий цикл могут играть важную роль [16].

Безопасность и конфиденциальность

В литературе описано несколько прототипов безопасности для сетей WBAN. Несмотря на эти исследования, безопасность и конфиденциальность медицинских данных в WBAN остаются двумя огромными проблемами, требующими поиска соответствующих механизмов решения [17], хотя в настоящее время проводится много исследований, и существует несколько открытых проблем, таких как:

Во-первых, в ближайшем будущем WBAN станет более широко распространенным, когда данные о пациентах будут передаваться членам семьи, врачам, больницам, аптекам и другим лицам, что требует высокого уровня согласованных наборов нормативных документов для защиты конфиденциальности пациента.

Во-вторых, сети WBAN могут быть уязвимы для различных атак. Авторы [18] классифи-

цировали эти атаки безопасности на два типа атак: внешние и некорректные. Что касается внешней атаки, с ней можно легко справиться с помощью традиционных механизмов безопасности, в то время как с неправильными атаками справиться невозможно, они требуют дополнительных исследований.

В-третьих, еще одна область, требующая внимания, – это доверительное управление. Доверие – это степень, в которой узел можно считать заслуживающим доверия, надежным и безопасным при взаимодействии с другими узлами. Обзор последних исследований в области доверительного управления для WBAN представлен в [19].

В-четвертых, сложные механизмы безопасности для WBAN требуют большего количества ресурсов питания, поэтому баланс между многими факторами, такими как безопасность, энергопотребление, эффективность и практичность, очень важен и требует дополнительных исследований для достижения широкого использования медицинских приложений в WBAN.

Поглощение излучения человеческим телом

Поглощение радиочастотного излучения может негативно сказаться на организме человека, особенно на чувствительных органах. Одна из основных задач WBAN – снизить интенсивность излучения [20]. Для того, чтобы свести к минимуму энергию, поглощаемую человеческим телом, датчики должны сохранять свою энергоэффективность, чтобы поддерживать потребление малой мощности [21]. Таким образом, оборудование WBAN должно работать меньше времени и использовать передачу с низким энергопотреблением. Это связано с выбором технологии и методологии системы, в которой технологии LPWAN могут стать одним из решений из-за их низкой мощности передачи и низких рабочих циклов.

Производительность WBAN

Надежность передачи является критическим моментом, обеспечивающим производительность WBAN [22], где контролируемые данные должны быть вовремя получены медицинским персоналом, или они могут быть фатальными, если угрожающее жизни состояние не выявлено. Надежность включает доставку данных в разумные сроки и гарантированную доставку данных. У ненадежности есть основные причины: низкая дальность передачи, помехи, неэффективная маршрутизация и другие [23].

Помехоустойчивость

Воздействие помех в работу сетей WBAN – одна из основных открытых проблем, которую необходимо решить. Требование поддерживать множество различных датчиков на теле человека в WBAN, в дополнение к сосуществованию множества WBAN в одной и той же области, делает координацию между системами WBAN необходимой и сложной [59]. Проблема интерференции также может возникать между WBAN и другими беспроводными сетями в диапазонах ISM, что приводит к низкой надежности данных о работоспособности, неэффективности использования энергии и высокой задержке, вызванной искажением сигнала.

В последнее время в литературе было предложено несколько методов уменьшения помех в сетях WBAN. Ниже приведены некоторые из этих опубликованных исследований. В [24] схема, основанная на эффективных правилах смягчения последствий воздействия ЭМП, предлагается уменьшать помехи на уровне центрального координатора. В работе [25] сформулирован выбор канала сосуществующих координаторов в WBAN, для этого предлагается использовать алгоритм достижения равновесия по Нэшу. В документе [26] рассматривается уменьшение помех на уровне узла вместо того,

чтобы рассматривать каждую WBAN в целом. Основная цель [27] – это планирование узлов в WBAN без помех. Авторы предлагают алгоритм планирования на основе приоритета, в котором приоритет узлов учитывается при планировании датчиков тела. В работе [28] предлагается распределенная схема TDMA для минимизации вероятности коллизии между узлами в сосуществующих WBAN. Кроме того, хорошо известно, что управление мощностью используется для уменьшения помех, и многие исследования доказывают его эффективность в уменьшении помех. Чтобы уменьшить помехи между WBAN, [29] предлагает игровой подход к управлению мощностью, основанный на информации о социальном взаимодействии пациентов. В обзоре [30] детализированы алгоритмы управления мощностью и классифицированы их подходы.

Использование беспроводных технологий для обмена информацией, собранной датчиками, устраняет необходимость в кабелях между датчиком и точкой доступа. Выбор подходящей беспроводной технологии является важной частью систем WBAN, где несоответствующая технология может привести к потере времени и энергии. В таблице приведены характеристики основных предлагаемых технологий для WBAN [31].

Характеристики основных предлагаемых для WBAN технологий беспроводной передачи данных

Название технологии Характеристика	Рабочая частота	Скорость передачи данных	Диапазон	Топология сети	Потребляемая мощность / время автономной работы	Пропускная способность	Технология распространения спектра	Задержка
Bluetooth	2400 МГц	3 Мбит / с	10–100 м	Ad-hoc, звезда, сетка	100 мВт	1 МГц	FHSS	Менее 100 мс
BLE	2400 МГц	1 Мбит / с	10 метров	Специальные пикосети	10 мВт	2 МГц	FHSS	Менее 3 мс
ZigBee	2400, 868, 915 МГц	20 кбит / с (868 МГц), 40 кбит / с (915 МГц), 250 кбит / с (2400 МГц)	100 метров	Специальные пикосети	30 мВт	2 МГц	DSSS	Менее 16 мс
WiFi	2400 МГц, 5000 МГц	600 Мбит / с	100 метров	звезда	Выше	20 МГц, 40 МГц, 80 МГц, 160 МГц	DSSS	Менее 3 мс
LoRaWAN	433 МГц, 868 МГц, 915 МГц	50 кбит / с	2–20 км	звезда, сетка	До 10 лет	125 кГц, 250 кГц и 500 кГц	CSS	В зависимости от класса, низкая задержка для класса C

Окончание таблицы

Название технологии Характеристика	Рабочая частота	Скорость передачи данных	Диапазон	Топология сети	Потребляемая мощность / время автономной работы	Пропускная способность	Технология распространения спектра	Задержка
SigFox	915 МГц, 868 МГц	100 бит / с	10–50 км	звезда	10 мкВт – 100 мВт / до 10 лет	100 Гц	BPSK	400 мс
Ingenu	2400 МГц	230–250 кбит / с	4,6 км в городской местности	звезда, дерево	До 15 лет	1 МГц	BPSK	Менее 10 с
NB-IoT	лицензированные диапазоны (например, 700, 800 и 900 МГц)	200 кбит / с	1–10 км	звезда	200–700 мВт / до 10 лет	200 кГц	QPSK	Менее 10 с
WiFi HaLow	900 МГц	до 300 Мбит / с	До 1 км	звезда	до 10 лет	1,2,4,8,16 МГц	DPSK и QPSK	–

Исходя из анализа данных, приведенных в таблице можно предположить, что интересным для рассмотрения является приложение технологий LoRaWAN и SigFox к WBAN в области телемедицины. В связи тем что рабочие частоты ZigBee не совпадают с наиболее распространенными 2400 МГц, применение данной технологии для медицинского мониторинга может оказаться более удачным, чем распространенных Bluetooth и Wi-Fi.

Заключение

В этой статье описаны основные характеристики систем WBAN, такие как энергопотребление, помехи, время ожидания, безопасность, конфиденциальность, надежность и выбор подходящего датчика. Также освещен вопрос о состоянии нескольких технологий беспроводной связи, чтобы определить их пригодность для медицинских приложений WBAN. Также рассмотрена роль 5G, B5G и 6G и их влияние на системы здравоохранения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Горышкин, Р. Д. Анализ свойств натальной беспроводной сети для цифрового здравоохранения / Р. Д. Горышкин // Проблемы и перспективы внедрения инновационных телекоммуникационных технологий : Сборник материалов VII Международной научно-практической очно-заочной конференции, Оренбург, 19 марта 2021 года. – Оренбург: Оренбургский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», 2021. – С. 39–45.
- Gardašević, G., Katzis, K., Bajić, D., & Berbakov, L. (2020). Emerging wireless sensor networks and internet of things technologies-foundations of smart healthcare. *Sensors*, 20(13), 3619.
- Nelson, B. D., Karipott, S. S., Wang, Y., & Ong, K. G. (2020). Wireless technologies for implantable devices. *Sensors*, 20(16), 4604.
- Antonescu, B., & Basagni, S. (2013). Wireless body area networks: challenges, trends and emerging technologies. In *Proceedings of the 8th international conference on body area networks* (pp. 1–7).
- Chen, M., Gonzalez, S., Vasilakos, A., Cao, H., & Leung, V. C. M. (2011). Body area networks: A survey. *Mobile networks and applications*, 16(2), 171–193.
- Al-Janabi, S., Al-Shourbaji, I., Shojafar, M., & Shamshirband, S. (2017). Survey of main challenges (security and privacy) in wireless body area networks for healthcare applications. *Egyptian Informatics Journal*, 18(2), 113–122.
- Olatinwo, D. D., Abu-Mahfouz, A., & Hancke, G. (2019). A survey on lpwan technologies in wban for remote health-care monitoring. *Sensors*, 19(23), 5268.
- Kumar, P., & Lee, H.-J. (2012). Security issues in healthcare applications using wireless medical sensor networks: A survey. *sensors*, 12(1), 55–91.
- Mainanwal, V., Gupta, M., & Upadhayay, S. K. (2015). A survey on wireless body area network: Security technology and its design methodology issue. In *2015 international conference on innovations in information, embedded and communication systems (ICIECS)* (pp. 1–5). IEEE.
- Sawaneh, I. A., Sankoh, I., & Koroma, D. K. (2017). A survey on security issues and wearable sensors in wireless body area network for healthcare system. In *2017 14th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)* (pp. 304–308). IEEE.
- Di Pietro, R., Mancini, L. V., & Mei, A. (2006). Energy efficient node-to-node authentication and communication confidentiality in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 12(6), 709–721.
- Venkatasubramanian, K. K., Banerjee, A., & Gupta, S. K. S. (2009). Pska: Usable and secure key agreement scheme for body area networks. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 14(1), 60–68.
- Liu, X., Zhang, R., & Zhao, M. (2019). A robust authentication scheme with dynamic password for wireless body area networks. *Computer Networks*, 161, 220–234.

14. Heinzl, A., Hebling, C., Müller, M., Zedda, M., & Müller, C. (2002). Fuel cells for low power applications. *Journal of Power Sources*, 105(2), 250–255.
15. Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P., & Soljačić, M. (2007). Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *science*, 317(5834), 83–86.
16. Liu, Y., Davaslioglu, K., & Gitlin, R. D. (2017). Energy efficiency optimization of channel access probabilities in iee 802.15. 6 uwb wbans. In 2017 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC) (pp. 1–6). IEEE.
17. Kodochigova A.V. POSSIBILITIES OF USING WIRELESS COMMUNICATION CHANNELS IN MEDICINE// Proceedings of the XIV International Multidisciplinary Conference «Innovations and Tendencies of State-of-Art Science». Mijnbestseller Nederland, Rotterdam, Nederland. 2021. DOI:10.32743/NetherlandsConf.2021.12.14.320419
18. Ng, H. S., Sim, M. L., & Tan, C. M. (2006). Security issues of wireless sensor networks in healthcare applications. *BT Technology Journal*, 24(2), 138–144.
19. Ayed, S., Chaari, L., & Fares, A. (2020). A survey on trust management for wban: Investigations and future directions. *Sensors*, 20(21), 6041.
20. Foster, K. R. (2000). Thermal and nonthermal mechanisms of interaction of radio-frequency energy with biological systems. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28(1), 15–23.
21. Fernandez, M., Espinosa, H. G., Guerra, D., Peña, I., Thiel, D. V., & Arrinda, A. (2020). Rf energy absorption in human bodies due to wearable antennas in the 2.4 ghz frequency band. *Bioelectromagnetics*, 41(1), 73–79.
22. Barakah, D. M. & Ammad-uddin, M. (2012). A survey of challenges and applications of wireless body area network (wban) and role of a virtual doctor server in existing architecture. In 2012 Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation (pp. 214–219). IEEE.
23. Abbasi, U. F., Awang, A. & Hamid, N. H. (2014). A cross-layer opportunistic mac/routing protocol to improve reliability in wban. In The 20th Asia-Pacific Conference on Communication (APCC2014) (pp. 36–41). IEEE.
24. Shaik, M. F. & Subashini, M. M. (2020). A new approach for interference mitigation in multiple wban using emrules. In 2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS) (pp. 266–269). IEEE.
25. George, E. M., & Jacob, L. (2020). Interference mitigation for coexisting wireless body area networks: Distributed learning solutions. *IEEE Access*, 8, 24209–24218.
26. Movassaghi, S., Abolhasan, M., Smith, D., & Jamalipour, A. (2014). Aim: Adaptive internetwork interference mitigation amongst co-existing wireless body area networks. In 2014 IEEE global communications conference (pp. 2460–2465). IEEE.
27. Pradhan, P. P., & Bhattacharjee, S. (2020). Interference minimized slot scheduling for coexisting wbans: Delay and priority-based approach. In *Optical and Wireless Technologies* (pp. 193–206). Springer.
28. Park, R. C., Jung, H., & Jo, S.-M. (2014). Abs scheduling technique for interference mitigation of m2m based medical wban service. *Wireless Personal Communications*, 79(4), 2685–2700.
29. Zhang, Z., Wang, H., Wang, C., & Fang, H. (2013). Interference mitigation for cyber-physical wireless body area network system using social networks. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 1(1), 121–132.
30. Pradhan, N. L., & Saadawi, T. (2011). Power control algorithms for mobile ad hoc networks. *Journal of Advanced Research*, 2(3), 199–206.
31. Taleb, H., Nasser, A., Andrieux, G. et al. Wireless technologies, medical applications and future challenges in WBAN: a survey. *Wireless Netw* 27, 5271–5295 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11276-021-02780-2>

УДК 621.3.089.62

Д. Ю. Кетов¹, А. И. Нефедьев²**ПРИМЕНЕНИЕ DDS-ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ МОНИТОРИНГА
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФА**¹ Волгоградский государственный медицинский университет² Волгоградский государственный технический университетe-mail: ya_st@bk.ru¹, nefediev@rambler.ru²

При эксплуатации электроэнцефалографов часто возникает проблема контроля технического состояния оборудования без его отрыва от процесса эксплуатации. Новизна подхода заключается в применении функционального генератора в составе распределенной измерительной системы. Для контроля технического состояния электроэнцефалографа была разработана распределенная автоматизированная измерительная система на основе функционального DDS-генератора, позволяющая сформировать специализированные сигналы различной формы и длительности, сформулированы требования к распределенной измерительной системе. Разработанный функциональный DDS-генератор сигналов произвольной формы может применяться для оценки качества и надежности функционирования медицинских приборов и систем с требуемой периодичностью, и с гибким графиком технического обслуживания, а также для моделирования тестовых последовательностей испытательных сигналов.

Ключевые слова: электроэнцефалограф, блок-схема, автоматизированная система тестирования, инструментальный контроль, проверка.

D. Yu. Ketov¹, A. I. Nefed'ev²

APPLICATION OF DDS-GENERATOR FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTROENCEPHALOGRAPH

¹ **Volgograd State Medical University**

² **Volgograd State Technical University**

During the operation of electroencephalographs, the problem of monitoring the technical condition of the equipment without interrupting it from the operation process often arises. To control the technical state of the electroencephalograph, a distributed automated measuring system based on a functional DDS-generator was developed, which allows the formation of specialized signals of various shapes and durations, requirements for a distributed measuring system were formulated. The developed functional DDS-arbitrary waveform generator can be used to assess the quality and reliability of the operation of medical devices and systems with the required frequency, and with a flexible maintenance schedule, as well as to simulate test sequences of test signals.

Keywords: electroencephalograph, block diagram, automated test system, instrumental control, verification.

Измерения играют важную роль в медицине при изучении свойств биологического объекта. Например, при оценке закономерностей, протекающих в электроэнцефалографии в нормальном состоянии и при различных видах патологии, в целях профилактики, диагностики и лечения различных заболеваний используют специальное измерительное оборудование. От точности аппаратных средств этого оборудования во многом зависит достоверность получаемых результатов, а также правильность постановки диагнозов и лечения заболеваний.

Каждое медицинское оборудование должно быть проверено на точность и надежность функционирования. При этом наибольший эффект достигается за счет применения средств автоматизации данного процесса, что приводит к уменьшению затрат времени на испытания оборудования [1].

Для проверки медицинских приборов используются генераторы сигналов специальной формы (как стандартные, так и специализированные). Для проверки измерительных приборов в медицине с целью контроля технического состояния приборов, аппаратов и систем наиболее часто применяются различные функциональные генераторы, например ГФ-05, Диатест-04 и генераторы сигналов специальной формы Г6-39, Г6-40. Они воспроизводят испытательные сигналы требуемой формы, частоты и значения напряжения, записанные на постоянных запоминающих устройствах. Рассмотрим основные достоинства и недостатки данных функциональных генераторов [2, 3].

Генератор функциональный ГФ-05, предназначенный для исследования, настройки, испытаний, проверки систем и приборов (используемых в радиоэлектронике, автоматике, приборостроении, биофизике, медицине в области инфранизких и низких частот), позволяет вы-

ставлять временные и амплитудные параметры выходного сигнала независимо друг от друга, а в ПЗУ генератора Диатест-04 записаны только сигналы из общих методик проверки кардиографов, нейромиографов, электроэнцефалографов, реографов и кардиомониторов без возможности их изменения [3]. При этом каналы некоторых медицинских приборов по их индивидуальным методикам проверки проверяются при других параметрах сигналов, чем указанные в общих методиках проверки (аппарат Рео-Спектр-01, для которого сигналы в его методике проверки не полностью совпадают с сигналами от функционального генератора Диатест-04) [4].

Канал ЧСС прикроватных мониторов «Тритон» проверяется импульсами прямоугольной формы с амплитудой 1 мВ при нестандартных частоте и длительности (в функциональном генераторе Диатест-04 эта возможность отсутствует).

Электроэнцефалограф «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» также не может быть поверен при помощи функционального генератора Диатест-04, поскольку этот функциональный генератор подключить напрямую к электроэнцефалографу невозможно. В его методике проверки описана возможность проверки с помощью входящего в комплект СИ специализированного коммутационного устройства с выходным разъемом, который непосредственно подключается к электроэнцефалографу вместо электродного кабеля отведений. Причем для корректной работы коммутационного устройства от функционального генератора ГФ-05 нужно выходное напряжение амплитудой несколько милливольт, а генератор Диатест-04 не позволяет выдавать ЭЭГ-сигнал такого уровня.

При контроле технического состояния системы суточного мониторинга электрокардиограммы «Поли-Спектр-СМ» пользуются

стандартным функциональным генератором ГФ-05 со стандартными ПЗУ и стандартными приставками. Но набор сигналов генератора ГФ-05 является нестандартным для системы «Поли-Спектр-СМ» из-за того, что частоты и амплитуды не соответствуют требуемым при проведении поверки (в функциональном генераторе Диатест-04 также отсутствует возможность установки соответствующих частот и амплитуд тестового сигнала).

Упомянутые выше генераторы (стандартные и специализированные) в основном применяются в качестве поверочных средств. В то же время они не могут быть использованы для целей демонстрации или контроля работы медицинских приборов или систем, обучения и повышения квалификации специалистов и медперсонала, а также моделирования сложных тестовых последовательностей сигналов.

Отсутствие функциональных генераторов сигналов с возможностью формировать сигналы сложной формы с необходимыми для заказчиков параметрами стало причиной создания специализированных поверочных средств [5, 6].

Применяемые в настоящее время функциональные генераторы по структуре представляют собой аппаратно реализованные устройства, которые позволяют решать узкоспециализиро-

ванные задачи, не требующие больших затрат времени. Программно реализованные системы эффективны при создании моделей тестовых последовательностей сигналов, применяемых при оценке качества работы алгоритмов. Однако если учесть, что все современные медицинские измерительные системы построены на базе ЭВМ. Это дает возможность строить испытательные системы, которые объединяют возможности аппаратных и программных средств.

Таким образом, необходима разработка испытательных систем, позволяющих обеспечить автоматизацию испытаний приборов, автоматизацию процессов поверки приборов, обработки и анализа выходной информации медицинских средств измерений.

Для разработки и построения испытательного стенда была применена концепция прямого цифрового синтеза сигнала. Сигнал записывается в память в цифровом виде, и далее через цифро-аналоговый преобразователь воспроизводится в аналоговом виде. Благодаря этому форма сигнала может быть любой, не ограничиваясь только синусоидальной или прямоугольной формой.

Структурная схема функционального генератора сигналов произвольной формы (*DDS-генератора*) показана на рис. 1.

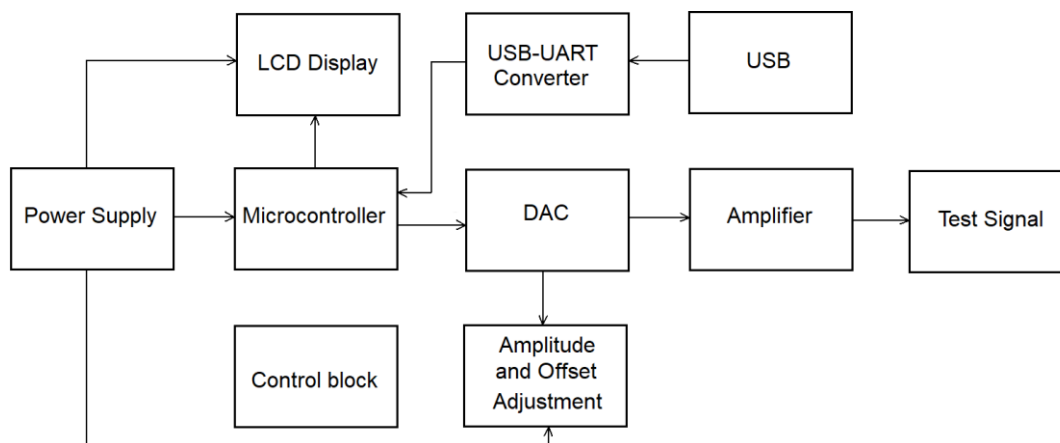


Рис. 1. Структурная схема функционального DDS-генератора сигналов произвольной формы

Основными частями данной структурной схемы являются блок управления, микроконтроллер фирмы *Atmel*, *LCD*-дисплей, преобразователь интерфейсов *USB-UART*, *USB* коннектор и поверочное коммутационное устройство, цифро-аналоговый преобразователь, усилитель и стабилизированный источник питания.

Цифро-аналоговый преобразователь позволяет формировать выборку, поступающую из

ЭВМ, а усилитель, работающий в режиме вычитания, представит возможность смещения выборки в отрицательные значения, что позволит сформировать выходной сигнал как в монополярной форме, так и в биполярной форме. Цифро-аналоговый преобразователь построен на основе резистивной матрицы типа *R-2R*.

В результате проведенных исследований был создан рабочий прототип (макет) функ-

ционального *DDS*-генератора сигналов произвольной формы и интерфейсная программа для персонального компьютера.

На рис. 2 представлена форма тестового сигнала, созданная с помощью массива данных

с использованием ранее разработанной модели тестового сигнала. Изменяя частоту, временные параметры и амплитуду сигнала можно получить разные виды сигналов.

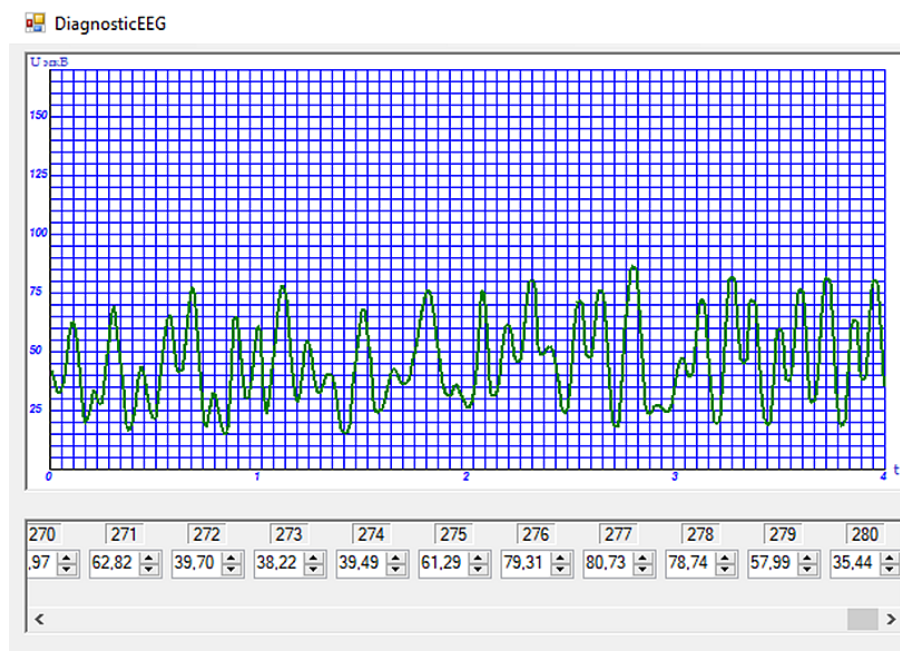


Рис. 2. Окно с отображением этапа расчета значений статистических характеристик сформированного ЭЭГ-сигнала

При введении значений реперных точек сигнала в активированной нами ранее области, происходит отображение формы создаваемого диагностического ЭЭГ-сигнала.

После формирования ЭЭГ-сигнала идет сле-

дующая стадия – расчет значений статистических характеристик сформированного сигнала.

На рис. 3 представлен рабочий макет функционального *DDS*-генератора сигналов произвольной формы.



Рис. 3. Макет функционального *DDS*-генератора сигналов произвольной формы

Разработанный функциональный DDS-генератор сигналов произвольной формы дает возможность изменять в широких пределах частоту и амплитуду сигнала, считываемого из ПЗУ, задавать с компьютера любую нестандартную форму сигналов, отличающиеся от сигналов, встроенных в приборы, а также использовать различные коммутационные устройства и т. д.

Разработанный функциональный DDS-генератор сигналов произвольной формы может применяться для оценки качества и надежности функционирования медицинских приборов и систем, для моделирования тестовых последовательностей испытательных сигналов, для проверки качества работы алгоритмов функционирования приборов, для демонстрации работы приборов, а также для обучения медперсонала и повышения квалификации специалистов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Условия проведения испытаний на безотказность и статистические критерии и методы оценки их результатов. ГОСТ Р 27.607-2013. – М., 2015. – 46 с.
2. Контроль технического состояния и функционирования медицинских изделий. ГОСТ Р 56606-2015. – М., 2016. – 11 с.
3. Гуревич, М. Л. Генератор Функциональный ГФ-05 / Ю. А. Гагарин, Р. А. Нижаметдинов. – М.: Министерство здравоохранения, 1988. – 77 с.
4. Генератор функциональный Диатест-4. Руководство по эксплуатации ВКФУ.468789.109РЭ. – М. – 2008. – 69 с.
5. Кетов, Д. Ю. Автоматизированный сетевой стенд для оперативных испытаний энцефалографа / Д. Ю. Кетов, Ю. П. Муха // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 11 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – Вып. 12. – С. 84–88.
6. Кетов, Д. Ю. Распределенная система для контроля технического состояния электроэнцефалографа на основе функционального генератора / Д. Ю. Кетов, А. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2021. – № 2. – С. 15–18.

УДК 681.518.3

И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, С. В. Мишуков
ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ И ПРИМЕСЕЙ ПРОДУКТОВ
НА ОСНОВЕ МЕТОДА СРАВНЕНИЯ С МЕРОЙ
В СОСТАВЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Ставропольский государственный аграрный университет

e-mail: stas.mishukov.92@mail.ru

Одним из эффективных методов повышения точности измерений влажности и примесей продуктов является применение методов сравнения с мерой, которые могут быть реализованы в современной информационно-измерительной системе, построенной на основе авторского алгоритма идентификации электрофизических параметров емкостных датчиков. В статье приведена функциональная схема такой системы, подробно описан принцип ее работы и выполнены экспериментальные исследования на опытном образце измерительной установки, показавшие предельную относительную погрешность измерений не более $\pm 0,29\%$, что свидетельствует о работоспособности и высокой точности предлагаемой системы.

Ключевые слова: мера, сравнение, влажность, примеси, емкостной датчик.

I. N. Vorotnikov, M. A. Mastepanenko, Sh. Zh. Gabrielyan, S. V. Mishukov
IMPROVING THE ACCURACY OF MEASUREMENTS OF MOISTURE
AND IMPURITIES OF PRODUCTS BASED ON THE METHOD OF COMPARISON
WITH A MEASURE AS PART OF AN INFORMATION-MEASURING SYSTEM

Stavropol State Agrarian University

One of the effective methods of increasing the accuracy of measurements of humidity and impurities of products is the use of comparison methods with the measure, which can be implemented in a modern information and measurement system built on the basis of an original algorithm for identifying the electrophysical parameters of capacitive sensors. The article presents a functional diagram of such a system, describes in detail the principle of its operation and carried out experimental studies on a prototype of a measuring installation, which showed a marginal relative measurement error of no more than $\pm 0.29\%$, which indicates the workability and high accuracy of the proposed system.

Keywords: measure, comparison, humidity, impurities, capacitive sensor.

Введение

Одна из важнейших задач метрологии заключается в повышении точности результатов измерений физических величин с помощью применения новых или совершенствования старых методов с учетом достижений современной науки и техники [1]. Существующие методы измерений принято разделять на мето-

ды непосредственной оценки, при которых определение исследуемой величины выполняется по применяемому средству измерений (шкале, табло, экрану и т. д.), и методы сравнения с мерой, которые реализуют принципы сопоставления измеряемой величины со значением подобной величины, воспроизводимой эталоном или мерой (рис. 1).

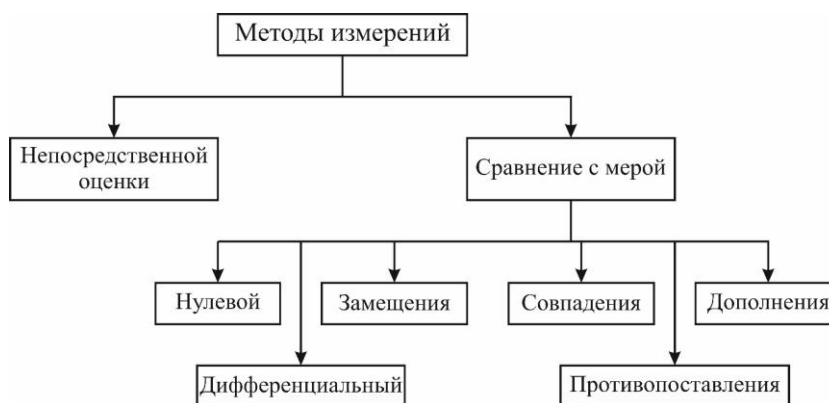


Рис. 1. Методы измерений

Преимуществом методов сравнения с мерой является высокая точность, вследствие исключения погрешности измерительного преобразователя из результата измерений, что приводит к увеличению чувствительности и сокращению диапазонов измерения [2].

Основная часть

Это факт послужил причиной для поиска возможности повышения точности измерений разрабатываемой информационно-измерительной системы (ИИС) для оценки влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов, постро-

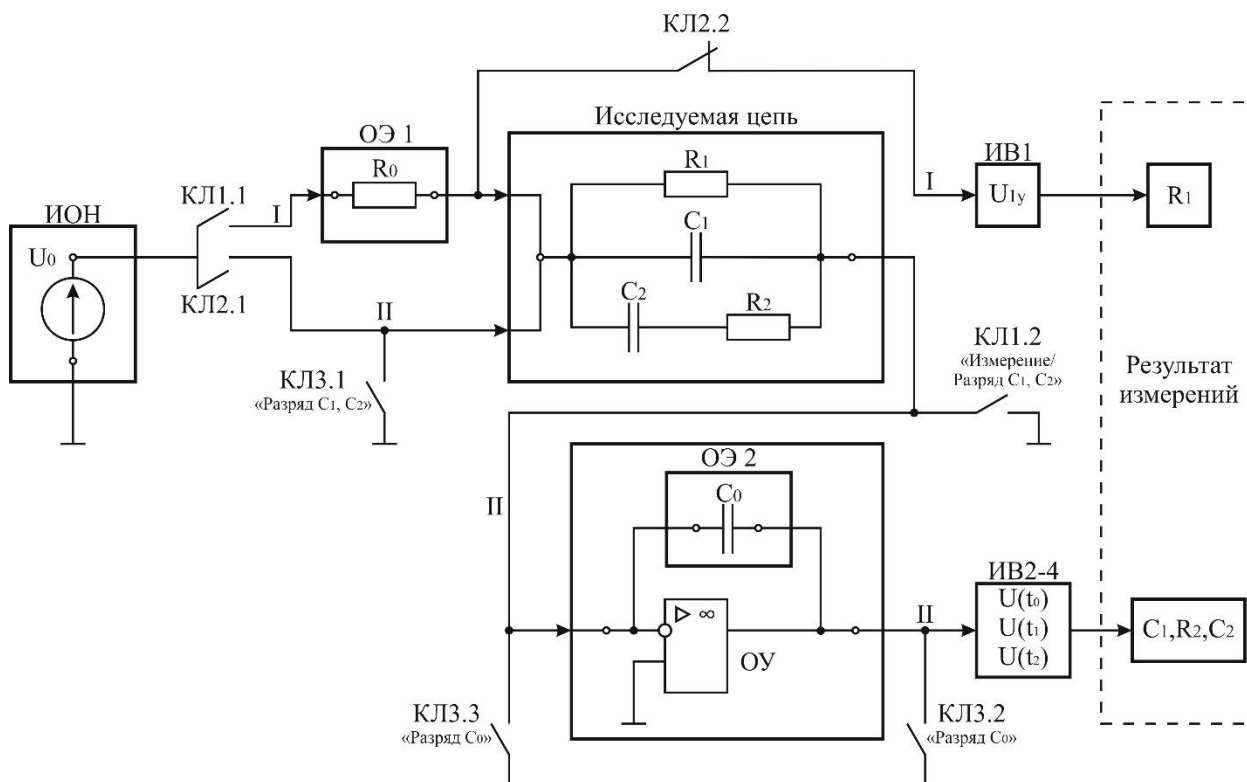


Рис. 2. Структурная схема метода идентификации параметров ЕД

енной на основе оригинального метода идентификации параметров емкостных датчиков (ЕД), представляющего из себя двухэтапный алгоритм измерений в установившемся и переходном режимах измерительной схемы (ИС), принцип работы которого показан на структурной схеме ниже (рис. 2) [3].

В структурной схеме ЕД представлен в виде четырехэлементной RC -цепи, включающей в себя сквозное активное сопротивление R_1 , емкости деформационной C_1 и релаксационной C_2 поляризации, релаксационное сопротивление R_2 . Указанная RC -цепь соответствует ЕД с помещенным в него сельскохозяйственным продуктом и описывает его электрофизические свойства, что подтверждено экспериментально в работах [4–5]. Помимо этого, в схеме на рис. 2 обозначены следующие элементы: I/II – этапы измерений; ИОН – источник опорного напряжения $U_0 = 5$ В; ОЭ1 – опорный элемент в виде образцового резистора R_0 ; ОЭ2 – опорный элемент в виде образцового конденсатора C_0 ; ОУ –

операционный усилитель; КЛ1.1-2 – ключи для первого этапа измерений; КЛ2.1-2 – ключи для второго этапа измерений; КЛ3.1-3 – разрядные ключи для снятия заряда с конденсаторов ИС; ИВ1-4 – измеряемые величины напряжений U_{1y} , $U(t_0)$, $U(t_1)$ и $U(t_2)$.

Описание алгоритма работы и исследования метода идентификации параметров ЕД представлены в трудах [6–7], при этом следует отметить, что информативным параметром RC -цепи, описывающим влажность, является емкость C_2 , характеризующая количество и размер частиц воды в исследуемом продукте, а дополнительными параметрами являются остальные три элемента – R_1 , C_1 и R_2 , описывающие наличие примесей растительного, животного и минерального характера. Исходя из этого была разработана функциональная схема ИИС для оценки влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов (рис. 3), в которой влажность W представлена в виде функции от емкости C_2 – $W = f(C_2)$, а наличие примесей описано функцией – $AdS = f(R_2, R_1, C_1)$.

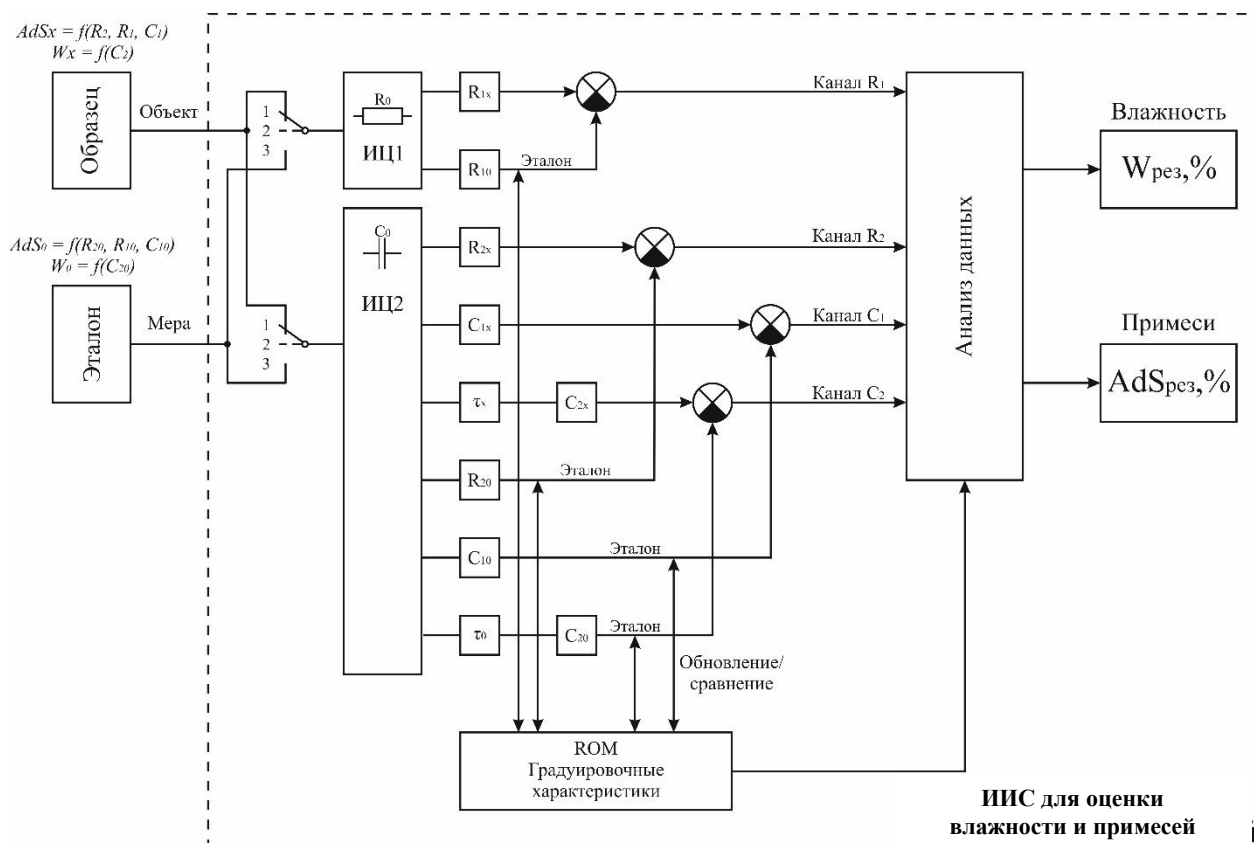


Рис. 3. Функциональная схема ИИС для оценки влажности и примесей

Данная схема построена с учетом метода сравнения с мерой, при котором определяемые электрофизические параметры R_{1x} , C_{1x} , R_{2x} и C_{2x}

исследуемого образца сельскохозяйственного продукта неизвестной влажности и количества примесей, сравниваются посредством устрой-

ства сравнения с электрофизическими параметрами R_{10} , C_{10} , R_{20} и C_{20} эталонного образца чистого сухого сельскохозяйственного продукта, выступающего в качестве меры, в результате чего устанавливается соотношение между указанными параметрами, повышающее точность результатов измерения за счет снижения постоянных систематических и мультипликативных погрешностей.

Принцип работы указанной схемы ИИС заключается в следующем: в один контейнер ЕД помещается сельскохозяйственный продукт с неизвестной влажностью W_x и количеством примесей AdS_x , выступающий в качестве образца или объекта исследования, в другой контейнер помещается такой же продукт, предварительно высушенный до установленного значения W_0 и очищенный от примесей AdS_0 , представляющий их себя эталон или меру сравнения, которые по заданному алгоритму идентификации электрофизических параметров ЕД подключаются к измерительным цепям (ИЦ) 1-2, имеющим в своем составе ИС первого и второго этапа измерений с опорными элементами в виде резистора R_0 и конденсатора C_0 , в результате чего определяются параметры R_{1x} , C_{1x} , R_{2x} и C_{2x} объекта исследования и R_{10} , C_{10} , R_{20} и C_{20} эталона, которые поступают в звенья сравнения в виде компараторов, где происходит сравнение входных сигналов и установление их соотношения, передаваемого по каналам R_1 , C_1 , R_2 и C_2 в блок анализа данных, выполняющего окончательные вычисления влажности $W_{рез.}$ и примесей $AdS_{рез.}$ продукта на основе полученной информации от компараторов и записанных в долговременную память ROM градуировочных характеристик.

На основе предлагаемой функциональной схемы и алгоритма работы ИИС для оценки влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов разработан опытный образец измерительной установки (рис. 4), построенный на основе двух аппаратно-программных платформ Arduino Uno с микроконтроллером Atmel ATmega328P и пяти каналов подключения ЕД, что позволит в полной мере реализовать многоканальный режим работы системы.

Проверка работоспособности опытного образца разработанной ИИС выполнялась мето-



Рис. 4. Опытный образец ИИС для оценки влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов

дом сравнения результатов измерения влажности отобранных проб сельскохозяйственных продуктов с использованием методик по ГОСТ, как наиболее точных и применяемых в лабораторных условиях при поверке и градуировке приборов, и влагомера Wile-55 производства фирмы «Farmcomp», принятого за образцовый прибор промышленного исполнения. Согласно государственным стандартам определение влажности отобранных продуктов выполняется воздушно-тепловым методом, заключающимся в сушке пробы материала до достижения равновесия с окружающей средой, такое равновесие равнозначно полному удалению влаги из материала. Сушка отобранных проб материала выполнялась в сушильном шкафу СЭШ-3М производства ООО «НПО Промавтоматика», взвешивание навесок исследуемого материала выполнялось на лабораторных весах ВК-600 производства ЗАО «МАССА-К», измельчение проб производилось на лабораторной мельнице ЛЗМ-1М производства «НВ-лаб». Влагомер Wile-55 представляет собой переносной микропроцессорный электронный прибор, который обеспечивает вывод процентного содержания влажности и названия контролируемых зерновых, зернобобовых, масличных культур и семян трав на электронный дисплей. Прибор сертифицирован и внесен в Государственный реестр средств измерений РФ под № 206801-00 и допущен к применению в РФ. Полученные результаты измерений представлены в таблице.

**Сравнительная оценка относительной погрешности измерения влажности
сельскохозяйственных продуктов**

Исследуемый продукт, ГОСТ	Влажность W , % по ГОСТ	Влажность W , % по образцовому прибору Wile-55	Относительная погрешность измерения σ , %	Влажность W , % по разраб. ИИС	Относительная погрешность измерения σ , %
Пшеница ГОСТ 13586.5-2015	11,82	11,98	$\pm 1,52$	11,84	$\pm 0,17$
Ячмень ГОСТ 13586.5-2015	14,95	15,21	$\pm 1,73$	14,99	$\pm 0,26$
Соя ГОСТ 10856-96	13,99	14,25	$\pm 1,85$	14,03	$\pm 0,28$
Рис ГОСТ 10856-96	16,73	16,99	$\pm 1,55$	16,78	$\pm 0,29$
Крахмал ГОСТ Р 55802-2013	18,26	18,74	$\pm 2,62$	18,31	$\pm 0,27$
Мука ГОСТ 9404-88	14,91	15,23	$\pm 2,14$	14,95	$\pm 0,26$

Заключение

Результат разработки и исследования ИИС для оценки влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов позволяют подвести следующие итоги проделанной работы:

1. Установлена возможность применения в составе ИИС методов сравнения с мерой, которые позволяют повысить точность результатов измерения, что подтверждается выполненными экспериментальными исследованиями на опытном образце, показавшими предельную относительную погрешность результатов измерения $\pm 0,29$ %;

2. Выявлена возможность проведения многоканальных измерений исследуемого и эталонного продукта, помещенных в разные ЕД, что позволяет увеличить быстродействие системы и расширить количество измерений, выполняемых одновременно;

3. Показана структурная схема алгоритма идентификации электрофизических параметров ЕД, на основе которой разработана функциональная схема ИИС, построенная на методах сравнения исследуемого продукта неизвестной влажности и чистоты с эталонным образцом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шилин, А. Н. Основы теории точности измерительных систем: учеб.-метод. пособие / А. Н. Шилин, В. Е. Аввакумов, С. В. Макартичян; ВолгГТУ. – Волгоград: ВолгГТУ, 2020. – 176 с.
2. Метрология. Теория измерений: учебник и практикум / Т. И. Мурашкина, В. А. Мещеряков, Е. А. Бадеева, Е. В. Шалобаев. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2018. – 155 с.
3. Многозадачная измерительная система для определения влажности и примесей продуктов / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, С. В. Мишуков // Сельский механизатор. – 2019. – № 11. – С. 21–23.
4. Машошин, П. В. Преобразователь параметров емкостного датчика для диэлектрических влагомеров / П. В. Машошин, В. П. Чураков, М. Ю. Щербаков // Датчики и системы. – 2003. – № 1. – С. 24–26.
5. Емкостный коаксиальный датчик для определения влажности и качества сыпучих сельскохозяйственных продуктов / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, С. В. Мишуков // Сельский механизатор. – 2021. – № 9. – С. 33–35.
6. Моделирование измерительных схем емкостных датчиков в среде SimInTech / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, С. В. Мишуков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2021. – № 3(37). – С. 48–53.
7. Совершенствование способа определения влажности и примесей продуктов / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, С. В. Мишуков // Сельский механизатор. – 2019. – № 4. – С. 38–39.

УДК 537.226 / 674.04(07)

*С. В. Макартичан, А. П. Верхоглядов***УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГИ В ДРЕВЕСИНЕ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: hymir@mail.ru

Современное технологическое оборудование сушки древесины не позволяет обеспечить постоянства влажности габаритных изделий по всему объему, что зачастую приводит к отклонениям от установленных пределов влажности. Это приводит к браку и потерям не только в материалах, но и в тепловой и электрической энергии. Особенно это касается дорогостоящих изделий из древесины. В настоящей статье рассмотрены основные методы измерения и контроля влажности, используемые при конструировании влагомеров древесины, и проведен их сравнительный анализ. Предложена структурная схема цифрового прибора контроля влажности с емкостными преобразователями, позволяющего оценить неравномерность распределения влаги по ширине крупногабаритных изделий из древесины при их сушке. Предлагаемое устройство может найти применение не только на деревообрабатывающих предприятиях, но и в других отраслях промышленности при измерении влажности любых изделий.

Ключевые слова: сушка древесины, измерения и контроль влажности, емкостный преобразователь, диэлектрический метод, оценка неравномерности распределения влаги.

*S. V. Makartichyan, A. P. Verkhoglyadov***DEVICE FOR MONITORING THE UNEVEN DISTRIBUTION OF MOISTURE IN WOOD****Volgograd State Technical University**

Modern technological equipment for wood drying does not allow for a constant moisture content of overall products throughout the volume, which often leads to deviations from the established moisture limits. This leads to rejects and losses not only in materials, but also in thermal and electrical energy. This is especially true for expensive wood products. In this article, the main methods for measuring and controlling moisture content used in the wood moisture meters design are considered, and their comparative analysis is carried out. A block diagram of a digital moisture control device with capacitive transducers is proposed, which makes it possible to evaluate the uneven distribution of moisture over the width of large-sized wood products during their drying. The proposed device can be used not only in woodworking enterprises, but also in other industries when measuring the moisture content of any products.

Keywords: wood drying, moisture measurement and control, capacitive transducer, dielectric method, assessment of uneven distribution of moisture.

Введение

Решение задач деревообрабатывающей промышленности означает увеличение производительности труда, экономию сырья, повышение качества продукции на основе автоматизации технологических процессов. Решение этих задач во многом зависит от особенностей древесины, следовательно, и от совершенствования процесса ее сушки [5, 16]. Это объясняется тем, что допустимый разброс влажности высушенной древесины ограничен довольно узкими пределами [1–6]. Современное технологическое оборудование сушки древесины не позволяет обеспечить постоянства влажности габаритных изделий по всему объему, что зачастую приводит к отклонениям от установленных пределов влажности. Это приводит к браку и потерям не только в материалах, но и в тепловой и электрической энергии. Особенно это касается дорогостоящих изделий из древесины.

Несмотря на то что в настоящее время разработано большое количество методов и средств измерения влажности, не все из них могут быть использованы для непрерывного быстрого измерения влажности дорогостоящих изделий из древесины [8–12].

Теоретическая часть

Существуют прямые и косвенные методы контроля влажности. В основе прямых методов лежит распределение исследуемого вещества или материала на влагу и сухой остаток. Прямые методы контроля влажности обладают достаточной точностью, но трудно поддаются автоматизации и требуют длительного времени. Прямые методы в основном используются для градуировки и поверки влагомеров косвенного действия.

Косвенные методы основаны на том, что содержание влаги в веществе влияет на его фи-

зические свойства: тепловые, оптические, механические, электрофизические и т. д. Функциональная связь этих свойств с содержанием влаги служит основой построения различных типов влагомеров, работающих по принципу косвенного определения влажности материалов и веществ.

В технике сушки пиломатериалов применяют термогравиметрический (весовой) способ контроля влажности, относящийся к прямым способам, и электрический способ, основанный на функциональной зависимости электрических свойств материала от влажности.

Весовой способ контроля влажности основан на взвешивании и высушивании образцов (проб), отбираемых из партии сортиментов, влажность которых подлежит определению. Существенным недостатком этого метода является длительность определения влажности: от нескольких часов до суток и более. Погрешность этого метода зависит от применяемой аппаратуры, техники высушивания и от промежутков времени между окончанием сушки и взвешиванием образца из-за возможного поглощения влаги из окружающей среды.

Точность метода высушивания довольно высока (порядка 0,5 %) и поэтому этот метод используется в качестве образцового для градуировки влагомеров, использующих косвенный метод определения содержания влаги.

Из косвенных методов наибольшее распространение получили физические методы, основанные на преобразовании влажности в другую физическую или физико-химическую величину, более удобную для измерения и дальнейших преобразований.

В *кондуктометрическом методе* оценка влагосодержания производится по результатам измерения электрического сопротивления (объемного или поверхностного). Кондуктометрический метод применяется для определения влажности в диапазоне от 2 до 30 %. При влажности около 30 % метод имеет высокую чувствительность из-за степенной зависимости сопротивления от влажности. Главным достоинством этого метода является простота схемы и конструкции измерительного прибора. Однако контактный способ измерения и влияние на результат измерения температуры и уплотнения, а также сравнительно узкий диапазон измерения ограничивают область применения этого метода.

Диэлькометрический метод основан на зависимости диэлектрических свойств материала

(комплексной диэлектрической проницаемости и ее составляющих) от его влагосодержания. Этот метод по сравнению с кондуктометрическим обладает следующими достоинствами: бесконтактные измерения, меньшая чувствительность к уплотнению и температуре материала, более высокое быстродействие и меньшая погрешность измерения (около 0,5 %).

Для контроля влажности материалов используются также *сверхвысокочастотные (СВЧ) методы*, принцип действия которых основан на определении влажности по отраженным или прошедшим через контролируемое вещество электромагнитным волнам. В качестве информативного параметра используются амплитуда, фаза, угол поворота плоскости поляризации линейно поляризованной плоской электромагнитной волны. В качестве достоинств СВЧ метода необходимо отметить следующее: большая чувствительность, высокая точность, возможность бесконтактных измерений, незначительная чувствительность к физико-химическим свойствам исследуемых веществ и материалов. Однако СВЧ влагомеры не получили пока широкого практического применения, что является следствием сложности и стоимости аппаратуры.

Теплофизические методы основаны на зависимости от влажности материала его теплофизических параметров – коэффициентов теплопроводности и температуропроводности и удельной теплоемкости. Теплофизические влагомеры отличаются простотой конструкции; их можно использовать для измерений в полевых и производственных условиях. К недостаткам этого метода следует отнести влияние плотности материала, поверхностной влаги в зоне контакта и термического контакта с чувствительным элементом на точность измерения. В то же время теплофизические методы не применяются для контроля влажности древесины, поскольку этот метод требует введения датчика в массу материала.

Ультразвуковые методы основаны на зависимости характеристик ультразвуковых колебаний от свойств и состава среды, в которой распространяется ультразвук.

Физической основой *нейтронного метода* является замедление ядрами водорода, содержащегося во влажном исследуемом веществе, быстрых нейтронов, которые теряют часть своей энергии и превращаются в медленные со значительно меньшей энергией. В качестве ис-

точников нейтронов используют источники на базе бериллия. К преимуществам нейтронного метода следует отнести возможность измерения влажности в широком диапазоне, нечувствительность к распределению влаги, составу и плотности, возможность исследования динамики сушки и увлажнения. Основными недостатками метода являются влияние на показания влагомера содержания элементов – эффективных поглотителей нейтронов и необходимость биологической защиты.

В основе *гамма-методов* лежит ослабление интенсивности гамма-излучения твердой фазой и влагой исследуемого материала в результате рассеяния и поглощения атомами вещества.

Рентгеновский метод является более чувствительным из-за сильного поглощения влагой рентгеновского излучения. Источником излучения служит рентгеновская трубка. Метод пригоден для исследования влаги по объему образца в процессе сушки или увлажнения.

Использование радиометрических методов (нейтронный, гамма-методы, рентгеновский) ограничено дороговизной и сложностью оборудования.

Ядерный магнитный резонанс в настоящее время является одним из перспективных методов анализа состава веществ животного и растительного происхождения. Основу метода ядерного магнитного резонанса составляет резонансное поглощение радиочастотной энергии ядрами водорода воды при внесении влажного вещества или материала в постоянное магнитное поле. Высокая стоимость, сложность, сле-

довательно, и потребность в высококвалифицированном обслуживающем персонале ограничивают внедрение влагомеров, использующих метод ядерного магнитного резонанса.

Оптические методы основаны на измерении избирательного поглощения влагой излучения определенной длины волны, либо отраженного поверхностью исследуемого материала, либо проходящего через него. Для контроля влажности древесины оптические методы неприменимы вследствие оптической непрозрачности этого материала, а измерения характеристик отраженного излучения позволяют получить информацию только о поверхностном распределении влаги в материале.

Термовакuumный метод основан на том, что при десорбции в вакууме влаги из слоя материала его температура уменьшается. Когда измерения проводят в герметизированной камере, из которой непрерывно откачивают воздух и пары воды, поддерживая давление не выше 100–200 Па, и толщина слоя относительно невелика (3–15 мм), то температура пробы имеет хорошо выраженный экстремум, однозначно связанный с влажностью. Время определения влажности составляет 1–5 мин, а погрешность близка к погрешности термогравиметрического метода. Сложность и дороговизна оборудования термовакuumного метода ограничивают его применение.

Сравнительный анализ основных способов контроля влажности методом экспертных оценок приведен в таблице (0 – минимальная оценка, 10 – максимальная оценка) [17–20].

Сравнительный анализ основных методов контроля влажности

Метод	Время измерения	Диапазон измерений	Погрешность метода	Возможность бесконтактных измерений	Возможность автоматизации измерений	Влияющие факторы	Сложность и дороговизна оборудования	Сумма
Термогравиметрический	2	10	10	0	0	10	4	36
Кондуктометрический	9	5	6	0	5	4	9	38
Диэлькометрический	9	9	8	10	10	6	9	61
Радиометрический	8	9	8	10	10	7	0	52
Метод ЯМР	8	9	8	10	10	7	0	52
Оптический	9	10	9	10	10	6	5	59
Термовакuumный	6	8	9	0	0	9	2	34
СВЧ	9	7	9	10	10	6	5	56
Теплофизический	7	6	8	0	8	6	5	40
Ультразвуковой	8	6	8	10	8	6	4	50

На основе проведенного анализа существующих методов и средств контроля влажно-

сти, которые можно использовать для контроля древесины, видно, что диэлькометрический ме-

тод измерения позволяет измерять интегральную влажность всей детали бесконтактным способом и не требует сложного и дорогого оборудования.

Основными трудностями создания диэлькометрических влагомеров являются сильная зависимость результатов измерения влажности от породы, плотности древесины и температуры. Кроме того, важным фактором является неравномерность распределения влаги по ширине заготовок.

В статье предлагается цифровой диэлькометрический влагомер древесины, позволяющий оценить неравномерность распределения влаги по ширине заготовок. Это позволит контролировать постоянство влажности габаритных изделий по всему объему при их сушке.

На рис. 1 изображена структурно-функциональная схема цифрового диэлькометрического влагомера древесины, на рис. 2 – временные диаграммы, поясняющие работу прибора.

Предлагаемое устройство содержит емкостные преобразователи 1, 2, 3, расположенные по ширине контролируемой заготовки 4. Емкостные преобразователи 1, 2, 3 включены во времязадающую цепь генератора 6 через трехпозиционный переключатель 5, управляемый микроконтроллером 7. К счетному входу микроконтроллера 7 подключен генератор 6, а к одному из портов ввода-вывода – цифровой индикатор 8.

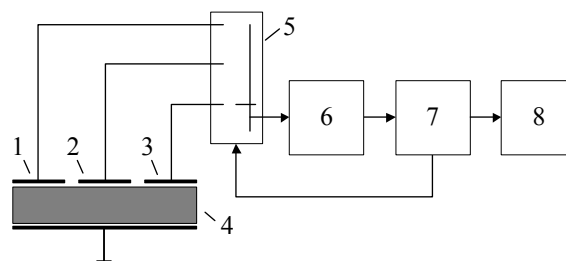


Рис. 1. Структурно-функциональная схема влагомера

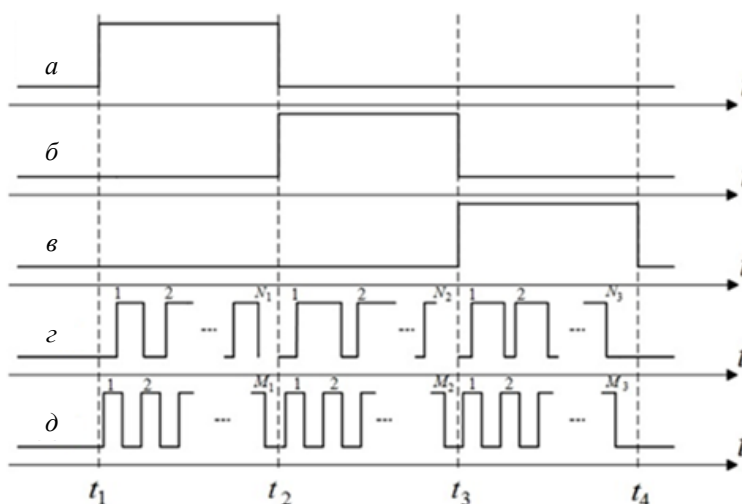


Рис. 2. Временные диаграммы работы влагомера

Емкостные преобразователи 1, 2, 3 позволяют производить контроль неравномерности распределения влаги по ширине пиломатериала. Трехпозиционный переключатель 5 позволяет коммутировать емкостные преобразователи 1, 2, 3, установленные для оценки неравномерности распределения влаги по ширине пиломатериала, с генератором 6, причем микроконтроллер 7 позволяет распределить во времени эти измерения. Результаты измерений с оценкой неравномерности распределения влаги по ширине пиломатериала выводится на индикатор 8.

При измерении влажности пиломатериала в момент времени t_1 микроконтроллер 7 производит включение емкостного преобразователя 1

во времязадающую цепь генератора 6 через коммутатор 5 (рис. 2, а). В момент времени t_1 на разрешающем входе генератора 6 устанавливается логический уровень напряжения, разрешающий генерирование, и микроконтроллер 7 запускает два внутренних счетчика, первый из которых предназначен для счета импульсов генератора 6, второй счетчик – для счета тактовых импульсов внутреннего генератора микроконтроллера 7 (рис. 2, г, д).

В момент времени t_2 происходит отключение емкостного преобразователя 1 из времязадающей цепи генератора 6 (рис. 2, а), микроконтроллер 7 останавливает оба внутренних счетчика, в которых к этому моменту форми-

руются двоичные коды N_1 и M_1 . Двоичный код $M_1 = N_1 \cdot T_1 / T_0$ на выходе второго счетчика микроконтроллера 7 пропорционален емкости преобразователя 1 с пиломатериалом, следовательно, связан с влажностью образца (N_1 – количество периодов генератора 6, подсчитанных счетчиком; T_1 – период следования прямоугольных импульсов генератора 6, прямо пропорционально связанный с емкостью емкостного преобразователя 1 с образцом; T_0 – период следования тактовых импульсов внутреннего генератора микроконтроллера 7).

При измерении влажности пиломатериала в момент времени t_2 микроконтроллер 7 производит включение емкостного преобразователя 2 во времязадающую цепь генератора 6 через коммутатор 5 (рис. 2, б). В момент времени t_2 на разрешающем входе генератора 6 устанавливается логический уровень напряжения, разрешающий генерирование, и микроконтроллер 7 запускает два внутренних счетчика, первый из которых предназначен для счета импульсов генератора 6, второй счетчик – для счета тактовых импульсов внутреннего генератора микроконтроллера 7 (рис. 2, г, д).

В момент времени t_3 происходит отключение емкостного преобразователя 2 из времязадающей цепи генератора 6 (рис. 2, б), микроконтроллер 7 останавливает оба внутренних счетчика, в которых к этому моменту формируются двоичные коды N_1 и M_1 . Двоичный код $M_2 = N_2 \cdot T_2 / T_0$ на выходе второго счетчика микроконтроллера 7 пропорционален емкости преобразователя 2 с пиломатериалом, следовательно, связан с влажностью образца (N_2 – количество периодов генератора 6, подсчитанных счетчиком; T_2 – период следования прямоугольных импульсов генератора 6, прямо пропорционально связанный с емкостью емкостного преобразователя 2 с образцом; T_0 – период следования тактовых импульсов внутреннего генератора микроконтроллера 7).

При измерении влажности пиломатериала в момент времени t_3 микроконтроллер 7 производит включение емкостного преобразователя 3 во времязадающую цепь генератора 6 через коммутатор 5 (рис. 2, в). В момент времени t_3 на разрешающем входе генератора 6 устанавливается логический уровень напряжения, разрешающий генерирование, и микроконтроллер 7 запускает два внутренних счетчика, первый из которых предназначен для счета импульсов генератора 6, второй счетчик – для счета такто-

вых импульсов внутреннего генератора микроконтроллера 7 (рис. 2, з, д).

В момент времени t_4 происходит отключение емкостного преобразователя 3 из времязадающей цепи генератора 6 (рис. 2, в), микроконтроллер 7 останавливает оба внутренних счетчика, в которых к этому моменту формируются двоичные коды N_1 и M_1 . Двоичный код $M_3 = N_3 \cdot T_3 / T_0$ на выходе второго счетчика микроконтроллера 7 пропорционален емкости преобразователя 3 с пиломатериалом, следовательно, связан с влажностью образца (N_3 – количество периодов генератора 6, подсчитанных счетчиком; T_3 – период следования прямоугольных импульсов генератора 6, прямо пропорционально связанный с емкостью емкостного преобразователя 3 с образцом; T_0 – период следования тактовых импульсов внутреннего генератора микроконтроллера 7).

По двоичным кодам M_1 , M_2 , M_3 микропроцессор микроконтроллера 7 находит в памяти значения влажности пиломатериала, которые выводятся на цифровой индикатор 8. В памяти микроконтроллера 7 должна находиться градуировочная характеристика для определения влажности по двоичному коду M .

Выводы

Применение цифрового прибора контроля влажности пиломатериалов, позволяет контролировать неравномерность распределения влаги по ширине пиломатериала, что особенно важно для оценки качества изделий после камерной сушки. Использование предложенного устройства позволит повысить быстродействие и оценить эффективность использования различных режимов сушки пиломатериалов для достижения постоянства влажности габаритных изделий по всему объему.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1973. – 300 с.
2. Берлинер, М. А. Измерения влажности в диапазоне СВЧ / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 157 с.
3. Берлинер, М. А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1965. – 354 с.
4. ГОСТ 16588–91. Продукция и деревянные детали. Методы определения влажности. М. : Изд-во стандартов, 1991. – 20 с.
5. Кречетов, И. В. Сушка древесины / И. В. Кречетов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Бриз, 1997. – 500 с.
6. Кричевский, Е. С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов / Е. С. Кричевский, А. Г. Волченко, С. С. Галушкин ; под. ред. Е. С. Кричевского. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.

7. Лапшин, А. А. Электрические влагомеры / А. А. Лапшин. М. : Госэнергоиздат, 1960. – 115 с.
8. Макартичан, С. В. Системы непрерывного контроля влажности паркетной доски в процессе ее производства: автореф. дис. канд. техн. наук / Макартичан С. В. – Волгоград, 2011. – 133 с.
9. Макартичан, С. В. Цифровой поточный измеритель влажности / С. В. Макартичан, А. Н. Шилин // Патент России № 2397483. Оpubл. 20.08.2010. Бюл. № 23.
10. Макартичан, С. В. Цифровой поточный измеритель влажности / С. В. Макартичан, А. Н. Шилин // Патент России № 92193. Оpubл. 10.03.10. Бюл. № 7.
11. Макартичан, С. В. Цифровой поточный измеритель влажности тонких листовых материалов / С. В. Макартичан, А. Н. Шилин, М. В. Кузьмичев // Патент России № 155522. Оpubл. 10.10.2015. Бюл. № 28.
12. Макартичан, С. В. Цифровой прибор для измерения влажности изделий из древесины / С. В. Макартичан // Электронная культура. Информационные технологии будущего и современное электронное обучение. Modern IT & (E-) Learning: матер. междунар. науч. конф. с элементами науч. школы для молодежи (6–8 окт. 2009 г.) / Астраханский гос. ун-т и др. – Астрахань, 2009. – С. 121–124.
13. Матис, И. Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля / И. Г. Матис. – Рига: Зинатне, 1982. – 304 с.
14. Музалевский, В. И. Измерение влажности древесины / В. И. Музалевский. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 120 с.
15. Познаев, А. П. Измерения влажности древесины / А. П. Познаев. – М.: Лесная промышленность, 1965. – 142 с.
16. Серговский, П. С. Режимы и проведение камерной сушки пиломатериалов / П. С. Серговский. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 136 с.
17. Шилин, А. Н. Инструментальная погрешность цифрового диэлькометрического влагомера древесины / А. Н. Шилин // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 3 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь»; вып. 3). – С. 79–82.
18. Шилин, А. Н. Энергосберегающая технология сушки изделий из древесины / А. Н. Шилин, С. В. Макартичан // Моделирование и создание объектов энергосберегающих технологий: сб. науч. ст. межрегион. н.-пр. конф., Волжский, 22–25.09.2009/ МЭИ (техн. ун-т), филиал в г. Волжском. – Волжский, 2009. – С. 68–73.
19. Шилин, А. Н. Автоматизация контроля влажности паркетной доски в процессе ее производства / А. Н. Шилин, С. Б. Сластинин, С. В. Макартичан // Приборы. – 2009. – № 1. – С. 47–51.
20. Шилин, А. Н. Цифровой прибор производственного контроля влажности паркетной доски / А. Н. Шилин, С. В. Макартичан // Датчики и системы. – 2010. – № 12. – С. 56–58.

УДК 621.317.73

И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, С. В. Мишуков

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ
КАЧЕСТВА СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ**

Ставропольский государственный аграрный университет

e-mail: stas.mishukov.92@mail.ru

В статье предложен алгоритм работы информационно-измерительной системы контроля качества сыпучих сельскохозяйственных продуктов на основе оригинального метода определения их влажности и наличия примесей посредством емкостных датчиков. Приведены результаты его исследований на разработанном измерительно-вычислительном устройстве, показавшие предельную относительную погрешность измерений не более $\pm 0,33\%$, что свидетельствует о работоспособности и высокой точности алгоритма.

Ключевые слова: влажность, качество, емкостной датчик, схема замещения, двухполюсник.

I. N. Vorotnikov, M. A. Mastepanenko, Sh. Zh. Gabrielyan, S. V. Mishukov

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE OPERATION ALGORITHM
OF THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM
FOR QUALITY CONTROL OF BULK AGRICULTURAL PRODUCTS**

Stavropol State Agrarian University

The article proposes an algorithm for the operation of an information and measurement system for quality control of bulk agricultural products based on an original method for determining their moisture content and the presence of impurities by means of capacitive sensors. The results of his research on the developed measuring and computing device are presented, which showed a marginal relative measurement error of no more than $\pm 0.33\%$, which indicates the workability and high accuracy of the algorithm.

Keywords: humidity, quality, capacitive sensor, substitution circuit, two-pole.

Введение

Качество сельскохозяйственных (с.-х.) продуктов является стратегической задачей реализации продовольственной безопасности любого государства, поскольку от этого показателя зависит обеспеченность населения физическим и экономическим доступом к продуктам в ассортименте и объеме, необходимом для умственного и физического развития человека, обеспечения здоровья и воспроизводства населения страны. При этом качество с.-х. продуктов оценивается по совокупности потребительских и технологических свойств, важнейшими из которых является влажность и наличие примесей, характеризующих пищевую и технологическую ценности, плотность, калорийность, стекловидность, жизнеспособность, класс и стоимость продукта, что в свою очередь влияет на их способность к хранению, переработке, транспортировке и потреблению.

В большинстве случаев оценка качества с.-х. продуктов выполняется устаревшими и неэффективными методами в лабораторных условиях без применения возможностей современной техники, что требует значительных затрат времени, трудовых и денежных ресурсов, а также привлечения квалифицированного персонала, обладающего навыками работы по отбору проб, выполнению опытов в соответствии с методиками, способностями к анализу и обработке полученной информации. В таких условиях решением проблемы оценки качества продуктов является разработка и внедрение цифровых информационно-измерительных и управляющих систем (ИИС), отвечающих требованиям универсальности, точности и быстродействия, частично или полностью устраняющих необходимость участия человека при определении характеристик продуктов, их состояния и свойств [1].

Основная часть

Подобные ИИС строятся на принципах многоканальности информационных потоков данных от датчиков, выполняющих измерение величин, необходимых для оценки качества с.-х. продуктов, на всех технологических этапах уборки, транспортировки, очистки, сушки и хранения урожая [2]. Основным из таких каналов является информация о влажности и наличии примесей, поступающая от емкостных датчиков (ЕД), определение параметров которых представляет из себя сложную научно-техническую задачу, решаемую посредством использования различных методов и алгорит-

мов, построенных на способах прямого и уравнивающего преобразования параметров схем замещения (СЗ) датчиков [3]. Широкое распространение в этом направлении получили методы прямого преобразования параметров СЗ, представляемых в виде четырехэлементного двухполюсника (ДП), включающего в себя три параллельные ветви с емкостной C_1 , резистивной R_2 и смешанной связями C_2 - R_2 (рис. 1).

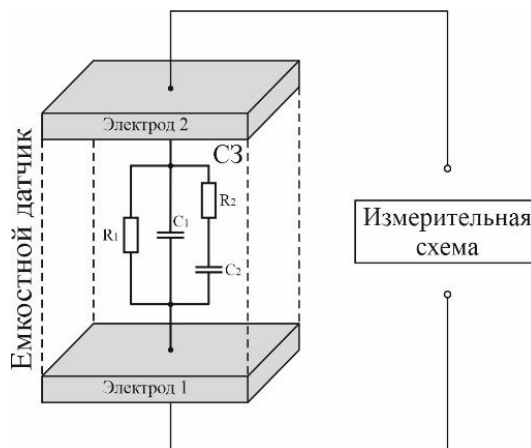


Рис. 1. Четырехэлементная модель ЕД

Перспективным методом прямого преобразования параметров ДП, характеризующих электрофизические свойства исследуемых с.-х. продуктов, помещенных в ЕД, является способ идентификации параметров четырехэлементных RC -цепей [4], основанный на декомпозиции процесса измерения на два этапа: первый, заключается в определении сквозного сопротивления датчика R_1 и выполняется после установления параметров измерительной схемы (ИС); второй, основан на выполнении трех измерений в течении переходного процесса в ИС и определении параметров деформационной C_1 и релаксационной C_2 поляризации, а также релаксационного сопротивления R_2 . Подробное описание и исследования предлагаемого метода идентификации параметров ЕД представлены в работах [5–6], подтверждающих целесообразность его внедрения в ИИС для контроля качества с.-х. продуктов.

Любая ИИС имеет свою структуру и алгоритм работы, который представляет из себя совокупность действий, выполняемых системой для получения результата измерения и необходимых данных, в частности, о влажности и наличии примесей в с.-х. продуктах и соответственно оценки их качества. Алгоритм выполнения измерений основного канала предлагаемой ИИС представлен на рис. 2.

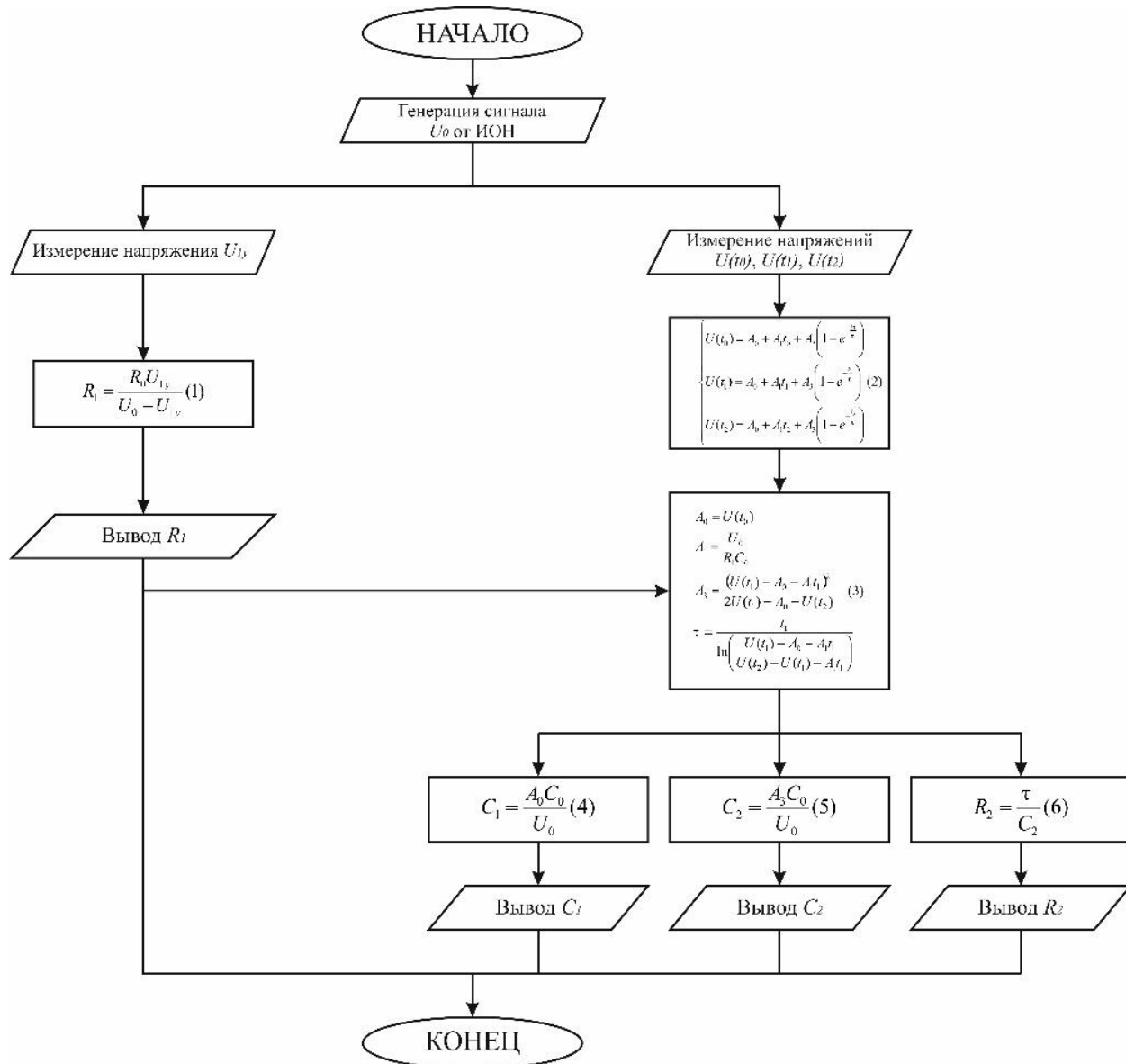


Рис. 2. Алгоритм измерений по основному каналу предлагаемой ИИС

В начале процесса измерений по приведенному алгоритму источником опорного напряжения (ИОН) выполняется генерация сигнала $U_0 = 5$ В и его подача на ИС вторичного измерительно-вычислительного устройства (ВИВУ) в составе ИИС, к которому подключен ЕД, наполненный исследуемым продуктом, после чего на выходе схемы выполняется измерение напряжения U_{1s} , позволяющее по формуле (1) произвести расчет сквозного сопротивления датчика R_1 . Значение сопротивления R_1 передается в память микроконтроллера ВИВУ и используется при выполнении расчетов по блоку формул (3).

Далее генерируется второй скачок постоянного напряжения U_0 , который подается на ИС вычислительного устройства в составе ИИС, построенную на основе операционного усилителя (ОУ) к инверсному входу которого подключен исследуемый ЕД, а отрицательная обратная связь реализована опорным элементом в виде конденсатора C_0 . При этом на выходе ОУ формируется напряжение, изменяющееся по экспоненциальному закону переходного процесса, в течение которого в строго определенные моменты времени t_0 , t_1 и t_2 выполняется три отсчета напряжения $U(t_0)$, $U(t_1)$ и $U(t_2)$ (рис. 3), позволяющие построить систему уравнений блока (2).

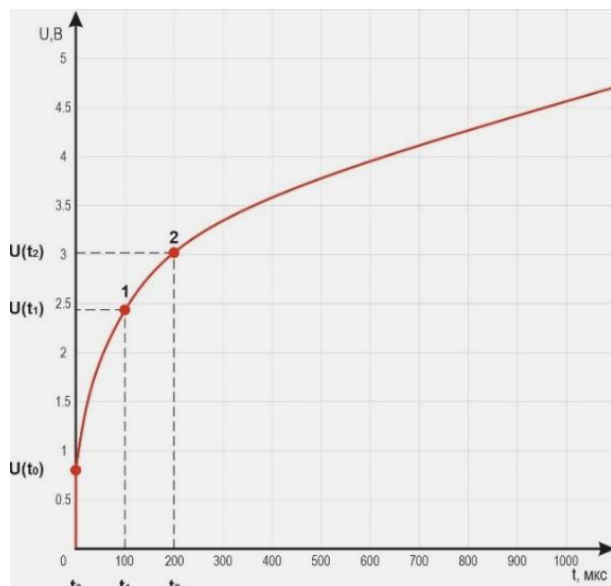


Рис. 3. Временная диаграмма выходного напряжения второго этапа измерений

Решение указанной системы уравнений дает возможность вычислить параметры постоянной

A_0 , линейной A_1 , экспоненциальной A_3 составляющих и постоянной времени τ выходного напряжения в блоке (3) предлагаемого алгоритма. На основе составляющих микроконтроллер по формулам (4–6) производит определение и вывод значений оставшихся элементов СЗ датчика в виде ДП – C_1 , C_2 и R_2 , описывающих электрофизические свойства исследуемого с.-х. продукта. Информативным параметром для производимых вычислений является емкость C_2 , характеризующая количество частиц воды и их размеров в продукте, т. е. его влажность, а дополнительные параметры в виде сопротивлений R_1 и R_2 , емкости C_1 , позволяют на основе передаточных характеристик оценить количество примесей растительного, животного или минерального происхождения.

Проверка работоспособности предлагаемого алгоритма выполнения измерений по основному каналу ИИС произведена на основе ВИВУ, принципиальная схема которого приведена на рис. 4.

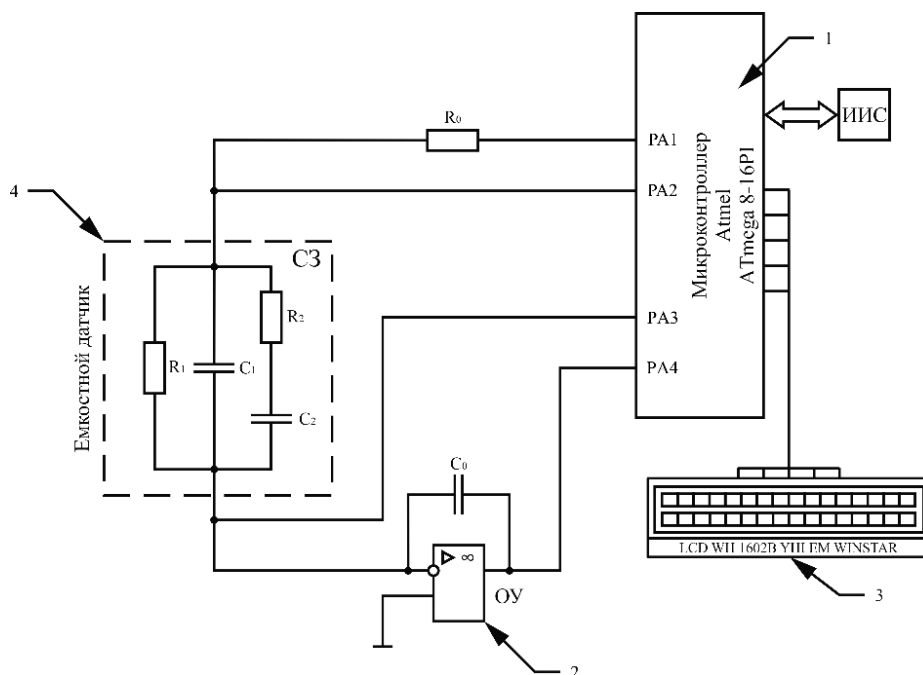


Рис. 4. Принципиальная схема ВИВУ:

1 – Микропроцессор Atmel ATmega 8-16PI; 2 – Операционный усилитель INA 128P;
3 – LCD-дисплей Winstar WH1602B; 4 – Емкостной датчик в виде четырехэлементной СЗ

В представленной схеме за все измерения и вычисления отвечает микроконтроллер 1, программирование которого выполнено на языке С в соответствии с предложенным алгоритмом работы ИИС [7], при этом входы/выходы PA1–4 в зависимости от режима работы ИС принимают следующие состояния: высокоимпендансное

(Hi-Z), входа (Input), выхода (Output), нулевого потенциала (GND).

Для выполнения проверки работоспособности предлагаемого алгоритма использовалась дискретная RC-модель ЕД с заданными номинальными значениями компонентов: $R_1 = 500$ кОм (резистор CF-100, допуск $\pm 5\%$), $C_1 = 100$ пФ

(конденсатор K10-17A, допуск $\pm 5\%$), $R_2 = 300$ кОм (резистор CF-100, допуск $\pm 5\%$), $C_2 = 47$ пФ (конденсатор K10-17A, допуск $\pm 10\text{--}20\%$) (см. таблицу). Измерение исследуемых парамет-

ров дискретной модели ЕД выполнялось универсальным цифровым измерителем RLC E7-22 производства фирмы CHY Firemate (включен в госреестр средств измерений № 24969-08).

Оценка методической погрешности результатов измерения параметров RC-модели по предлагаемому алгоритму

Исследуемые параметры	R_1 , кОм	C_1 , пФ	R_2 , кОм	C_2 , пФ
Измеренные значения прибором RLC E7-22	521,02	97,11	289,43	42,02
Расчетные значения по алгоритму	519,84	97,53	290,27	41,88
Относительная погрешность измерений по алгоритму δ , %	$\pm 0,23$	$\pm 0,12$	$\pm 0,29$	$\pm 0,33$

Заключение

На основе результатов разработки алгоритма работы ИИС и проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлена работоспособность предлагаемого алгоритма, внедренного в измерительное устройство в составе ИИС, при этом погрешность результатов измерений параметров RC-модели датчика не превышает $\pm 0,33\%$, что свидетельствует высокой точности измерений и верном программировании микроконтроллера;

2. Выявлена возможность реализации предлагаемого алгоритма в составе ИИС для различных технологических процессов агропромышленного комплекса, что в свою очередь позволит повысить качество с.-х. продуктов за счет снижения потерь и порчи при их уборке, хранении и переработке.

3. Показана простота исполнения ИС вторичного устройства на недорогих электронных компонентах (микроконтроллер, ОУ, резисторы, конденсаторы и т. д.), что значительно сокращает затраты на внедрение подобных ИИС в с.-х. предприятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шилин, А. Н. Основы теории точности измерительных систем: учеб. -метод. пособие / А. Н. Шилин,

В. Е. Аввакумов, С. В. Макартичан; ВолгГТУ. – Волгоград: ВолгГТУ, 2020. – 176 с.

2. Information-measurement system for determining moisture content of dry and liquid agricultural produce / I. N. Vorotnikov, M. A. Mastepanenko, S. Z. Gabrielyan, S. V. Mishukov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019, Saint Petersburg, 23–24 мая 2019 года. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012041. – DOI 10.1088/1757-899X/643/1/012041.

3. Аникуев, С. В. Исследование методов определения параметров многоэлементных электрических цепей / С. В. Аникуев, И. К. Шарипов, Н. А. Ставицкая // Теория и практика применения новых информационных технологий, Ставрополь, 15–20 ноября 2021 года. – Ставрополь: Издательство «АГРУС», 2021. – С. 160–165.

4. Совершенствование способа определения влажности и примесей продуктов / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, С. В. Мишуков // Сельский механизатор. – 2019. – № 4. – С. 38–39.

5. Многозадачная измерительная система для определения влажности и примесей продуктов / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, С. В. Мишуков // Сельский механизатор. – 2019. – № 11. – С. 21–23.

6. Емкостный коаксиальный датчик для определения влажности и качества сыпучих сельскохозяйственных продуктов / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, С. В. Мишуков // Сельский механизатор. – 2021. – № 9. – С. 33–35.

7. Шилин, А. Н. Программирование микроконтроллеров измерительных приборов: учеб. -метод. пособие / А. Н. Шилин, А. А. Шилин, Д. Г. Сницарук; ВолгГТУ. – Волгоград: ВолгГТУ, 2018. – 108 с.

Ответственный за выпуск редактор РИО
В. В. Свитачева

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» (ВолгГТУ)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
Гл. редактор, тел.: +7 (8442) 23-00-76
E-mail: rector@vstu.ru

Темплан 2022 г. (научные издания). Поз. № 17ж. Дата выхода в свет 29.03.2022 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,44. Уч.-изд. л. 7,24.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 90 .

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

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