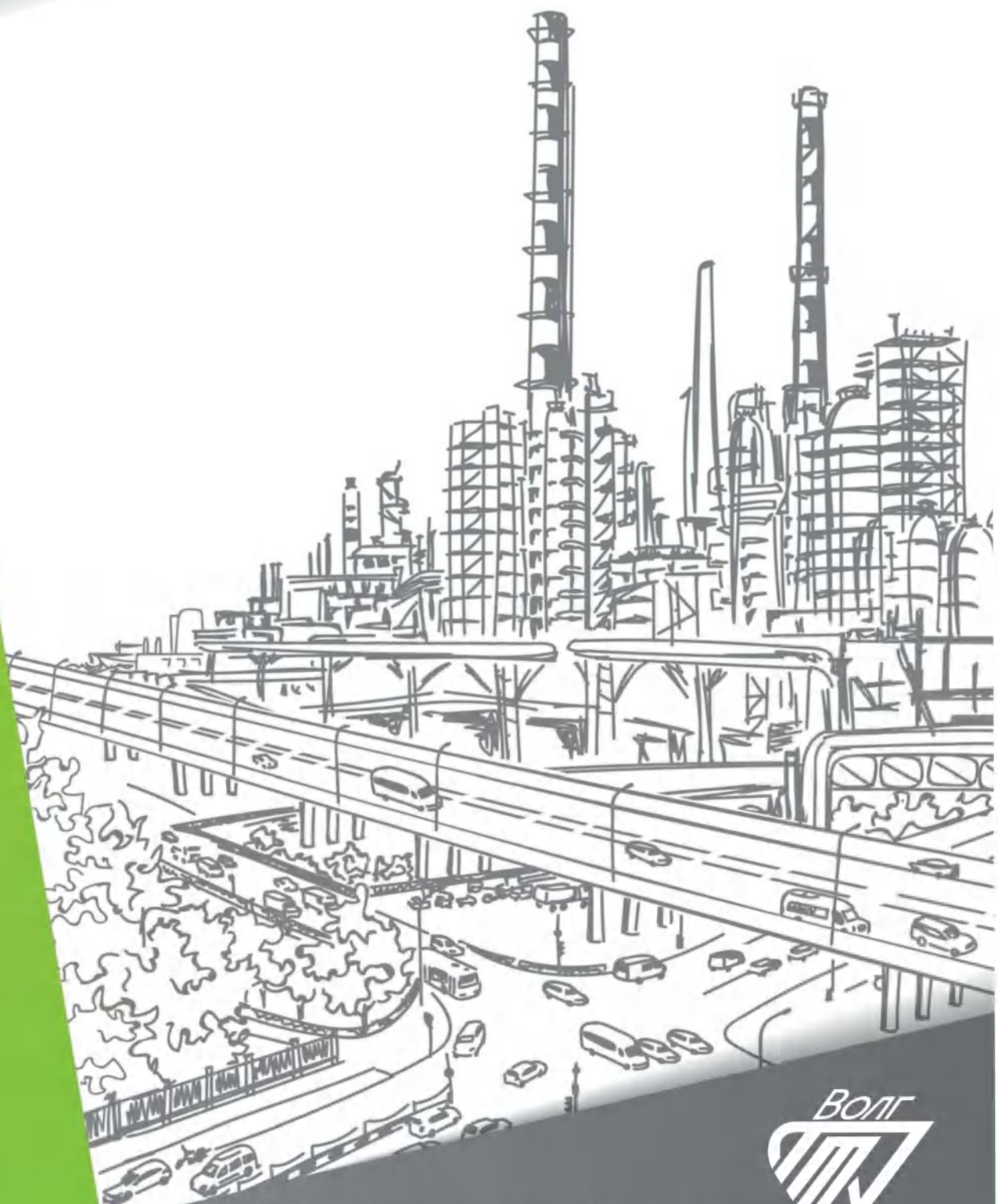


ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 4 (49)
2024



16+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ





Издается
с января 2004 г.

ISSN 2500-0586

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

Редакционная коллегия:

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

Ответственный секретарь
П. С. Васильев — к.т.н., доц. ВолгГТУ
Тел. +7 (8442) 24-84-31

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

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

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

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

№ 4 (49)
Декабрь
2024

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

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

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

Официальный сайт Учредителя: www.vstu.ru

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

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

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

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

Статьи печатаются бесплатно



Published since
January 2004 г.

ISSN 2500-0586

Editor-in-chief

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

Editorial Board:

E. V. Balakina – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. V. Baranov – D. Sc. (Physical and Math.),
Prof., Gubkin University, Moscow.
A. B. Golovanchikov – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. E. Gorodetskij – D. Sc. (Engineering),
Prof., IPME, St. Petersburg
A. V. Dmitriev – D. Sc. (Engineering),
Prof. KSPEU, Kazan
A. Yu. Dunin – D. Sc. (Engineering),
Prof. MADI, Moscow
V. F. Zheltobryukhov – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSTU, Volgograd
A. V. Keller – D. Sc. (Engineering),
Prof. Prof. Moscow Poly, Moscow
I. A. Konyakhin – D. Sc. (Engineering),
Prof. ITMO University, St. Petersburg
V. V. Korotaev – D. Sc. (Engineering),
Prof. ITMO University, St. Petersburg
G. O. Kotiev – D. Sc. (Engineering),
Prof. BMSTU, Moscow
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering),
Prof. SSTU, Saratov
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering),
Prof. BMSTU, Moscow
E. R. Moshev – D. Sc. (Engineering),
Prof. PNRPU, Perm
A. E. Novikov – Corresponding Member
of RAS, D. Sc. (Engineering),
Prof. VSTU, Volgograd
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSTU, Volgograd
N. M. Filkin – D. Sc. (Engineering),
Prof. ISTU, Izhevsk
A. N. Shilin – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSTU, Volgograd

Executive Secretary
P. S. Vasilyev – PhD, Associate Prof.
Тел. +7 (8442) 24-84-31

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

VSTU Publisher tel.:

+7 (8442) 24-84-08

+7 (8442) 24-84-05

e-mail: zavrio@vstu.ru

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

Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport (Energy and Resource Saving: Industry and Transport) science-technical journal

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

**№ 4 (49)
December
2024**

FOUNDER:

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

Periodicity: four times per year

Editorial office address:

Russia, 400005, Volgograd, Lenin avenue, 28.

Editor-In-Chief: tel.: +7 (8442) 24-80-03

e-mail: lysak2@vstu.ru

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

e-mail: pahp@vstu.ru

Official website: www.vstu.ru

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

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

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

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

The articles are published for free

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Авдеюк Д. Н. 56
Аржуханов Р. К. 14
Атрашенко О. С. 20, 27
Ахмедова О. О. 20, 27
Бойко Г. В. 96
Воротников И. Н. 40, 46
Габриелян Ш. Ж. 40, 46
Горобченко Р. И. 53
Джамбеков Р. Г. 31
Евсеева А. В. 70
Елфимова О. И. 20
Зайнутдинова Л. Х. 6
Ильичев В. Г. 6, 31
Илюшин Д. Н. 77
Искалиев А. И. 70
Киракосян К. А. 14
Киселёв П. А. 85
Клементьев Е. В. 70
Копейкина Т. В. 20, 27
Кривцов С. Н. 85
Лапенков Р. А. 92
Лесковец И. В. 96
Ломов Д. А. 77
Ляшенко М. В. 62, 70
Малиновский М. П. 92
Мастепаненко М. А. 40, 46
Мишуков С. В. 40, 46
Морсков М. В. 62
Петренко М. Л. 96
Потапов П. В. 62, 70
Рыбаков А. В. 31
Салыкин Е. А. 77
Сошинов А. Г. 27
Ставицкая Н. А. 40, 46
Суркаев А. Л. 14
Темин Р. А. 83
Федин А. П. 96
Федотов А. И. 85
Федянов Е. А. 77, 83
Храмов В. Н. 53
Шеховцов В. В. 62, 70
Щербин А. М. 92
Якимец А. Л. 53
Яньков О. С. 85

AUTHOR INDEX

- Akhmedova O. O. 20, 27
Arguhanov R. K. 14
Atrashenko O. S. 20, 27
Avdeyuk D. N. 56
Boyko G. V. 96
Dzhambekov R. G. 31
Elfimova O. I. 20
Evseeva A. V. 70
Fedin A. P. 96
Fedotov A. I. 85
Fedyanov E. A. 77, 83
Gabrielyan Sh. Zh. 40, 46
Gorobchenko R. I. 53
Hramov V. N. 53
Ilichev V.G. 6, 31
Ilyushin D. N. 77
Iskaliev A. I. 70
Kirakosan K. A. 14
Kiselyov P. A. 85
Klementiev E. V. 70
Kopeykina T. V. 20, 27
Krivtsov S. N. 85
Lapenkov R. A. 92
Leskovets I. V. 96
Liashenko M. V. 62, 70
Lomov D. A. 77
Malinovsky M. P. 92
Mastepanenko M. A. 40, 46
Mishukov S. V. 40, 46
Morskov M. V. 62
Petrenko M. L. 96
Potapov P. V. 62, 70
Rybakov A. V. 31
Salykin E. A. 77
Shcherbin A. M. 92
Shekhovtsov V. V. 62, 70
Soshinov A. G. 27
Stavitskaya N. A. 40, 46
Surkaev A. L. 14
Tyomin R. A. 83
Vorotnikov I. N. 40, 46
Yakimets A. L. 53
Yankov O. S. 85
Zaynutdinova L. Kh. 6

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Зайнутдинова Л. Х., Ильичев В. Г.</i> Анализ электрических потерь фотоэлектрического модуля на основе модели реального источника тока.....	6
<i>Суркаев А. Л., Аржуханов Р. К., Киракосян К. А.</i> Волноводный пьезоэлектрический преобразователь импульсного давления.....	14
<i>Ахмедова О. О., Копейкина Т. В., Атрашенко О. С., Елфимова О. И.</i> Обоснование использования защит с адаптивной уставкой при проектировании воздушных линий напряжением более 110 кВ.....	20
<i>Сошинов А. Г., Копейкина Т. В., Атрашенко О. С., Ахмедова О. О.</i> Рыночные структуры экономики совместного использования электроэнергии.....	27
<i>Ильичев В. Г., Джамбеков Р. Г., Рыбаков А. В.</i> Информационно-измерительная и управляющая энергосберегающая система водяного охлаждения фотоэлектрических модулей.....	31
<i>Воротников И. Н., Мишуков С. В., Мастепаненко М. А., Габриелян Ш. Ж., Ставицкая Н. А.</i> Разработка и исследование модели операционного усилителя в среде модельно-ориентированного проектирования SimInTech.....	40
<i>Воротников И. Н., Мишуков С. В., Мастепаненко М. А., Габриелян Ш. Ж., Ставицкая Н. А.</i> Особенности применения емкостных датчиков в составе информационно-измерительных систем для определения влажности и наличия примесей в зерновых культурах.....	46
<i>Горобченко Р. И., Храмов В. Н., Якимец А. Л.</i> Офтальмологический лазерный фотометр.....	53
<i>Авдеюк Д. Н.</i> Методика мониторинга магистральных линий электропередач.....	56

Часть 2. ТРАНСПОРТ

<i>Потапов П. В., Морсков М. В., Шеховцов В. В., Ляшенко М. В.</i> Повышение проходимости сельскохозяйственных тракторов по грунтам с низкой несущей способностью.....	62
<i>Искалиев А. И., Потапов П. В., Шеховцов В. В., Ляшенко М. В., Клементьев Е. В., Евсеева А. В.</i> Анализ нагружающих возможностей стенда для испытаний виброизоляторов кабины трактора.....	70
<i>Илюшин Д. Н., Ломов Д. А., Салыкин Е. А., Федянов Е. А.</i> Точность определения эксплуатационного расхода топлива автомобилем по данным Сап-шины.....	77
<i>Темин Р. А., Федянов Е. А.</i> Преимущества подачи природного газа непосредственно в камеру сгорания двигателя с искровым зажиганием.....	83
<i>Киселёв П. А., Федотов А. И., Яньков О. С., Кривцов С. Н.</i> Способ математического описания скоростных характеристик двигателя внутреннего сгорания автомобиля с гибридной силовой установкой.....	85
<i>Лапенков Р. А., Щербин А. М., Малиновский М. П.</i> Перспективы применения приводов пневматического и гидравлического типа на автомобильном транспорте.....	92
<i>Бойко Г. В., Федин А. П., Лесковец И. В., Петренко М. Л.</i> Зависимость значения тормозного момента от времени при экстренном торможении автомобиля.....	96

CONTENTS

Part I. INDUSTRY

<i>Zaynutdinova L. Kh., Ilychev V. G.</i> Analysis of electrical losses of the photovoltaic module based on the model of the real current source.....	6
<i>Surkaev A. L., Arguhanov R. K., Kirakosan K. A.</i> Wave guide piezoelectric pulse pressure transducer.....	14
<i>Akhmedova O. O., Kopeykina T. V., Atrashenko O. S., Elfimova O. I.</i> Rationale for using adaptive setting protections in designing overhead lines with voltage more than 110 kV.....	20
<i>Soshinov A. G., Kopeykina T. V., Atrashenko O. S., Akhmedova O. O.</i> Market structures of the electricity sharing economy.....	27
<i>Ilichev V. G., Dzhambekov R. G., Rybakov A. V.</i> Information-measuring and control energy-saving water cooling system for photovoltaic modules.....	31
<i>Vorotnikov I. N., Mishukov S. V., Mastepanenko M. A., Gabrielyan Sh. Zh., Stavitskaya N. A.</i> Development and research of operational amplifier model in simintech model-based design environment.....	40
<i>Vorotnikov I. N., Mishukov S. V., Mastepanenko M. A., Gabrielyan Sh. Zh., Stavitskaya N. A.</i> Features of using capacitive sensors as part of information and measuring systems for determining moisture and impurity in grain crops.....	46
<i>Gorobchenko R. I., Hramov V. N., Yakimets A. L.</i> Ophthalmic laser photometer.....	53
<i>Avdeyuk D. N.</i> The methodology of monitoring main power lines.....	56

Part II. TRANSPORT

<i>Potapov P. V., Morskoy M. V., Shekhovtsov V. V., Liashenko M. V.</i> Improving the cross-country ability of agricultural tractors on soils with low load-bearing capacity.....	62
<i>Iskaliyev A. I., Potapov P. V., Shekhovtsov V. V., Liashenko M. V., Klementiev E. V., Evseeva A. V.</i> Analysis of the loading capabilities of the tractor cab vibration isolator test stand.....	70
<i>Ilyushin D. N., Lomov D. A., Salykin E. A., Fedyanov E. A.</i> Accuracy of determining fuel consumption by a vehicle based on can bus data.....	77
<i>Tyomin R. A., Fedyanov E. A.</i> Advantages of injecting natural gas directly to the combustion chamber of a spark ignition engine.....	83
<i>Kiselyov P. A., Fedotov A. I., Yankov O. S., Krivtsov S. N.</i> Method of mathematical describing the speed characteristics of an internal combustion engine of a car with a hybrid power plant.....	85
<i>Lapenkov R. A., Shcherbin A. M., Malinovsky M. P.</i> Prospects for using pneumatic and hydraulic type drives in automobile transport.....	92
<i>Boyko G. V., Fedin A. P., Leskovets I. V., Petrenko M. L.</i> Dependence of the braking torque on time during emergency braking of a car.....	96

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 620.91: 620.92: 004.9

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-6-14

Л. Х. Зайнутдинова¹, В. Г. Ильичев²

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ РЕАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА

¹ ООО НПП «Астраэнергоэффект»

² Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева

Lzain@mail.ru, vova201428@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Лариса Хасановна Зайнутдинова, Lzain@mail.ru

Предложена модель фотоэлектрического модуля (ФЭМ) как источника тока с потерями, поскольку в современных ФЭМ ток приемника мало изменяется в пределах изменения напряжения от нуля до точки максимальной мощности. Предложено использовать схему замещения ФЭМ в виде параллельного соединения идеального источника светового тока и резистивного элемента, учитывающего электрические потери и характеризующего внутренней проводимостью G_{BT} . Проведен анализ электрических потерь с применением предложенной схемы замещения на примере фотоэлектрического модуля «Pramac 125». Показана нелинейная зависимость мощности потерь от выходного напряжения. В точке максимальной мощности электрические потери составляют порядка (17–27) % от мощности нагрузки в зависимости от освещенности. В режиме холостого хода электрические потери ФЭМ максимальны. Показана нелинейная зависимость внутренней проводимости G_{BT} от выходного напряжения. Наибольшие значения G_{BT} имеют место в режиме холостого хода. Предложенная методика оценки электрических потерь может быть использована при массовом контроле изготавливаемых солнечных элементов. В качестве параметра, характеризующего потери, и, соответственно, качество изготовленного ФЭМ, рекомендуется рассматривать G_{BTMM} – внутреннюю проводимость в точке максимальной мощности.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, коэффициент полезного действия, электрические потери, источник тока, внутренняя проводимость

L. Kh. Zaynutdinova¹, V. G. Ilychev²

ANALYSIS OF ELECTRICAL LOSSES OF THE PHOTOVOLTAIC MODULE BASED ON THE MODEL OF THE REAL CURRENT SOURCE

¹ LLC «Astraenergoeffect»

² Astrakhan State University named after V. N. Tatischev

The model of the photovoltaic module (PEM) as a source of current with losses is proposed, since in modern PEM the receiver current changes little within the voltage change from zero to the point of maximum power. It is proposed to use the scheme of substitution of PEM in the form of a parallel compound of an ideal light current source and a resistive element, internal losses and characterized by internal conductivity G . Analysis carried out of electrical losses of the proposed substitution scheme on the example of a photovoltaic module «Pramac 125». Nonlinear dependence of loss power on output voltage is shown. At the point of maximum power, electrical losses are on the order of (17–27) % of the load power, depending on the illumination. In idle mode, the electrical losses of the PEM are maximum. Nonlinear dependence of internal conductivity is shown from the output voltage. The greatest importance are in idling mode. The proposed method for estimating electrical losses can be used in Mass control of manufactured solar cells. As a parameter, characterized loss, and, respectively, quality and made by FEM, – internal conductivity at the maximum power point.

Keywords: photoelectric module, utility factor, electrical losses, current source, internal conductivity

Введение

Солнечная энергия является одним из важнейших видов возобновляемых источников энергии. Наиболее распространенной технологией является использование фотоэлектрических систем, преобразующих солнечный свет в полезную электрическую энергию. Фотоэлектрические системы просты в монтаже и обслуживании, их эксплуатация не ухудшает состояние окружающей среды. Основным недостатком фотоэлектрической технологии является нестабильность выработки электроэнергии, связанная с переменчивостью солнечной инсоляции и других метеорологических факторов (град, снег, пыль, ветер, температура и влажность окружающей среды). Другим недостатком является то, что солнечные элементы имеют ограниченный коэффициент полезного действия (КПД). Только часть полученной солнечной энергии преобразуется в полезную электрическую энергию, отдаваемую приемнику, остальная энергия при этом преобразуется в тепло. В целом ряде работ [1], [2], [3], [4] выделяется снижение коэффициента полезного действия (КПД) солнечных элементов с ростом температуры.

В работе [5] приведены обобщенные сведения о КПД разных видов солнечных батарей. КПД монокристаллических кремниевых батарей достигает 22 %, поликристаллических – 18 %. КПД батарей на основе арсенида галлия достигает (35–40) %. Показана перспективность использования солнечных батарей на основе перовскита. Отмечено, что самыми популярными солнечными батареями на рынке на сегодняшний день являются батареи на основе кремния.

В работе [6] приведены следующие значения КПД для кремниевых солнечных батарей: Si (монокристаллический) – 24,7 %, Si (поликристаллический) – 20,3 %, Si (тонкопленочная передача) – 16,6 %, Si (тонкопленочный субмодуль) – 10 %.

В работе [5, стр. 37] также говорится об изменении КПД солнечных панелей на продолжительном интервале времени, то есть о деградации солнечных панелей. В среднем за 20–25 лет солнечная панель теряет около (15–20) % от своей первоначально заявленной мощности. В работе [7] исследована деградация монокристаллического модуля TCM210SB Telecom-STV за период с 2014 по 2019 годы в условиях Аст-

раханской области. Оценено снижение выработки с учетом коэффициента инсоляции, деградация составила 2 %. В работе [8] исследована зависимость характеристик ФЭМ от температуры в реальных условиях эксплуатации в регионах с высокими температурами окружающей среды. Это исследование проводилось с применением информационно-измерительной системы долгосрочного мониторинга характеристик ФЭМ [9].

К настоящему времени в практической фотовольтаике уже накоплена определенная база экспериментальных данных об изменениях КПД фотоэлектрических модулей в зависимости от интенсивности солнечной инсоляции и других метеорологических факторов (град, снег, пыль, ветер, температура и влажность окружающей среды). Дальнейшее решение проблемы повышения КПД невозможно без анализа потерь энергии ФЭМ. При этом в практической фотовольтаике пока еще не уделено должного внимания данному вопросу. Целью настоящего исследования является анализ потерь мощности ФЭМ при их эксплуатации. Такой анализ целесообразно провести с привлечением эквивалентных схем ФЭМ.

1. Эквивалентные схемы фотоэлектрических модулей

Основным показателем энергоэффективности любого устройства является КПД. Согласно [10, стр. 4] в 1953 году считалось, что максимальный КПД солнечных фотоэлементов не может быть более 0,6 %. Но уже в 1955 году была изготовлена солнечная батарея, КПД отдельных элементов которой достигал 10 %. Теоретический КПД кремниевого фотоэлемента для солнечного спектра должен быть приблизительно (22–23) % [10, стр. 35]. Выделены световые потери и потери энергии электронов и дырок при движении их внутри преобразователя. Световые потери возникают из-за: 1) отражения падающего излучения от поверхности преобразователя, 2) частичного поглощения фотонов без образования пары электрон–дырка, 3) прохождения некоторого количества фотонов до заднего (тыльного) электрода и поглощения в нем.

Потери энергии электронов и дырок при движении их внутри преобразователя имеют сложную физическую природу. Эти потери отражены в эквивалентной схеме, приведенной на рис. 1.

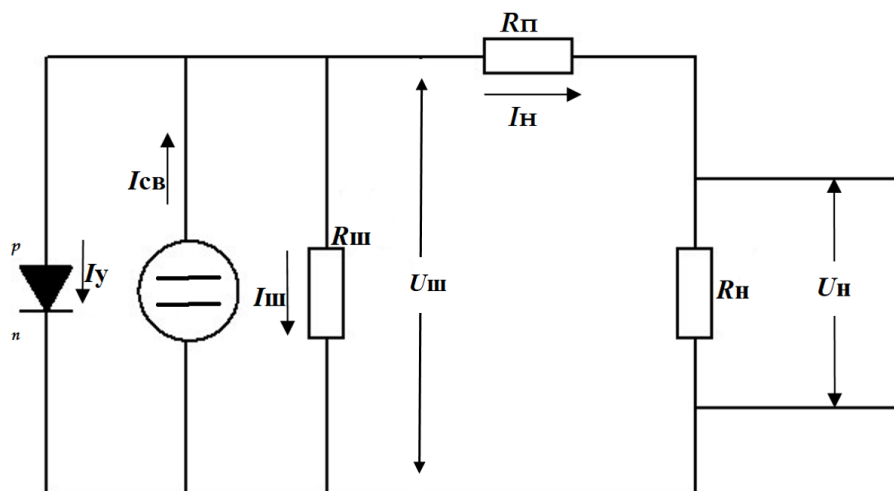


Рис. 1. Эквивалентная схема фотоэлектрического преобразователя по [10, стр. 29]

В работе [10, стр. 30] выделены сопротивления двух видов: 1) последовательное R_{Π} , куда входит сопротивление контактов и сопротивление самого полупроводникового материала, из которого изготовлен фотопреобразователь; 2) параллельное или шунтирующее сопротивление $R_{\text{ш}}$, которое образуется за счет наличия обратного сопротивления «р-п» перехода и различных проводящих пленок и загрязнений, шунтирующих «р» и «п» области. Согласно рис. 1:

$$I_{\text{CB}} = I_y + I_{\text{ш}} + I_{\text{н}},$$

где I_{CB} – ток, генерируемый преобразователем под действием света; I_y – обратный ток через «р-п» переход; $I_{\text{ш}}$ – ток через шунтирующее «р-п» переход сопротивление; $I_{\text{н}}$ – ток внешней цепи (ток нагрузки); $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки.

Сопротивление R_{Π} приводит к потере выходного напряжения, а сопротивление $R_{\text{ш}}$ – к потере тока нагрузки.

В работе [11] предельное значение КПД солнечного элемента определено на уровне 30 %. Эквивалентная схема солнечного элемента [11, стр. 128] подобна схеме рис. 1 и имеет вид цепи с сосредоточенными сопротивлениями: последовательным R_s и параллельным (шунтирующим) R_p . В любом реальном солнечном элементе существуют потери мощности, поскольку R_s больше 0, а R_p меньше бесконечности. Во многих случаях введение сосредоточенных сопротивлений R_s и R_p позволяет описать вольтамперную характеристику солнечного элемента. В работе [11, стр. 129] дается оценка влияния последовательного и шунтирующего сопротивлений на величину потерь мощности.

При проектировании солнечных элементов рекомендуемое допустимое значение потерь на этих сопротивлениях составляет порядка 3 %.

В работе [12] приведено наиболее развернутое описание потерь в солнечных элементах. Выделены [12, стр. 50] следующие виды потерь: оптические потери; рекомбинационные потери фотогенерированных электронно-дырочных пар до их разделения переходом; омические потери (обусловлены протеканием в объеме «р» и «п» области фотогенерированных носителей тока, а также основных носителей тока). Омические потери характерны для любого источника электроэнергии. Радикальное снижение омических потерь особенно актуально для солнечных элементов с преобразованием концентрированного солнечного излучения. В специальной научной литературе нет единой общепринятой методики описания и измерения омических потерь в солнечных элементах [12, стр. 59].

Различные компоненты внутреннего сопротивления солнечного элемента могут быть рассчитаны исходя из определяемых по тестовым образцам удельных параметров [12, стр. 78] либо измерены (часто приближенно) на готовых солнечных элементах. Общим недостатком этих методик является низкая разрешающая способность и невозможность проводить массовый контроль изготавливаемых солнечных элементов [12, стр. 90].

2. Модель фотоэлектрического модуля как источника тока с потерями

Фотоэлектрический преобразователь по отношению к приемнику электрической энергии выполняет роль источника электрической энергии. Согласно теоретическим основам электро-

техники [13, стр. 147–148] источники энергии в электрических цепях принято рассматривать либо как источники ЭДС, либо как источники тока. Для источников ЭДС характерно сравнительно малое изменение выходного напряжения

при изменении тока от нуля до номинального значения. Для реальных источников тока характерно практическое постоянство тока при изменениях сопротивления нагрузки и, соответственно, выходного напряжения (рис. 2).

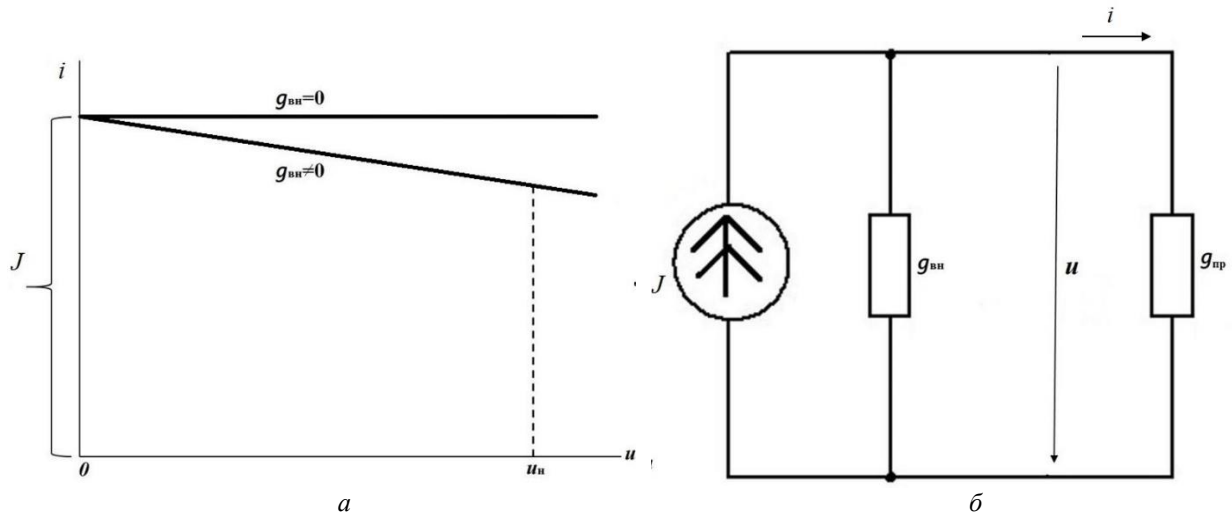


Рис. 2. Внешняя характеристика (а) и схема замещения источника тока (б) [13]

Совершенствование технологий проектирования и производства солнечных элементов привело к тому, что современные фотоэлектрические преобразователи имеют вольтамперные характеристики, близкие к виду внешней характеристики реального источника тока. Покажем это на конкретном примере.

Рассмотрим современные ФЭМ, собранные из кремниевых гетероструктурных (НJT) солнечных ячеек. Солнечные панели изготовлены из НJT-ячеек толщиной 130 мкм, соединенных между собой по технологии контактирования SmartWire, которая уменьшает потери мощно-

сти из-за возникновения возможных дефектов, например, трещин. ФЭМ имеет следующие электрические параметры [14]:

I_{sc} – 9,08 А, ток короткого замыкания,

U_{oc} – 14,72 В, напряжение холостого хода,

I_{mpp} – 8,58 А, сила тока в точке максимальной мощности,

U_{mpp} – 12,21 В, напряжение в точке максимальной мощности,

P_{mpp} – 104,7 Вт, максимальная мощность,

FF – 78,36 %, коэффициент заполнения.

Вольт-амперная характеристика ФЭМ приведена на рис. 3:

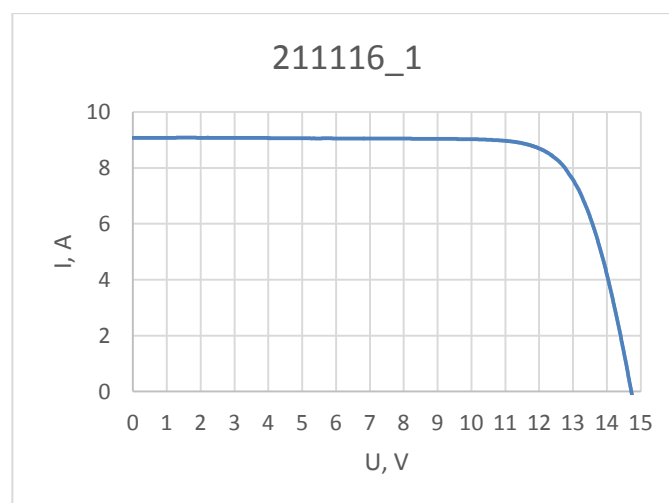


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика фотоэлектрических модулей, собранных из кремниевых гетероструктурных (НJT) солнечных ячеек

Как видно из рис. 3, ток, поступающий в приемник, мало изменяется в пределах изменения напряжения от нуля до номинального значения (до точки максимальной мощности), что обусловлено повышением уровня современного производства солнечных элементов. Соответственно, рассмотренный ФЭМ с точки зрения теоретических основ электротехники можно отнести к категории реального источника тока. В настоящей работе предлагается более простая (по сравнению со схемой рис. 1) схема замещения ФЭМ. Предлагаемая авторами новая упрощенная схема замещения будет достаточной для анализа потерь мощности ФЭМ при их эксплуатации. Новая упрощенная схема заме

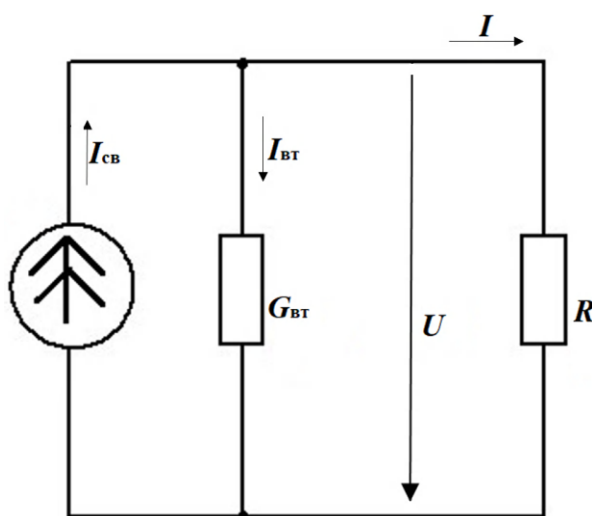


Рис. 4. Эквивалентная схема ФЭМ как реального источника тока с внутренней проводимостью $G_{вт}$

щения ФЭМ (рис. 4) представляет собой параллельное соединение идеального источника светового тока и резистивного элемента, учитывающего внутренние потери и характеризующего внутреннюю проводимость $G_{вт}$.

На рис. 4 приняты следующие обозначения:

$I_{св}$ – ток, генерируемый под действием света,

$I_{вт}$ – ток, учитывающий потери,

I – ток нагрузки,

U – выходное напряжение (напряжение нагрузки),

$G_{вт}$ – внутренняя проводимость,

R – сопротивление нагрузки.

Предложенная эквивалентная схема ФЭМ учитывает в комплексе рекомбинационные и омические потери. Назовем этот комплекс электрическими потерями.

Для эквивалентной схемы ФЭМ, приведенной на рис. 4, будут справедливы следующие соотношения:

$P = U \cdot I$ – мощность приемника (нагрузки),

$I_{св} = I_{кз}$,

$I_{вт} = I_{кз} - I$,

$\Delta P = U \cdot I_{вт}$ – мощность электрических потерь,

$G_{вт} = I_{вт} / U$ – внутренняя проводимость.

3. Анализ электрических потерь фотоэлектрического модуля на основе модели реального источника тока

Проведем анализ электрических потерь на примере фотоэлектрического модуля «Pramac 125», вольт-амперные характеристики которого приведены на рис. 5.

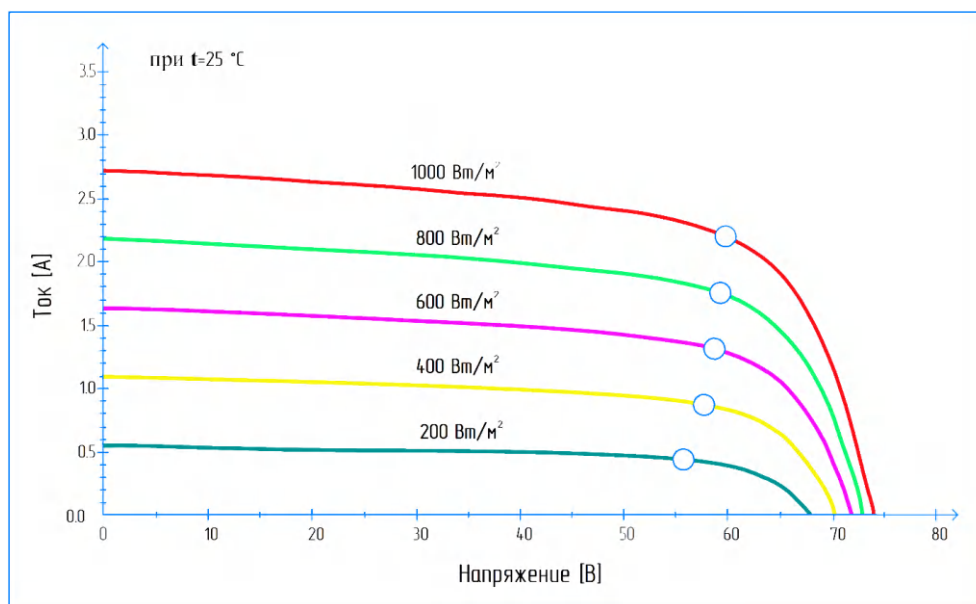


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики фотоэлектрического модуля «Pramac 125» при температуре окружающей среды $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, инсоляциях $I_n = 1000\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 800\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 600\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 400\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 200\text{ Вт/м}^2$

Рассмотрим вольт-амперную характеристику фотоэлектрического модуля «Pramac 125» при температуре окружающей среды $t = 25^\circ\text{C}$ и инсоляции $I_n = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ($I_{кз} = 2,72 \text{ А}$). Проведем вычисления потерь мощности, мощности нагрузки и значений внутренней проводимости в диапазоне изменения сопротивления нагрузки

от бесконечности (холостой ход) до нуля (короткое замыкание):

$$\Delta P = (I_{кз} - I) \cdot U$$

$$P = U \cdot I$$

$$G_{вт} = (I_{кз} - I)/U$$

Результаты приведены в таблице и отображены на рис. 6.

**Потери и внутренняя проводимость ФЭМ «Pramac 125»
при температуре окружающей среды $t = 25^\circ\text{C}$ и инсоляции $I_n = 1000 \text{ Вт/м}^2$**

№ п/п	U, В	I, А	P, Вт	R, Ом	($I_{кз}-I$), А	ΔP , Вт	Потери в % $\Delta P/P$	Gвт, (мСм)	Прим.
1	74	0	0	-	2,72	292		36,82	Х. х.
2	70	1,25	87,5	56	1,47	102,9		21	
3	65	1,9	123,5	34,211	0,82	53,3		12,615	
4	60	2,2	132	27,273	0,52	31,2	23,63636364	8,67	Тмм
5	50	2,4609	123,05	20,318	0,2591	12,955		5,182	
6	40	2,538	101,52	15,76	0,182	7,28		4,55	
7	30	2,586	77,58	11,601	0,134	4,02		4,467	
8	20	2,636	52,72	7,5873	0,084	1,68		4,2	
9	10	2,686	26,86	3,723	0,034	0,34		3,4	
10	0	2,72	0	0	0	0			К. з.

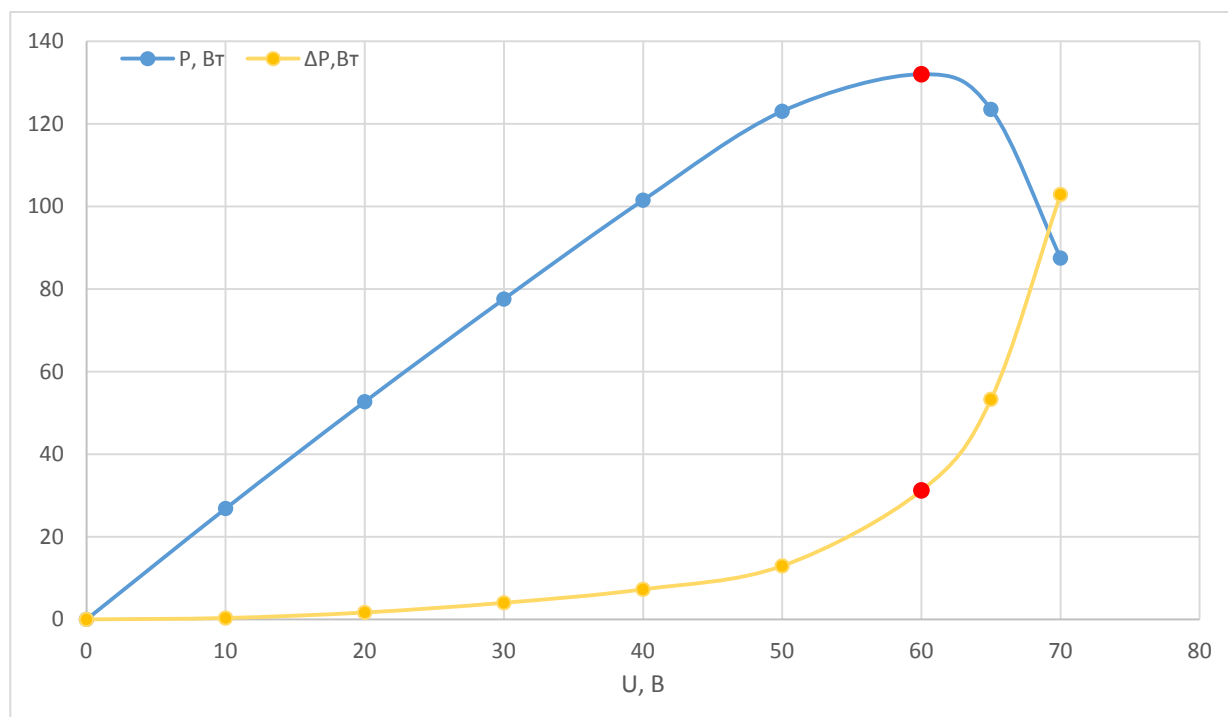


Рис. 6. Зависимость мощности нагрузки P (синяя), зависимость потерь мощности ΔP (желтая) от напряжения для фотоэлектрического модуля «Pramac 125» при температуре окружающей среды $t = 25^\circ\text{C}$ и инсоляции $I_n = 1000 \text{ Вт/м}^2$

Красным обозначены точки максимальной мощности (Тмм). В точке максимальной мощности при инсоляции 1000 Вт/м^2 электрические потери составляют 26,636 % по отношению к

мощности нагрузки. Имеет место нелинейная зависимость электрических потерь от выходного напряжения.

Аналогично рассмотрим вольт-амперные ха-

рактеристики фотоэлектрического модуля «Pramac 125» при температуре окружающей среды $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ряде значений инсоляции 800 Вт/м^2 , 600 Вт/м^2 , 400 Вт/м^2 , 200 Вт/м^2 . Графики зависимости мощности нагрузки и мощности потерь от выходного напряжения подобны рис. 6, имеются лишь количественные отличия. В точке максимальной мощности электрические потери составляют по отношению к мощности нагрузки:

23,033 % при инсоляции 800 Вт/м^2 ,
20,74 % при инсоляции 600 Вт/м^2 ,
20,218 % при инсоляции 400 Вт/м^2 ,
17,02 % при инсоляции 200 Вт/м^2 .

Зависимости внутренней проводимости $G_{вт}$ (мСм) от напряжения фотоэлектрического модуля «Pramac 125» при инсоляции $I_n = 1000\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 800\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 600\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 400\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 200\text{ Вт/м}^2$, построенные по результатам проведенного анализа, приведены на рис. 7.

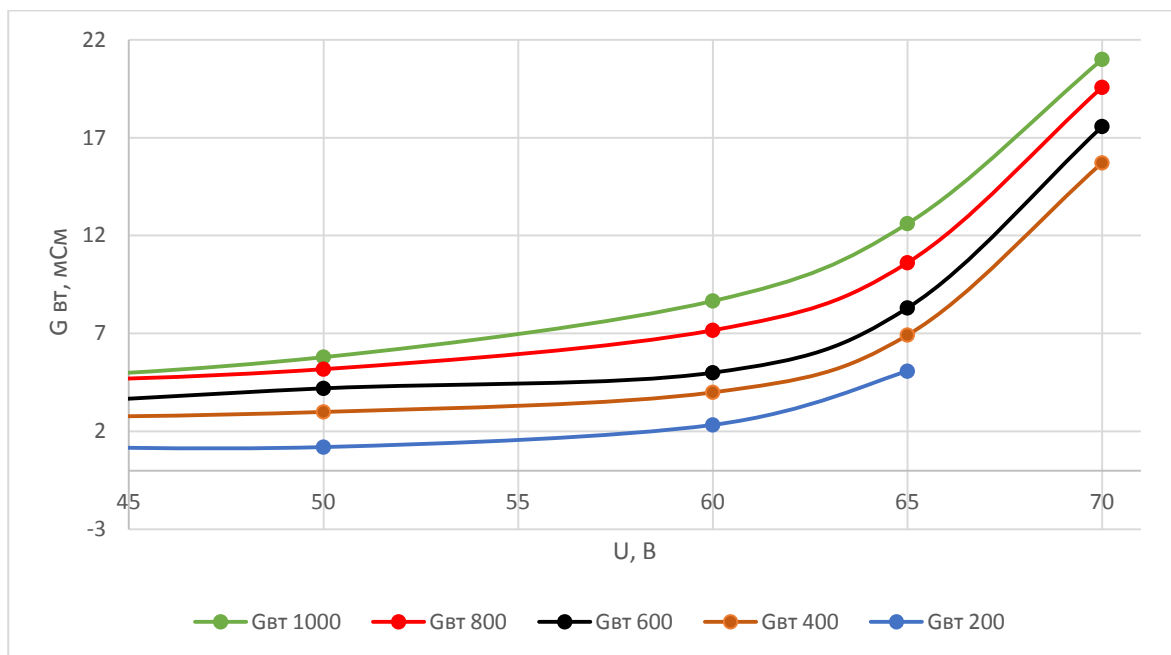


Рис. 7. Зависимость внутренней проводимости $G_{вт}$ (мСм) от напряжения U фотоэлектрического модуля «Pramac 125» при инсоляции $I_n = 1000\text{ Вт/м}^2$ (зеленый), $I_n = 800\text{ Вт/м}^2$ (красный), $I_n = 600\text{ Вт/м}^2$ (черный), $I_n = 400\text{ Вт/м}^2$ (коричневый), $I_n = 200\text{ Вт/м}^2$ (синий)

В случае холостого хода, когда цепь разомкнута, приемник отключен, вся энергия, полученная от солнца, остается внутри самого фотоэлектрического модуля и таким образом превращается в потери. Обнаруживается парадоксальное свойство фотоэлектрического источника электрической энергии, а именно: в режиме холостого хода электрические потери ФЭМ максимальны. В других видах источников электрической энергии, например, в электромеханических генераторах, потери холостого хода обычно меньше потерь в нагрузочных режимах.

На практике при сборке схем из солнечных панелей возникает необходимость организации входного контроля ФЭМ. В работе [15] было показано, что из 100 экземпляров оказались непригодными для последовательного соединения в солнечной панели из-за существен-

ного разброса параметров 24 экземпляра ФЭМ.

Предложенная в настоящем исследовании модель ФЭМ как реального источника тока с внутренней проводимостью $G_{вт}$ позволяет сравнительно легко определять и оценивать электрические потери ФЭМ. В качестве параметра, характеризующего потери, и, соответственно, качество изготовленного ФЭМ, можно рассматривать $G_{вт\text{мм}}$ – внутреннюю проводимость в точке максимальной мощности:

$$G_{вт\text{мм}} = (I_{кз} - I_{мм})/U_{мм}$$

В этом случае используются значения тока $I_{мм}$ и напряжения $U_{мм}$ для точки максимальной мощности. Чем больше значение $G_{вт\text{мм}}$, тем больше электрические потери фотоэлектрического модуля. Предложенная модель может быть использована при организации массового контроля изготавливаемых ФЭМ.

Заключение

1. На основе анализа научно-технических источников показано, что сравнительно невысокие значения КПД фотоэлектрических модулей (по разным оценкам предельные значения КПД составляют от 22 % до 30 %) обусловлены оптическими (световыми), рекомбинационными и омическими потерями. Показана сложность расчета и измерения составляющих этих потерь.

2. Предложена модель фотоэлектрического модуля как источника тока с потерями в связи с тем, что в современных ФЭМ ток, поступающий в приемник, мало изменяется в пределах изменения напряжения от нуля до номинального значения (до точки максимальной мощности). Соответственно, рассмотренный ФЭМ с точки зрения теоретических основ электротехники можно отнести к категории реального источника тока.

3. Предложено использовать схему замещения ФЭМ в виде параллельного соединения идеального источника светового тока и резистивного элемента, учитывающего внутренние потери и характеризуемого внутренней проводимостью $G_{\text{вт}}$. Предложенная эквивалентная схема ФЭМ учитывает в комплексе рекомбинационные и омические потери, то есть электрические потери.

4. Проведен анализ электрических потерь с применением предложенной схемы замещения на примере фотоэлектрического модуля «Primas 125». Показана нелинейная зависимость мощности потерь от выходного напряжения. В точке максимальной мощности электрические потери составляют порядка (17–27) % от мощности нагрузки в зависимости от освещенности. В режиме холостого хода электрические потери ФЭМ максимальны.

5. Показана нелинейная зависимость внутренней проводимости $G_{\text{вт}}$ от выходного напряжения. Наибольшие значения $G_{\text{вт}}$ имеют место в режиме холостого хода.

6. Показана зависимость внутренней проводимости $G_{\text{вт}}$ от освещенности. С ростом освещенности внутренняя проводимость возрастает.

7. Предложенная методика оценки электрических потерь может быть использована при массовом контроле изготавливаемых солнечных элементов. В качестве параметра, характеризующего потери, и, соответственно, качество изготовленного ФЭМ, можно рассматривать $G_{\text{втмк}}$ – внутреннюю проводимость в точке максимальной мощности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Троицкий, А. О.* Основные факторы снижения КПД солнечных установок и способы поддержания номинального КПД / А. О. Троицкий, О. В. Серадская, И. М. Кирпичникова // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых ; ФГБОУ высшего профессионального образования Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет). – 2015. – Т. 3. – № 1. – С. 222–225.
2. *Дубинин, Д. В.* Энергетическая эффективность работы солнечных батарей в реальных режимах эксплуатации / Д. В. Дубинин, В. Е. Лаевский // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 3. – С. 58–62.
3. *Джумаев, А. Я.* Анализ влияния температуры на рабочий режим фотоэлектрической солнечной станции / А. Я. Джумаев // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. 46-й междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: Сибак, 2015. – № 5 (42). – С. 33–40.
4. *Кирпичникова, И. М.* Построение энергетических характеристик солнечных модулей с учетом условий окружающей среды / И. М. Кирпичникова, И. Б. Махсумов // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 34. – С. 56–74.
5. *Алимова, П. Д.* Перспективы использования элементной базы на основе перовскита в солнечной энергетике. Датчики и системы / П. Д. Алимова, В. П. Жалнин, К. А. Лобанова, К. В. Селиванов. – 2023. – № 2. – С. 36–43.
6. *Гарифулина, М. Р.* Модель элемента солнечной батареи типа CIGS / М. Р. Гарифулина, А. И. Власов, В. В. Макачук, Н. Адамовик // Электронный научно-технический журнал «Инженерный вестник». Издатель ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана». – 2012. – № 8. – 12 с.
7. *Larisa Zaynutdinova, Rustem Zaynutdinov, Vladimir Ilyichev, Ilya Shurshev.* EXPERIMENTAL STUDY INTO DEGRADATION OF A SINGLE-CRYSTAL SILICON PHOTOVOLTAIC MODULE IN THE CLIMATIC CONDITIONS OF ASTRAKHAN REGION // Proceedings ICOECS 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. IEEE Catalog Number: CFP20S88-USB, ISBN: 978-1-7281-9115-7, 2020. – P. 111–114.
8. *Зайнутдинова, Л. Х.* Экспериментальное исследование нагрева фотоэлектрического модуля «Primas-125» / Л. Х. Зайнутдинова, В. Г. Ильичев, Р. Г. Джамбеков // Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики: сборник трудов российской конференции, 21–23 ноября 2022 г., Санкт-Петербург. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 99–100, ISBN 978-5-7422-7926-6, doi : 10.18720/SPBPU/2/id22-248].
9. *Братышев, С. Н.* Информационно-измерительная система долгосрочного мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей / С. Н. Братышев, Л. Х. Зайнутдинова, В. Г. Ильичев, А. С. Титов // Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации: материалы II Международной научно-технической конференции / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : РИК УГАТУ, 2019. – С. 281–286.
10. *Глиberman, А. Я.* Кремниевые солнечные батареи / А. Я. Глиberman, А. К. Зайцева. – М.-Л., Госэнергоиздат, 1961. – 72 с.

11. *Фаренбрух, А.* Солнечные элементы: теория и эксперимент / А. Фаренбрух, Р. Бьюб ; пер. с англ. под ред. М. М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.: ил.
12. *Андреев, В. М.* Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / В. М. Андреев, В. А. Грилихес, В. Д. Румянцев. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.
13. *Демирчян, К. С.* Теоретические основы электротехники. В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1. – 4-е изд. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чекурин. – СПб.: Питер, 2003. – 463 с.: ил.
14. *Ильичев, В. Г.* Сравнительный эксперимент по оценке эффективности водяного охлаждения фотоэлектрических модулей в климатических условиях Юга России / В. Г. Ильичев, Л. Х. Зайнутдинова, Е. И. Теруков, М. Ю. Михайлов // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 13(4). – С. 11–21. – Режим доступа: <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-02>.
15. *Яковенко, А. А.* Энергоэффективность солнечных панелей на малых космических аппаратах типа CubeSat / А. А. Яковенко, К. В. Селиванов // Датчики и системы. – 2020. – № 11. – С. 11–18.

УДК 531.787.91

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-14-20

А. Л. Суркаев, Р. К. Аржуханов, К. А. Киракосян

ВОЛНОВОДНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

alsurkaev@mail.ru, kinnomans@mail.ru, 677595@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Леонидович Суркаев, alsurkaev@mail.ru

В настоящей работе представлен волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления на основе пьезокерамики ЦТС-19, реактивный акустический волновод которого выполнен из смеси материалов, относящихся к неньютоновским жидкостям. Описана его конструкция, предложена методика градуировки и проведены эксперименты по определению значения переводного коэффициента. Представлены градуировочные установки, принцип действия которых основывается на методе падающего груза и импульсного электромеханического воздействия.

Ключевые слова: волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления, неньютоновские жидкости, падающий груз, электрический взрыв проводников, ударная волна, конденсированная среда, разрядная камера

A. L. Surkaev, R. K. Arguhanov, K. A. Kirakosan

WAVEGUIDE PIEZOELECTRIC PULSE PRESSURE TRANSDUCER

Volgograd State Technical University

This paper presents a waveguide piezoelectric pressure transducer based on piezoceramics (TsTS-19), the reactive acoustic waveguide of which is made of a mixture of materials related to non-Newtonian fluids. Its design is described, a calibration technique is proposed, and experiments are conducted to determine the value of the conversion factor. Calibration units are presented, the operating principle of which is based on the method of a falling weight and pulsed electromechanical action.

Keywords: waveguide piezoelectric pressure transducer, non-Newtonian fluids, falling weight, electrical explosion of conductors, shock wave, condensed medium, discharge chamber

Введение

Разрядно-импульсные технологии (РИТ) в современном мире находят широкое применение при решении прикладных и фундаментальных задач. На сегодняшний момент исследование пространственно-временных характеристик генерируемых ударных волн электрического разряда, в частности, представляет собой огромный интерес и является актуальной задачей. Для получения необходимой и достоверной информации о параметрах ударно-волновых возмущений разрабатываются и применяются различного рода методы и приборы ис-

следования [1–4]. Одно из перспективных и наиболее распространенных направлений, применяемых в методах исследования быстропротекающих процессов, базируется на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта. Так, в частности, различного рода преобразователи, созданные на основе природных материалов (кварц, турмалин, ниобат лития и др.), искусственных и специально поляризуемых в электрическом поле пьезоэлектрических материалов (пьезокерамика типа титаната бария, титаната свинца, цирконата свинца и др.). Следует отметить, что пьезокерамика имеет ряд

преимуществ по отношению к перечисленным преобразователям. Чувствительность пьезокерамики ЦТС-19 в десятки раз превосходит чувствительность кристаллов кварца, применяемого как в зарубежных, так и отечественных датчиках, имеет достаточно высокое значение температуры точки Кюри (более 290 °С) и сохраняет постоянство пьезоэлектрических свойств до давления в несколько сотен атмосфер.

Дальнейшее расширение технических возможностей измерительной аппаратуры обуславливает необходимость не только разработки, в частности, новых пьезодатчиков давления, но и усовершенствования имеющегося стендового оборудования для их испытания и градуировки. В работе [5] приводится описание простых и дешевых пьезокерамических датчиков на основе пьезокерамики ЦТС-19 для измерения быстроменяющихся и пульсирующих давлений. Испытания и исследования характеристик датчиков проводились на статическом и динамическом стендах и в ударной трубе.

Большое число современных технологии связаны с измерением давлений в объемах жидкости на значительных расстояниях от канала разряда. В связи с этим в целях расширения технологических возможностей возникает актуальная задача – регистрация импульсного давления в закрытом объеме воды при повышенных гидростатических давлениях и близком расстоянии от источника ударных возмущений [6]. Для тарировки и испытаний предложенного датчика авторами использовалась разрядная камера высокого давления, позволяющая поддерживать гидростатическое давление и близость приемной части датчика к каналу разряда (источнику гидродинамического возмущения – волны импульсного давления).

Целью работы является разработка конструкции волноводного пьезоэлектрического преобразователя давления, позволяющего регистрировать параметры ударных волн, воздействующих на поверхность обрабатываемого объекта в жидкости, а также методики его градуировки.

Конструкция волноводного пьезоэлектрического преобразователя давления

На рис. 1 представлена конструкция преобразователя и его основные элементы, на фото (рис. 2) – внешний вид. Волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления [7] содержит пьезоэлектрическую таблетку 1, приемный волновод 2 в виде цилиндра и реактивный волновод 3 в виде цилиндра из смеси материалов неньютоновских жидкостей. Сопряженные торцы волноводов 2, 3 и пьезоэлектрическая таблетка 1 склеены между собой эпоксидной смолой. Конструкция размещена в полости цилиндрического механически прочного диэлектрического корпуса 5. Отличительной особенностью волноводного пьезоэлектрического преобразователя давления заключается в том, что реактивный волновод (акустический волновод, установленный с противоположной стороны пьезоэлемента относительно активного приемного волновода) выполнен в виде цилиндра из смеси химически чистого силикона ($[R_2SiO]_n$) и кварцевого песка (SiO_2), которые следует рассматривать как неньютоновские жидкости. Выполнение активного приемного волновода в виде цилиндрического стержня позволяет реализовать возможность регистрации мощных ударных волн произвольного профиля волнового фронта на близком расстоянии от канала разряда в объеме жидкости и эффектив-

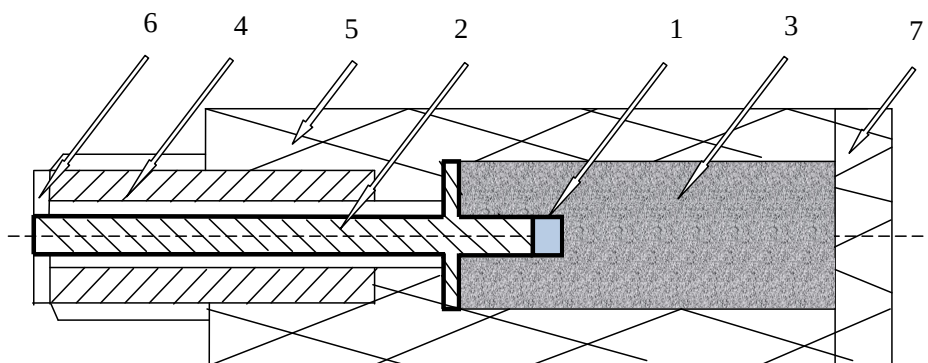


Рис. 1. Волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления:

1 – пьезоэлектрический элемент; 2 – активный волновод; 3 – реактивный волновод; 4 – металлическая часть корпуса с резьбовым креплением; 5 – основная часть корпуса; 6 – гидроизоляционная шайба; 7 – крышка

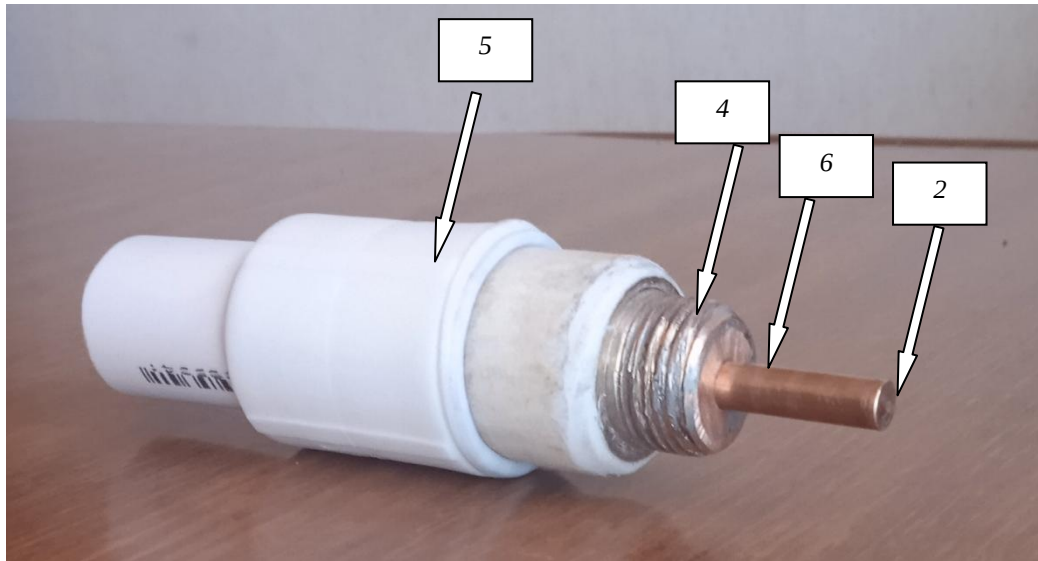


Рис. 2. Волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления:
2 – активный волновод (торец волновода выполнен в единой плоскости с торцом корпуса и положение показано в состоянии его сборки); 4 – металлическая часть корпуса с резьбовым креплением;
5 – основная часть корпуса; 6 – гидронизоляционная шайба

ную помехоустойчивость от паразитного электромагнитного излучения высоковольтного электрического разряда. Одним из основных требований, накладываемых при применении акустических волноводов в различных конструкциях, является акустическое согласование материалов пьезокерамики и волновода. Наилучшими в этом соотношении являются пьезокерамика ЦТС-19 и металл бериллий, то есть $\rho_k c_k \approx \rho_\theta c_\theta$, где ρ_k, c_k и ρ_θ, c_θ – плотность и скорость звука в керамике и в бериллии, соответственно. Так, для керамики – $\rho_k c_k \approx 23,68 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$ и бериллия

$\rho_\theta c_\theta \approx 23,18 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$. Вариации пропорций смеси силикона и кварцевого песка (неньютоновские жидкости) для реактивного волновода позволяют приблизиться к данным параметрам,

в частности, $\rho_n c_n \approx 22,34 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$. Неньютоновские жидкости при высокоскоростном, импульсном механическом воздействии на них ведут себя подобно механически твердым телам, имеющим жесткую кристаллическую структуру. Кроме того, они обладают высоким коэффициентом поглощения звуковых волн в широком диапазоне частот. Поэтому не будет возникать паразитного возмущения, отраженного от конца реактивного волновода, негативно влияющего на полезный сигнал пьезоэлектрического преобразователя.

Методики градуировки

Метод градуировки посредством падающего груза имеет достаточно убедительное теоретическое обоснование и широко используется на практике [8–10]. Используя результаты математического моделирования процесса механического импульсного воздействия, оказываемое на стержневой волновод при условии абсолютной жесткости границы [11] пьезокерамика–реактивный волновод, и считая, что возникающее механическое напряжение – импульс давления $p(t)$ в волноводе пропорционально напряжению пьезогенератора, имеем: $p(t) = k U(t)$. Переводной коэффициент равен:

$$k = \frac{C_k \rho_2 c_2^2}{\pi r^2 \theta E_2 \chi},$$

где r_0 – радиус пьезоэлемента, θ – пьезоэлектрический модуль керамики, C_k – емкость керамики, E_2 – модуль Юнга керамики. ($\chi = (\cos(\omega t) + \sin(\omega t) - \exp(-\omega t))$). На рис. 3 представлены характерная осциллограмма электрического импульса $U(t)$ механического воздействия падающего груза на волновод и осциллограмма прямоугольного сигнала, позволяющего определить время контакта падающего груза с волноводом. Масса падающего груза $m = 6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$, высота подъема $h = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Время взаимодействия определяется из осциллограммы прямоугольного им-

пульса. Радиус пьезоэлемента $r_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Волноводный преобразователь давления распо-

ложен горизонтально и закреплен на массивном основании.

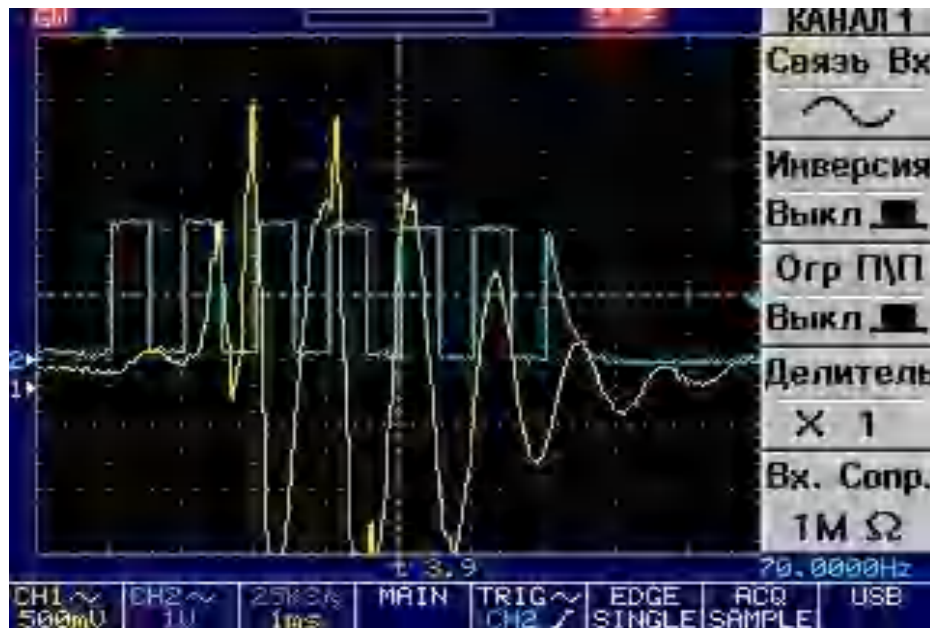


Рис. 3. Характерная оциллограмма генерируемого напряжения пьезопреобразователем давления, получаемая при импульсном механическом воздействии падающего груза на приемный волновод. Прямоугольный сигнал показывает время взаимодействия падающего груза с волноводом

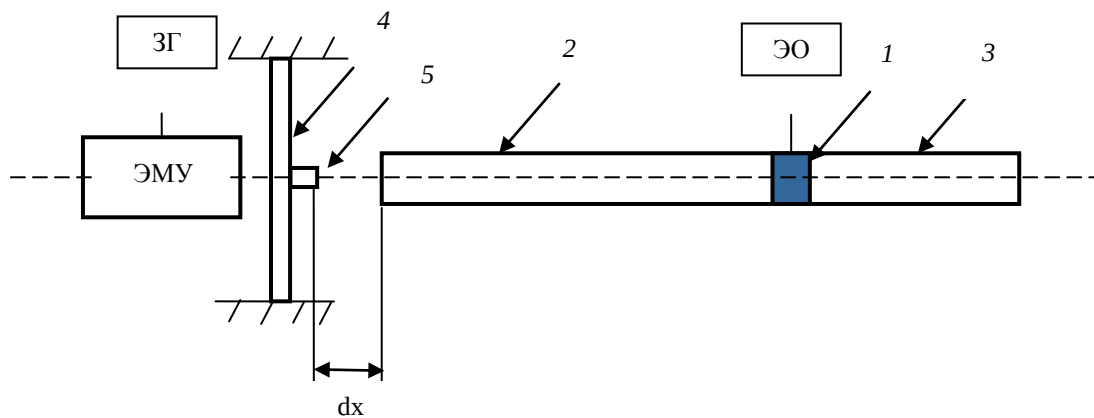


Рис. 4. Схема градуировки преобразователя методом электромагнитного механического воздействия:
1 – пьезоэлемент; 2 – активный волновод; 3 – реактивный волновод; 4 – колеблющееся устройство; 5 – падающее тело (шток);
ЭМУ – электромагнитное устройство; ЗГ – звуковой генератор; ЭО – электронный осциллограф

Другой вариант метода градуировки основывается на формировании импульсного ударного возмущения в преобразователе давления с использованием вынужденных колебаний воздействующего тела – ударника (рис. 4). Электрический сигнал частотой $\nu \approx 20 \div 150 \text{ Гц}$ подается на электромагнитное устройство, посредством которого генерируются механические колебания ударника по аналогии с падающим телом. При возбуждении колебаний ударник достигает торца активного волновода, генерируя в нем акустическое возмущение, кото-

рое регистрируется электронным осциллографом. Измеряя расстояние между ударником и волноводом dx , можно определить амплитуду колебаний. Проводя тривиальные математические действия для колеблющегося тела, имеем:

$$x = A \sin(\omega t), \quad a = A \omega^2 \sin(\omega t),$$

$$p = m A S^{-1} \omega^2 \sin(\omega t),$$

где x – смещение; A – амплитуда; $\omega = 2\pi\nu$ – частота; a – ускорение; m – масса падающего тела; p – импульсное давление; S – площадь сечения активного волновода. Результат показан на рис. 5.

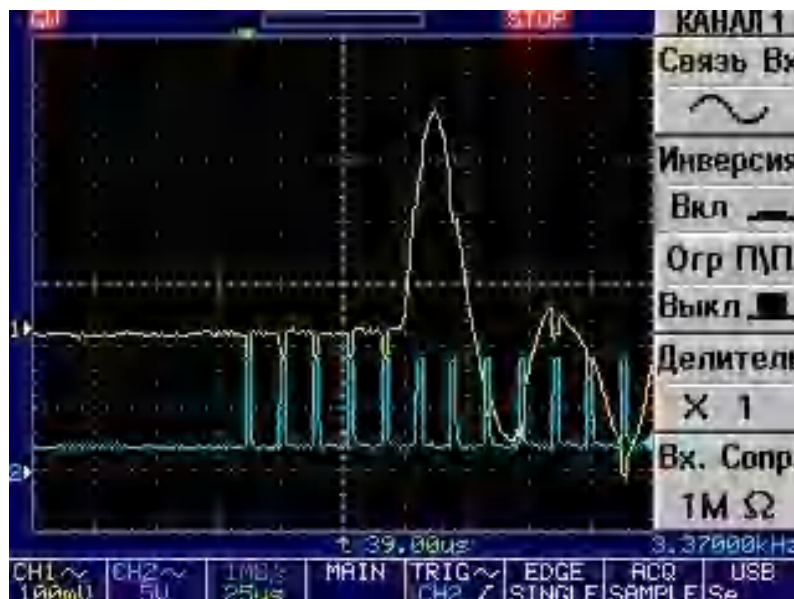


Рис. 5. Характерная оциллограмма генерируемого напряжения пьезопреобразователем давления, получаемая при импульсном механическом воздействии падающего груза на приемный волновод. Прямоугольный сигнал показывает время взаимодействия падающего груза с волноводом

В задачах широкого спектра ударно-волновое воздействие передается на обрабатываемый объект посредством ударных волн, распространяющихся в конденсированной среде. Для получения достоверной информации и корректного приближения к условиям рассматриваемых задач при регистрации импульса давления необходимо градуировку волноводного пьезоэлектрического преобразователя производить в присутствии конденсированной среды, как непосредственного воздействующего элемента на выделенный предмет. Для того чтобы смоделировать возбуждение и распространение ударной волны в конденсированной среде, в нашем случае дистиллированной воде, по аналогии с [12], разработана (рис. 6) градуировочная экспериментальная установка. На торце стенки закрытой цилиндрической камеры 1 устанавливается волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления 2. Камера заполняется передающей конденсированной средой – водой 4. Поршень 3, на который воздействует падающий груз 5 при отклонении на изменяемый угол α , формирует в цилиндре импульс давления. Цилиндр 2 располагается горизонтально, опираясь на жесткую плиту. Электрический сигнал $U(t)$, генерируемый пьезоэлектрическим преобразователем 1, через соответствующую RC-цепь регистрируется запоминающим цифровым осциллографом – ЭО. Как было указано выше, в качестве реактивного акустического волновода применялась вещество, относящееся к неньютоновской жидкости, что позволяет избежать регист-

рации и учета отраженного от противоположной стенки паразитного сигнала, приблизить акустические сопротивления пьезокерамики и смеси, а также применить понятие абсолютной жесткой границы.

Падающий груз в виде бойка на рукоятке, расположен на вертикальной стойке с возможностью изменения положения посредством шарнирного устройства. Изменение угла обеспечивает возможность вариации запасенной потенциальной энергии падающего груза и, соответственно, принять скорость удара груза о поршень. Механический импульс, полученный поршнем, трансформируется в импульс давления акустической волны, воздействующий на пьезопреобразователь. Электрический сигнал $U(t)$, генерируемый пьезокерамическим преобразователем, регистрируется запоминающим цифровым осциллографом ЭО. Расчет амплитуды импульсного давления осуществляется исходя из законов сохранения:

$$(M + m)gH = \frac{J\omega^2}{2},$$

где M – масса бойка; m – масса рукоятки, принимаемой как однородный стержень длиной ℓ ; J – момент инерции падающего груза относительно оси вращения (рукоять и боек), H – высота подъема; R – радиус вращения падающего груза. Таким образом, для линейной скорости $v = \omega R$ имеем:

$$v = \sqrt{\frac{2(M + m)gH}{J}} R.$$

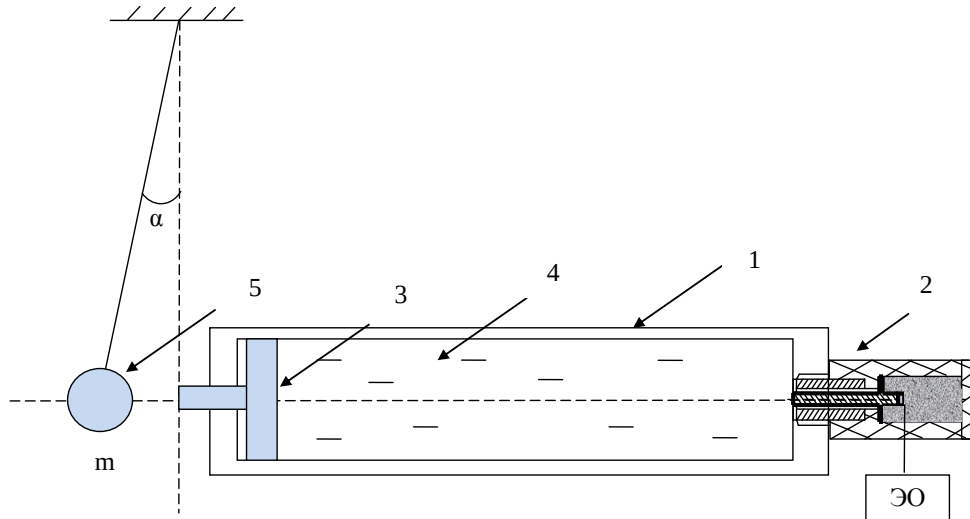


Рис. 6. Схема установки для градуировки волноводного пьезоэлектрического преобразователя давления:
1 – цилиндрическая разрядная камера; 2 – волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления;
3 – поршень; 4 – передающая среда; 5 – падающий груз; ЭО – электронный запоминающий осциллограф

Далее, используя основное уравнение динамики вращательного движения, определим среднее значение силы действующей на жидкость:

$$F = \frac{\Delta L}{R\Delta t} = \frac{J\omega}{R\Delta t} = \frac{1}{R\Delta t} \sqrt{2(M+m)JgH},$$

где ΔL – момент импульса падающего груза; Δt – длительность взаимодействия. Зная площадь поперечного сечения поршня S , можно оценить величину импульса давления в жидкости:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{1}{R\Delta t S} \sqrt{2(M+m)JgH}.$$

Масса бойка	Масса рукоятки	Длина рукоятки	Масса поршня	Площадь поршня	Расстояние от оси вращения до центра масс бойка	Высота подъема центра масс
$M, \text{ кг}$	$m, \text{ кг}$	$\ell, \text{ м}$	$m_0, \text{ кг}$	$S, \text{ м}^2$	$R, \text{ м}$	$H, \text{ м}$
0,480	0,180	0,313	0,096	$2,78 \cdot 10^{-3}$	0,35	0,35-0,55

На рис. 7 показаны характерные осциллограммы генерируемого напряжения пьезопре-

образователем давления $p(t) = kU(t)$ от величины механического возмущения.

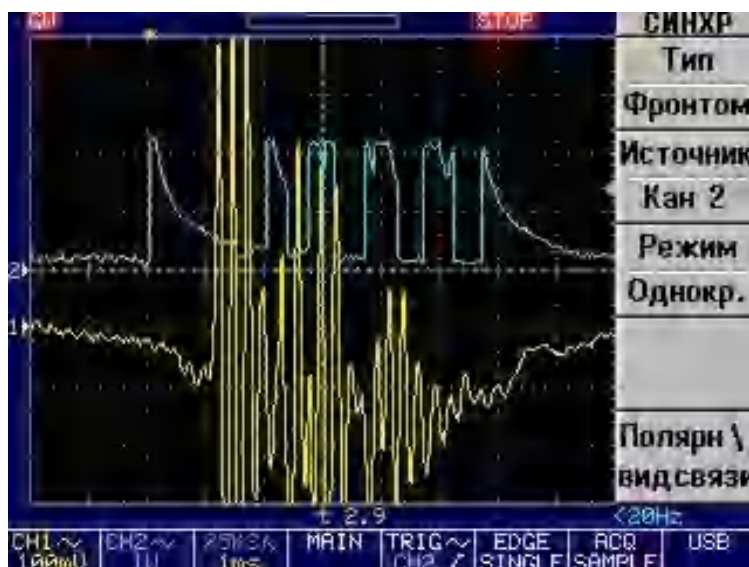


Рис. 7. Характерная осциллограмма генерируемого напряжения пьезопреобразователем давления, получаемая при импульсном механическом воздействии падающего груза на приемный волновод. Прямоугольный сигнал показывает время взаимодействия падающего груза с волноводом

В результате проведенных экспериментов и анализа результатов получены значения переводного коэффициента для волноводного пьезоэлектрического преобразователя давления с убедительной согласованностью при использовании представленных методик градуировки:

$$k_1 = 1.2 \cdot 10^6 \text{ Па/В}, \quad k_2 = 4.8 \cdot 10^6 \text{ Па/В}, \\ k_3 = 4.20 \cdot 10^6 \text{ Па/В}.$$

Заключение

Таким образом, в работе представлен волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления, реактивный акустический волновод которого выполнен из смеси материалов, относящихся к неньютоновским жидкостям. Рассмотрены методики градуировки, принцип действия которых основывается на импульсном механическом воздействии на преобразователь. Проведены эксперименты по определению значения переводного коэффициента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3-х т. / под ред. А. Е. Панича. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006.
2. A. Grinenko, V. Ts. Gurovich, Ya. E. Krasik and others / Analysis of shock wave measurements in water by a piezoelectric pressure / Review of scientific instruments V. 75, N. 1 J. 2004. DOI: 10.1063/1.1630832.
3. Кочетков, И. И. Ударно-волновые процессы при взрыве проводников в воде и пузырьковых средах / И. И. Кочетков, А. В. Пинаев // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51, № 6. – С. 109–119.
4. Sankarsan, Padhy, Susmita Panigrahi / Measuring Projectile Velocity using Shock Wave Pressure Sensors Defence Science Journal, Vol. 64, No. 6, November 2014, pp. 499–501. DOI : 10.14429/dsj.64.8108.
5. Голуб, В. В. Пьезоэлектрические датчики для измерения быстроменяющихся и пульсирующих давлений / В. В. Голуб, Ю. В. Жилин, Н. А. Марчук // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 4. – С. 132–139. DOI: 10.1134/S0032816218040055.
6. Жекул, В. Г. Пьезоэлектрический волноводный датчик для измерения импульсного давления в замкнутых объемах жидкости при высоковольтном электрическом разряде / В. Г. Жекул, А. П. Смирнов и др. // Электротехника і Електромеханіка. – 2017. – № 5. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.5.09.
7. Волноводный датчик импульсных давлений ПМ МПК G01L 23/10 (2006.01) № RU 204491 U1 / А. Л. Суркаев, Д. А. Канцдалов, В. И. Усачев, В. А. Суркаев ; ВолгГТУ. – Волгоград. Заяв.: 2021103134, 10.02.2021, Опубл.: 27.05.2021, Бюл. № 36.
8. Бескаравайный, Н. М. Теоретические основы измерения импульсных давлений в жидких средах / Н. М. Бескаравайный, В. В. Поздеев. – Киев: Наукова думка, 1981. – 190 с.
9. Позднеев, В. А. Математическая модель процесса градуировки волнового пьезоэлектрического датчика методом падающего шарика / В. А. Позднеев, Вад. А. Позднеев, В. В. Тульский // Сб. науч. стат. Процессы преобразования энергии при электровзрыве. – Киев: Наукова думка, 1988. – С. 94–101.
10. Юсупов, Р. Ю. Измерение импульсных давлений в объеме расплава в условиях интенсивных импульсных помех / Р. Ю. Юсупов, Е. Е. Кострюков // Вестник Самарского аэрокосмического университета № 5 (36). – 2012. – С. 257–262.
11. Surkaev, A. L. Investigation of a pulsed waveguide piezoelectric pressure sensor / Surkaev A.L., Kul'kov V. G. // Acoustical Physics. Volume 52, Number 2 / 2006. – P. 218–221.
12. Суркаев, А. Л. Методика измерения давления ударно-акустической волны электрического взрыва проводника в разрядной камере с конденсированной средой / А. Л. Суркаев, Ю. П. Муха // Контроль. Диагностика. – 2020. – Т. 23. – № 8. – С. 50–55.

УДК 621.316.1

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-20-27

О. О. Ахмедова¹, Т. В. Копейкина¹, О. С. Атрашенко¹, О. И. Елфимова²

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАЩИТ С АДАПТИВНОЙ УСТАВКОЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ БОЛЕЕ 110 КВ

¹ Камышинский технологический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета

² Волгоградский государственный технический университет

Ahmedova-olga@mail.ru, kopeikina.tania@yandex.ru

olgapasmenko@yandex.ru, olgaikarpenko@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Ольга Олеговна Ахмедова, Ahmedova-olga@mail.ru

Статья посвящена обоснованию необходимости учета параметров грунта (сопротивления, влажности) под воздушной линией электропередачи при проектировании защит нулевой последовательности на ВЛ (воздушных линиях электропередачи) с заземленной нейтралью. Производится анализ влияния глубины прохождения фиктивного провода ВЛ на изменение погонного реактивного сопротивления. Доказано, что использование табличных значений сопротивления приводит к завышению уставок срабатывания защиты и снижению коэффициента чувствительности. Параметры срабатывания защит нулевой последовательности особенно сильно подвержены влиянию изменения погонного реактивного сопротивления, так как они отстраи-

ваются от утроенного тока нулевой последовательности. Поэтому предлагается на этапе проектирования системы релейной защиты учитывать параметры грунта под воздушной линией электропередачи и устанавливать защиты с адаптивной уставкой, способные корректировать параметры срабатывания в зависимости от изменения сезонности, передавая информацию о влажности почвы от датчиков, установленных в грунте на систему релейной защиты. Это позволит уменьшить величину «мертвой зоны» первой ступени токовой защиты нулевой последовательности без выдержки времени и увеличить чувствительность защиты в целом ко всем видам повреждений на землю.

Ключевые слова: релейная защита нулевой последовательности, параметры воздушных линий электропередачи, конечная проводимости земли, адаптивная уставка

O. O. Akhmedova¹, T. V. Kopeykina¹, O. S. Atrashenko¹, O. I. Elfimova²

RATIONALE FOR USING ADAPTIVE SETTING PROTECTIONS IN DESIGNING OVERHEAD LINES WITH VOLTAGE MORE THAN 110 kV

¹**Kamyshin Institute of Technology (branch)**

Volgograd State Technical University

²**Volgograd State Technical University**

The article is devoted to the substantiation of the need to take into account the parameters of the soil (resistance, humidity) under an overhead power line when designing zero-sequence protections on overhead lines (overhead power lines) with a grounded neutral. The influence of the depth of passage of the fictitious overhead line wire on the change in linear reactance is analyzed. It is proved that the use of tabular resistance values leads to an overestimation of the protection response settings and a decrease in the sensitivity coefficient. The parameters of the zero sequence protection operation are particularly strongly influenced by changes in the linear reactance, since they are tuned from the tripled zero sequence current. Therefore, it is proposed at the design stage of the relay protection system to take into account the soil parameters under the overhead power line and install protections with an adaptive setpoint that can adjust the response parameters depending on changes in seasonality, transmitting information about soil moisture from sensors installed in the ground on the relay protection system. This will reduce the size of the «dead zone» of the first stage of zero-sequence current protection without time delay and increase the sensitivity of protection in general to all types of damage to the ground.

Keywords: zero-sequence relay protection, parameters of overhead power lines, final earth conductivity, adaptive setpoint

Введение

На основании «Руководящих указаний по релейной защите. Выпуск 12. Токовая защита от замыканий на землю линий 110–500 кВ» [1] от коротких замыканий (КЗ) на землю в сетях с заземленной нейтралью, совместно с защитой от междуфазных коротких замыканий необходимо предусмотреть трехступенчатую защиту нулевой последовательности. В электросетях напряжением 110 кВ относительная вероятность однофазных КЗ составляет 83 %, напряжением 220 кВ – 88 %, напряжением 500 кВ – 95 %. При этом однофазные короткие замыкания сопровождаются протеканием значительных по величине токов, соизмеримых с токами срабатывания максимальной токовой защиты от междуфазных КЗ. Однако установка на линии электропередачи с односторонним питанием дополнительной защиты нулевой последовательности является целесообразным, вследствие возможности уменьшить выдержки времени срабатывания, уменьшить величину «мертвой зоны» и повысить чувствительность. Положительный эффект достигается за счет более значительного уменьшения тока нулевой последовательности при прохождении по линии электропередачи по сравнению с током

трехфазного короткого замыкания, из-за неравенства сопротивлений прямой и нулевой последовательности.

Анализ факторов, приводящих к погрешности в определении уставок защит нулевой последовательности

Первая ступень защиты – токовая отсечка нулевой последовательности без выдержки времени – отстраивается от максимального значения периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности $3I_{0\text{вн max}}^{(m)}$ [2]:

$$I_{сз(n)}^I = k_{отс}^I 3I_{0\text{вн max}}^{(m)}, \quad (1)$$

где $I_{сз(n)}^I$ – ток срабатывания первой ступени токовой отсечки нулевой последовательности; $k_{отс}^I$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности и необходимый запас, для линий 110–220 кВ принимается 1,2; $3I_{0\text{вн max}}^{(m)}$ – максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности.

Вторая ступень защиты – токовая отсечка нулевой последовательности с выдержкой времени – отстраивается от первой ступени защи-

ты предыдущего участка линии электропередачи [2]:

$$I_{сз(n)}^{II} = k_{отс}^{II} I_{сз(n-1)}^I, \quad (2)$$

где $I_{сз(n)}^{II}$ – ток срабатывания второй ступени токовой отсечки нулевой последовательности с выдержкой времени; $k_{отс}^{II}$ – коэффициент отстройки, принимается 1,1; $I_{сз(n-1)}^I$ – ток срабатывания первой ступени токовой защиты нулевой последовательности предыдущего участка линии.

Третья ступень защиты – максимальная токовая защита нулевой последовательности, которая отстраивается от тока небаланса при внешних междуфазных коротких замыканиях [2]:

$$I_{сз(n)}^{III} = k_{отс}^{III} I_{нб.реч.тах}, \quad (3)$$

где $I_{сз(n)}^{III}$ – ток срабатывания третьей ступени максимальной токовой защиты нулевой последовательности; $k_{отс}^{III}$ – коэффициент отстройки, принимается 1,2; $I_{нб.реч.тах}$ – ток небаланса, вызванный различной погрешностью трансформаторов тока.

Особенностью расчета защит нулевой последовательности является учет токораспределения при коротких замыканиях на землю, которое зависит от количества, места включения и сопротивления нулевой последовательности трансформаторов с заземленными нейтралями и прилегающих сетей электроснабжения [3]. Корректность функционирования данного вида защиты напрямую зависит от правильного определения параметров сети, так как именно сопротивления линий электропередач могут из-

меняться в зависимости от изменения внешних условий окружающей среды.

Рассмотрим параметры линии электропередачи (рис. 1).

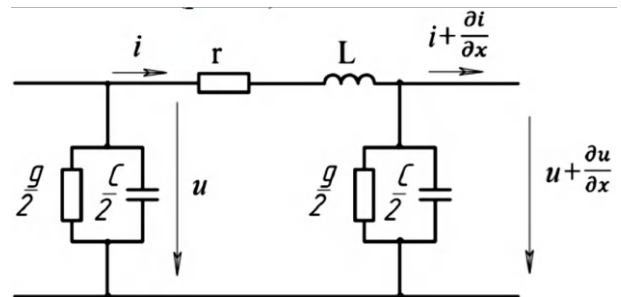


Рис. 1. П-образная схема замещения ВЛЭП

Линия электропередачи характеризуется продольными параметрами: погонным активным сопротивлением, погонным реактивным сопротивлением и поперечными параметрами: погонной активной проводимостью и погонной реактивной проводимостью [4]. Кроме того, необходимо учитывать проводимость грунта. Для упрощения расчетов токов короткого замыкания принимают проводимость земли бесконечной с возвратом токов по ее поверхности, в действительности земля обладает конечной проводимостью с расположением фиктивного провода в земле (в зависимости от удельного сопротивления грунта глубина возврата тока может меняться в широком диапазоне, для средней полосы России примерно 1000 м) и при расчете защит нулевой последовательности пренебрежение этим параметром может привести к неверному определению уставок срабатывания (рис. 2).

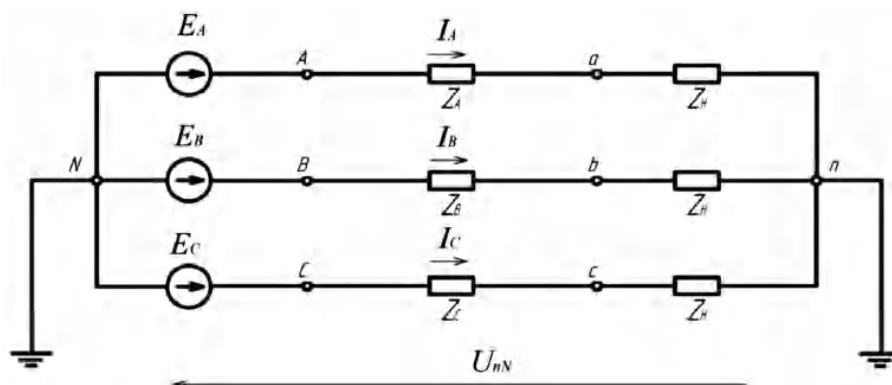


Рис. 2. Схема замещения ВЛЭП с учетом конечной проводимости земли

По законам Кирхгофа запишем уравнения распределения токов и напряжений для схемы

замещения трехфазной линии с соединением нагрузки в звезду:

$$\begin{pmatrix} \dot{E}_A \\ \dot{E}_B \\ \dot{E}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{Z}_A + Z_n + Z_3 & Z_3 & Z_3 \\ Z_3 & \underline{Z}_B + Z_n + Z_3 & Z_3 \\ Z_3 & Z_3 & \underline{Z}_C + Z_n + Z_3 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где Z_n – сопротивление нагрузки; Z_3 – сопротивление земли.

Из выражения (4) определяются токи в линии:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{1}{\Delta_Z} (\dot{E}_A \Delta_{AA} + \dot{E}_B \Delta_{BA} + \dot{E}_C \Delta_{CA}) \\ \dot{I}_B &= \frac{1}{\Delta_Z} (\dot{E}_A \Delta_{AB} + \dot{E}_B \Delta_{BB} + \dot{E}_C \Delta_{CB}) \\ \dot{I}_C &= \frac{1}{\Delta_Z} (\dot{E}_A \Delta_{AC} + \dot{E}_B \Delta_{BC} + \dot{E}_C \Delta_{CC}), \end{aligned} \quad (5)$$

где Δ_Z – определитель матрицы $|Z|$; Δ_{ij} – алгебраическое дополнение определителя Δ_Z .

Значения Δ_Z и Δ_{ij} находим следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta_Z &= [\underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \underline{Z}_C + 3(Z_n + Z_3)] \cdot (1 - Z_3^2) + 2Z_3^3 \\ \Delta_{AA} &= \underline{Z}_B \cdot \underline{Z}_C + (\underline{Z}_B + \underline{Z}_C) \cdot (Z_n + Z_3)^3 \\ \Delta_{BB} &= \underline{Z}_A \cdot \underline{Z}_C + (\underline{Z}_A + \underline{Z}_C) \cdot (Z_n + Z_3)^3 \\ \Delta_{CC} &= \underline{Z}_A \cdot \underline{Z}_B + (\underline{Z}_A + \underline{Z}_B) \cdot (Z_n + Z_3)^3 \\ \Delta_{AB} &= \Delta_{BA} = -R_3 \cdot (\underline{Z}_C + Z_n) \\ \Delta_{BC} &= \Delta_{CB} = -R_3 \cdot (\underline{Z}_A + Z_n) \\ \Delta_{AC} &= \Delta_{CA} = -R_3 \cdot (\underline{Z}_B + Z_n) \end{aligned} \quad (6)$$

Определим влияние конечной проводимости земли по методу Рюденберга [5]:

$$Z_3 = \frac{E_3}{I} = \left(\pi^2 f + j4\pi f \ln \frac{0,178}{h\sqrt{f\gamma} \cdot 10^{-9}} \right) \cdot 10^{-9} \text{ Ом} / \text{см} = \left(\pi^2 f + 29f \lg \frac{0,178}{h\sqrt{f\gamma} \cdot 10^{-9}} \right) \cdot 10^{-4} \text{ Ом} / \text{км}, \quad (7)$$

где E_3 – электродвижущая сила; I – ток в проводе; f – частота; h – расстояние от провода до поверхности земли [5]; γ – удельная проводимость грунта.

Разложим полное сопротивление на активную R_3 и реактивную X_3 составляющие, тогда:

$$R_3 = \pi^2 f \cdot 10^{-4}. \quad (8)$$

Запишем полное сопротивление провода [5]:

$$\begin{aligned} Z_{np} &= R_{0t} + R_3 + jX_3 + jX_\sigma = \\ &= \left[R_{020} (1 + \alpha(t - 20^\circ)) + \left(\pi^2 f + j29f \lg \frac{0,178}{r_{np}\sqrt{f\gamma} \cdot 10^{-9}} \right) \cdot 10^{-4} \right], \end{aligned} \quad (10)$$

где Z_{np} – полное сопротивление провода; R_{0t} – погонное активное сопротивление провода с учетом температуры окружающего воздуха; X_σ – реактивное сопротивление, создаваемое частью замыкающегося потока в воздухе; R_{020} – погонное активное сопротивление провода при температуре окружающей среды 20°C ; α – температурный коэффициент электрического сопротивления; t – температура провода.

Согласно выражению (10) разделим полное сопротивление провода на активную и реактивную составляющие [5]:

$$X_3 = 29f \lg \frac{0,178}{h\sqrt{f\gamma} \cdot 10^{-9}} \cdot 10^{-4}. \quad (9)$$

Для точного определения полного сопротивления провода с учетом проводимости земли необходимо также учитывать активное сопротивление самого провода и сцепление провода с частью потока, который замыкается в воздухе.

$$Z_{np} = R_{np} + jX_{np} \quad (11)$$

$$R_{np} = \left(R_{020} (1 + \alpha(t - 20^\circ)) + \pi^2 f \cdot 10^{-4} \right) \quad (12)$$

$$X_{np} = 29f \lg \frac{0,178}{r_{np}\sqrt{f\gamma} \cdot 10^{-9}} \cdot 10^{-4}. \quad (13)$$

$$\text{Заменим} \quad D_3 = \frac{0,178}{\sqrt{f\gamma} \cdot 10^{-9}}. \quad (14)$$

Получим

$$X_{np} = 29f \lg \frac{D_3}{r_{np}} \cdot 10^{-4}. \quad (15)$$

Из выражения (13) следует, что реактивное сопротивление не зависит от высоты подвеса провода, так как (9) увеличение высоты подвеса уменьшает X_3 от потока, замыкающегося в грунте, но при этом увеличивается $X_в$ из-за увеличения потока, замыкающегося в воздухе [5].

Анализ влияния сопротивления грунта под ВЛ на параметры срабатывания первой ступени защиты нулевой последовательности

На основании вышеизложенного, проведем анализ изменения уставок срабатывания защит нулевой последовательности на примере участка трехфазной линии электропередачи без грозозащитного троса (рис. 3).

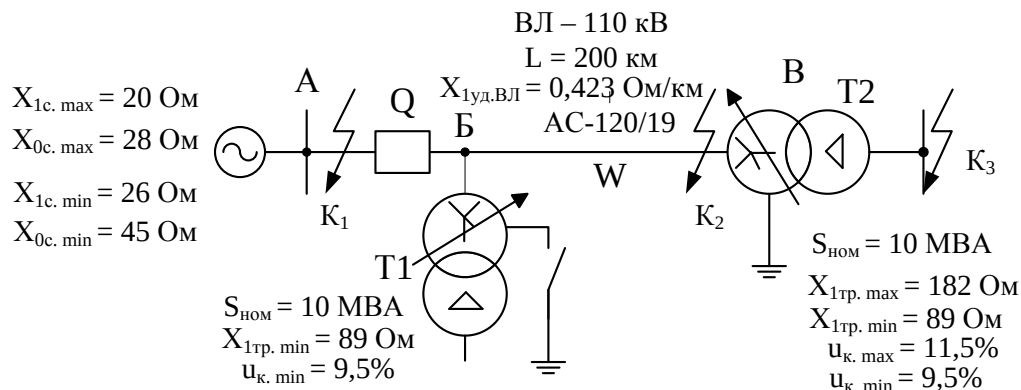


Рис. 3. Расчетная схема участка электроэнергетической сети

Сопротивления воздушной линии электропередачи на напряжение 110 кВ допустимо рассчитывать без учета активной составляющей. Сопротивление прямой последовательности $X_{1ВЛ} = 0,423$ Ом/км. Сопротивление нулевой последовательности $X_{0ВЛ}$ одноцепной трехфазной воздушной линии электропередачи без заземненных грозозащитных тросов найдем с учетом конечной проводимости земли [3]:

$$X_{0ВЛ} = 0,435 \lg \frac{D_3}{r_{cp}}, \quad (16)$$

где $r_{cp} = \sqrt[3]{r_{эк} D_{cp}^2}$ – среднегеометрический радиус системы из трех проводов линии.

На рис. 4 представлено изменение величины сопротивления нулевой последовательности провода AC-120/19 в зависимости от изменения сопротивления грунта.

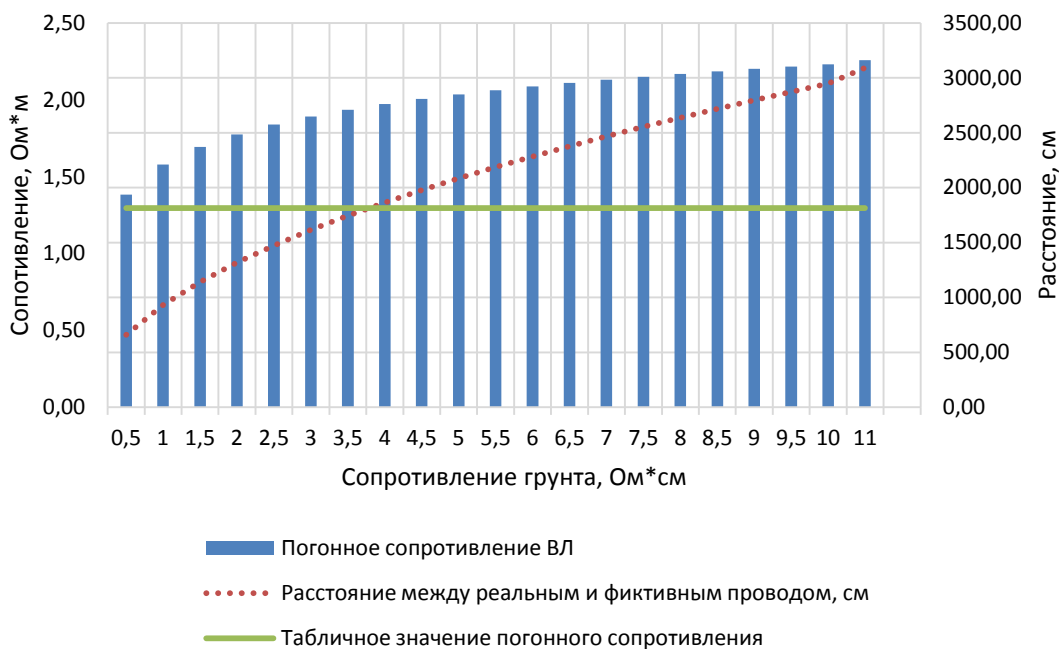


Рис. 4. Зависимость величины сопротивления нулевой последовательности от изменения сопротивления грунта

Из анализа рис. 4 следует, что табличное значение погонного сопротивления ВЛ, принимаемого при расчетах уставок защит нулевой последовательности значительно отличается от расчетных данных с учетом конечной проводимости грунта [5].

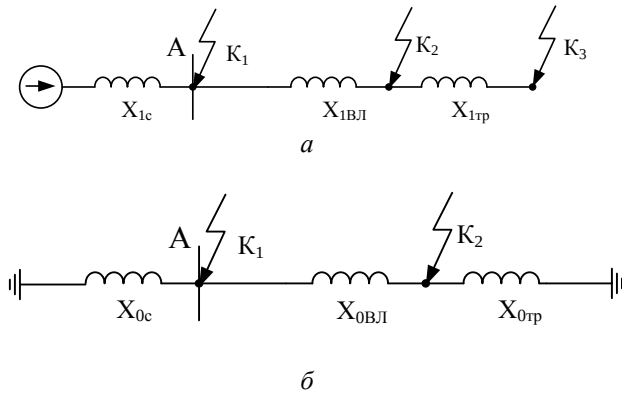


Рис. 5. Схемы замещения прямой (а) и нулевой (б) последовательностей участка электроэнергетической сети

Для определения токов короткого замыкания составим схему прямой (рис. 5, а) и нулевой последовательностей (рис. 5, б) участка электрической сети, представленного на рис. 3.

Произведем расчет первой ступени защиты токовой отсечки и определим возможность выполнения без реле направления мощности нулевой последовательности [6] (рис. 6).

$$3I_{0K1}^{(1)} = \frac{3U_{\phi}}{2X_{1K1} + X_{0K1}} \quad (17)$$

$$X_{1K1} = X_{2K1} = X_{1c, \max}$$

$$X_{0K1} = \frac{X_{0c}(X_{0ВЛ} + X_{0mp})}{X_{0c} + X_{0ВЛ} + X_{0mp}}$$

Составляющая тока короткого замыкания со стороны системы:

$$3I_{0c} = \frac{3I_{0K1} \cdot X_{0K1}}{X_{0c}}$$

со стороны воздушной линии электропередачи:

$$3I_{0c} = \frac{3I_{0K1} \cdot X_{0K1}}{X_{0ВЛ} + X_{0mp}}$$

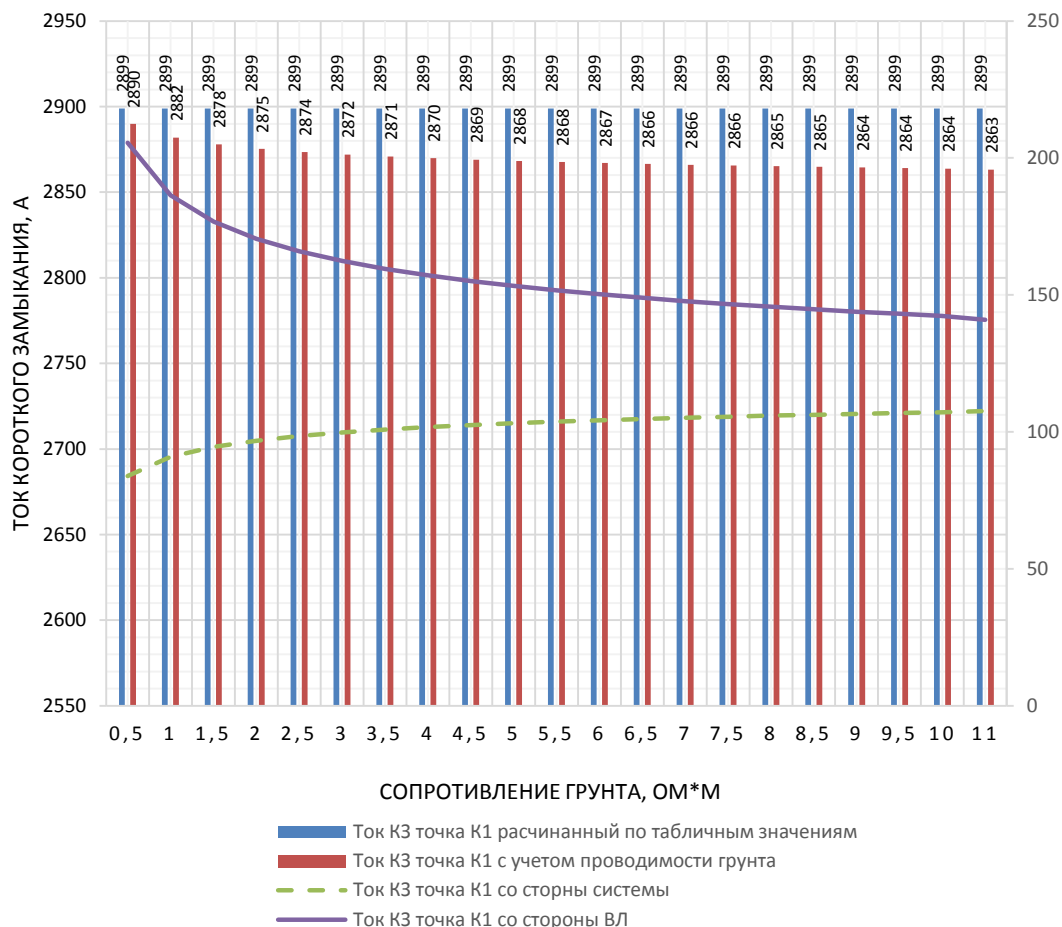


Рис. 6. Зависимость изменения токов короткого замыкания в точке K1 от сопротивления грунта

Ток срабатывания ненаправленной отсечки (1) от коротких замыканий на землю по условию несрабатывания при кз в точке К1 принимаем (рис. 7):

$$I_{сз}^I = k_n 3I_{0ВЛ}.$$

Исходя из расчетных данных (рис. 4–5) следует, что погрешность определения тока нулевой последовательности при коротком замыка-

нии в точке К1 при использовании табличных значений сопротивлений нулевой последовательности составит от 8 % до 5,8 %, а средняя погрешность тока срабатывания токовой защиты нулевой последовательности будет около 47 %, за счет значительных колебаний реальных значений сопротивления нулевой последовательности (рис. 4).

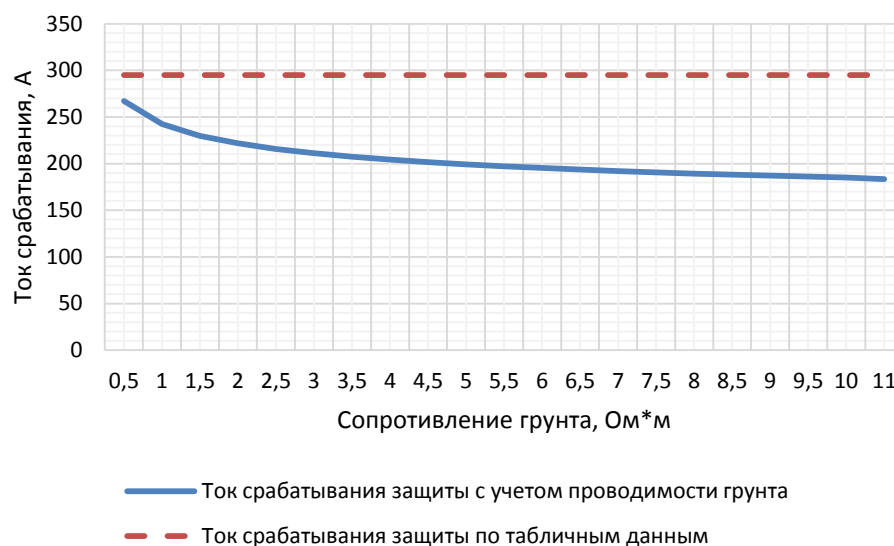


Рис. 7. Зависимость изменения тока срабатывания первой ступени защиты от изменения сопротивления грунта

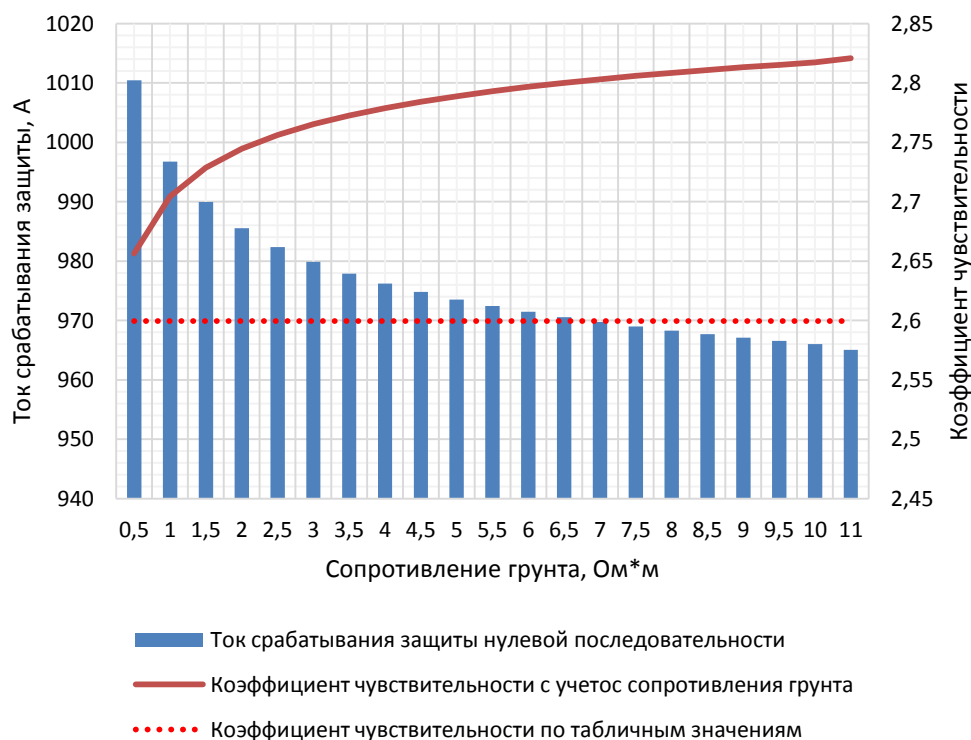


Рис. 8. Изменение тока срабатывания защиты нулевой последовательности и коэффициента чувствительности

Произведем оценку эффективности ненавленной токовой защиты нулевой последовательности при постоянной уставке срабатывания, рассчитанной при фиксированном табличном значении погонного сопротивления и уставки срабатывания с учетом изменения сопротивления грунта под воздушной линией электропередачи в точке К2 (рис. 8).

Вывод

Величина тока срабатывания первой ступени токовой защиты нулевой последовательности сильно зависит от сопротивления грунта. При разработке системы релейной защиты электроэнергетических систем на этапе проектирования пользуются погонными значениями сопротивлений, усредненными, и не учитывают в расчетах сопротивление грунта, в результате средняя погрешность составляет 5 %. При этом значение $I_{сз}$, определяемого по табличным данным, выше реального на 61 А, завышенный ток срабатывания заглубляет систему релейной защиты и уменьшает чувствительность ее. Поэтому для корректного функционирования защиты необходимо использовать адаптивную защиту, способную корректировать автоматически уставку срабатывания в зависимости от сезонных изменений сопротивления грунта. Необходимо под линией электропередачи устанавливать датчики влажности, которые будут передавать параметры грунта в систему релейной защиты, которая посредством алгоритма

обрабатывается изменяет уставку. Кроме того, рекомендуется при проектировании защиты воздушных линий электропередачи учитывать сопротивление грунта (посредством использования карты грунтов).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 12. Токовая защита от замыканий на землю Линий 110–500 кВ. Расчеты. – М.: Энергия, 1980. – 75 с.
2. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб. для вузов по спец. «Электроснабжение». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 496 с.
3. Крючков, И. П. Короткие замыкания и выбор электрооборудования : учебное пособие / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев ; под редакцией И. П. Крючкова, В. А. Старшинова. – Москва : МЭИ, 2012. – 568 с.
4. Ахмедова, О. О. Исследование корректного функционирования модели системы релейной защиты с адаптивной уставкой срабатывания / О. О. Ахмедова, А. Г. Сошинов // Кибернетика энергетических систем: сборник материалов XL сессии научного семинара по тематике «Диагностика энергооборудования». – 2018. – С. 259–266.
5. Ахмедова, О. О. Анализ влияния изменения погонных параметров воздушной линии электропередачи под воздействием внешних факторов на уставку срабатывания дистанционной защиты / О. О. Ахмедова, А. Г. Сошинов // Промышленная энергетика. – 2021. – № 7. – С. 14–21.
6. Лоскутов, А. А. Функциональные испытания микропроцессорного терминала релейной защиты ТОР 200 в системе электроснабжения с объектом распределенной генерации / А. А. Лоскутов, А. Л. Куликов, И. А. Петров, Н. М. Шмелева, А. А. Кринкин // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей IX Всероссийской (XLII Региональной) научно-технической конференции. – Нижний Новгород, 2023. – С. 247–263.

УДК 621.316.1

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-27-31

А. Г. Сошинов, Т. В. Копейкина, О. С. Атращенко, О. О. Ахмедова

РЫНОЧНЫЕ СТРУКТУРЫ ЭКОНОМИКИ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета

epp@kti.ru, kopeikina.tania@yandex.ru, olgapasmenko@yandex.ru, Ahmedova-olga@mail.ru
Автор, ответственный за переписку: Ольга Олеговна Ахмедова, Ahmedova-olga@mail.ru

Статья посвящена изучению рыночных структур экономики совместного использования электроэнергии. Рассматриваются механизмы ценообразования для совместного хранения энергии. Приводится классификация рынков транзактивной энергии. Отражается, что активное развитие возобновляемых источников энергии является одним из основных способов преобразования нынешней энергетической отрасли в экологически чистую и безопасную энергетику. Для ускорения развития возобновляемых источников энергии страны разрабатывают свои планы действий, определяющие цели развития возобновляемых источников энергии. В статье характеризуется современное состояние рынка транзактивной энергии.

Отмечается преобразование рыночных структур при внедрении децентрализованной транзакционной модели.

Ключевые слова: структура, модель, продукт, рынок, совместное хранение энергии, транзактивная энергия

A. G. Soshinov, T. V. Kopeykin, O. S. Atrashenko, O. O. Akhmedova

MARKET STRUCTURES OF THE ELECTRICITY SHARING ECONOMY

**Kamyshin Institute of Technology (branch)
Volgograd State Technical University**

The article is devoted to the study of market structures of the electricity sharing economy. Pricing mechanisms for shared energy storage are considered. The classification of transactional energy markets is given. It is reflected that the active development of renewable energy sources is one of the main ways to transform the current energy industry into environmentally friendly and safe energy. To accelerate the development of renewable energy sources, countries are developing their own action plans defining the goals of the development of renewable energy sources. The article characterizes the current state of the transactional energy market.

It is noted that the transformation of market structures with the introduction of a decentralized transactional model.

Keywords: structure, model, product, market, shared energy storage, transactional energy

Введение

Увеличение использования возобновляемых источников энергии является крайне неустойчивым и непостоянным, что затрудняет поддержание баланса между спросом и предложением в режиме реального времени и ставит под угрозу стабильную работу энергосистемы. Новые экономические модели и инструменты регулирования необходимы для решения ряда проблем, связанных с крупномасштабным использованием возобновляемых источников энергии в интеллектуальных сетях [1].

Рыночные структуры

Взаимодействие между операторами совместного хранения энергии и пользователями зависит от структуры рынка совместного хранения энергии, включая структуру совместного использования, торговые продукты и механизм ценообразования [2]. Структура совместного использования характеризует инвесторов и владельцев ресурсов хранения энергии и раскрывает роль операторов совместного хранения энергии.

Торговые продукты представляют собой услуги, которые могут быть предоставлены с помощью совместного хранения энергии. Механизм ценообразования – это стратегия настройки цен на услуги совместного хранения энергии при условии согласования интересов покупателей и продавцов [3]. Это также фундаментальная гарантия прибыльности операторов совместного хранения энергии и отражение готовности пользователей к покупке.

В соответствии с различными инвесторами устройств хранения энергии, структура совместного хранения энергии может быть разделена на инвестиционные структуры пользователей и инвестиционные структуры сторонних операторов. Структура инвестиций пользователей

может быть разделена на модель сопоставления групп пользователей, модель Tesla и модель накопления энергии в сообществе в зависимости от того, предоставляют ли пользователи свои хранилища энергии или нет, в соответствии с моделью сопоставления групп пользователей. Как только группы пользователей сопоставлены с определенными транзакциями или модулями, пользователи в этой группе могут отвечать на сообщения, относящиеся к конкретной теме. Данная модель упрощает коммуникацию между производителями и его конечными клиентами [4].

Бизнес-модель компании Tesla Motors работает по принципу «от потребителя к потребителю», поскольку она осуществляет прямые продажи, отсекая посредников, таких как дилерские центры, и предлагая собственную сеть зарядных станций.

Tesla характеризуется тем, что является компанией, которая в основном разделена на три бизнес-модели: автопроизводитель, поставщик оборудования и технологическая компания [5].

Торговые продукты в экономике совместного использования электроэнергии включают мощность зарядки, мощность разряда, энергию и емкость. Фактически, из-за взаимосвязи между мощностью и емкостью хранилища энергии, совместное хранилище выделяет пользователям не только фиксированное количество энергии для зарядки/разрядки, но также соответствующее количество емкости и энергии для пользователей.

В современной экономике механизмы ценообразования для совместного хранения энергии в основном определяются с помощью фиксированной цены/времени использования, аукционов, игр и стратегий распределения. В режиме фиксированной цены/времени использования

цена определяется единичной производительностью/мощностью, расходом и индивидуальными упаковками. В режиме аукциона цена услуги по хранению энергии определяется путем торгов между покупателями и продавцами, чтобы максимизировать социальное благосостояние. В игровом режиме равновесная цена получается в результате некооперативной игры, полностью учитывая конфликтующие интересы и ценности покупателей и продавцов. Стратегия распределения в основном работает с использованием методов совместной игры, включая метод стоимости Шепли, метод ядра и метод переговоров Нэша для распределения затрат и выгод.

В зависимости от того, существует ли централизованный координатор, ответственный за функционирование рынка, или централизованный координатор отвечает за клиринг глобального рынка, рынки транзактивной энергии делятся на две структуры: централизованные и децентрализованные рынки.

Централизованный рынок

На централизованном рынке централизованный оператор, как правило, должен нести ответственность за весь процесс доступа к рынку, клиринга и расчетов. Оператором рынка может быть оператор микросети, виртуальная электростанция, менеджер сообщества или даже сторонний оператор. Операторы рынка, как правило, непосредственно участвуют в оптовом рынке верхнего уровня и отвечают за передачу ценовых сигналов производителям и потребителям нижнего уровня в системах распределения.

Более того, централизованные рынки можно дополнительно разделить на две группы в зависимости от того, является ли оператор рынка коммерческой организацией или нет. Для операторов рынка, ориентированных на получение прибыли (например, инвесторов в фотоэлектрические сети сообщества, виртуальные электростанции и т. д.), его суть заключается либо в приобретении и перепродаже энергии, либо в прямых продажах потребителям.

В этой модели целевой функцией рыночного клиринга, как правило, является максимизация его доходов, что часто противоречит интересам потребителей, чья целевая функция заключается в максимизации их выгод.

Поэтому игровая техника Штакельберга часто используется в таких рыночных архитек-

турах. Модель Штакельберга является одной из основных моделей в теории игр и используется для анализа ситуаций, в которых один игрок, называемый лидером, принимает решение первым, а другой игрок, называемый последователем, принимает решение вторым, зная решение лидера [5].

Рынок функционирует как лидер, принимающий оптимальные решения, в то время потребители как последователи реагируют ради него самого. Точка равновесия между лидером и последователями – это результат расчистки рынка. Для некоммерческих операторов рынка целевой функцией рыночного клиринга является максимизация общего социального благосостояния или минимизация транзакционных издержек. Теория аукциона и кооперативные игры – две наиболее распространенные рыночные модели. С точки зрения конкретной цены теория аукциона учитывает предельные издержки каждого покупателя, в то время как кооперативные игры требуют, чтобы покупатели формировали кооперативный альянс и перераспределяли доходы на основе оптимального альянса. Значение Шепли и метод ядра [6] являются классическими методами для решения такого рода проблем. Ценность Шепли – это система, которая определяет вклад отдельного игрока, когда два или более игрока работают в сотрудничестве друг с другом. Индивидуальный выигрыш определяется на основе неравного вклада каждого игрока. Шепли метод обеспечивает равный или обоснованный кредит законному участнику – тому, кто внес большой объем вклада [7].

Децентрализованный рынок

По сравнению с централизованным рынком, децентрализованного рынка не существует. Как правило, рынок транзактивной энергии ориентирован на профессиональных потребителей в системах распределения, а масштаб субъектов рынка намного больше, чем на оптовом рынке. Режим торговли на рынке транзактивной энергии также отличается от режима оптового рынка, который больше не является простой моделью транзакций с загрузкой генератора, а включает планирование и контроль множества распределенных ресурсов. Большое количество участников рынка и контроль распределенных ресурсов с высоким разрешением могут расширить масштабы проблемы очистки рынка.

Преобразование рыночных структур при внедрении децентрализованной транзакционной модели приводится на рисунке [8].



Преобразование рыночных структур
при внедрении децентрализованной транзакционной модели

Между тем потребители на рынке транзактивной энергии также отличаются от оптовых компаний и на оптовом рынке, которые могут не быть ориентированы исключительно на получение прибыли и вести себя с ограниченной рациональностью. Некоторые исследования показали, что потребители могут не рассматривать электроэнергию как однородный продукт и иметь разные предпочтения в отношении экологически чистого электричества, бесконтактной торговли и рыночных рисков. Это означает, что традиционные рациональные модели максимизации экономических выгод больше не применяются. Однако оба режима работы распределенные ресурсы и конечная рациональность потребителей – это частная информация конечных пользователей, которая не может быть просочена на рынок. Децентрализованные рыночные модели вполне могут решить эту проблему [9].

Текущие исследования децентрализованных рынков делятся на две категории. Для первого по-прежнему требуется оператор рынка, который не несет ответственности за решение глобальной проблемы. Проблема управления энергопотреблением решается на местном уровне самими потребителями, в то время как оператор рынка несет ответственность только за глобальный баланс электроэнергии и обновление рыночной цены для каждого потребителя. Итеративный процесс решения подзадачи – это про-

цесс достижения консенсуса для достижения рыночного равновесия. Технология декомпозиции защищает конфиденциальность и безопасность пользователей, но вопрос о том, как повысить вычислительную эффективность итеративного процесса, по-прежнему остается открытым.

Другая категория в основном основана на технологии блокчейн, использующей продвинутый механизм консенсуса блокчейна для совершения транзакций в слабо централизованной или даже полностью децентрализованной ситуации. Рынок транзактивной энергии с поддержкой блокчейна имеет преимущество перед автоматическими транзакциями, прозрачной информацией и защищенной конфиденциальностью без операторов рынка [10].

Выводы

Эта статья посвящена обзорам концепции и дизайна рынка транзакционной энергии в интеллектуальных сетях. Экономика совместного использования отвечает требованиям эффективной интеграции распределенных ресурсов и повышения эффективности использования энергии, которые стали важной частью интеллектуальных сетей. Совместное хранение энергии и транзакционная энергия, как приложения экономики совместного использования в интеллектуальных сетях, значительно улучшают работу энергосистем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахмедова, О. О. Интеграция экономики совместно-го использования электроэнергии с интеллектуальными сетями [Электронный ресурс] / О. О. Ахмедова, Т. В. Копейкина, А. Г. Сошинов, О. С. Атрашенко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 1 (139). – 5 с. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.155>. – Режим доступа: URL: <https://research-journal.org/media/articles/9919.pdf>. (дата обращения: 28.02.2024 г.).
2. Internet of Energy: как распределенная энергетика повлияет на безопасность, цены на электричество и экологию [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://medium.com/internet-of-energy/https-medium-com-p-efac1c46b071-efac1c46b071>(дата обращения: 01.03.2024 г.).
3. Асканова, О. В. Ценообразование: учебное пособие [Электронный ресурс] / О. В. Асканова. – Рубцовск, 2020. https://edu.rubinst.ru/resources/books/Askanova_O.V._Tsenoobrazovanie_UP_2020.pdf (дата обращения: 28.02.2024 г.).
4. Группа пользователей – сопоставление тем [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://docs.oracle.com/cd/F18558_01/web-help/Content/obdx_core/usergrpsubmap/

[usersubmap.htm](#)(дата обращения: 02.03.2024 г.).

5. Tesla: бизнес-модель и SWOT-анализ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vc.ru/u/1731897-analiz-biznes-mode-ley/723086-tesla-biznes-model-i-swot-analiz> (дата обращения: 03.03.2024 г.).
6. Метод выделения ядра [Электронный ресурс] <https://marketing.wikireading.ru/4205> (дата обращения: 03.03.2024 г.).
7. Значение Шепли [Электронный ресурс] <https://voxt.ru/znachenie-shepli/>(дата обращения: 04.03.2024 г.).
8. Блокчейн – новые возможности для производителей и потребителей электроэнергии? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://inepsystem.ru/gallery/blockchain_opportunityfor-energy-producers-and-consumers_RUS_1.pdf(дата обращения: 04.03.2024 г.).
9. Дистрибутив – Новая платформа для торговли электроэнергией microgrid [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eitmanufacturing.eu/what-we-do/thought-leadership/signals/distro-a-new-microgrid-electricity-trading-platform/>.
10. Все о применении блокчейна в электроэнергетике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://crypto.ru/blokchejn-v-ehlek-troehnergetike/?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru.

УДК 620.91: 620.92: 621.31

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-31-40

В. Г. Ильичев¹, Р. Г. Джамбеков², А. В. Рыбаков²

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ И УПРАВЛЯЮЩАЯ
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ СИСТЕМА ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ**

¹ Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева

² ООО «Выксунский металлургический завод»

vova201428@yandex.ru, ravil-200@mail.ru, rybakov_alex@mail.ru

Автор, ответственный за переписку:

Владимир Геннадьевич Ильичев, vova201428@yandex.ru

Коэффициент полезного действия фотоэлектрических модулей (ФЭМ) снижается с ростом температуры, поэтому проблема охлаждения фотоэлектрических модулей для жарких регионов является актуальной. Существующие системы охлаждения в основном имеют управление лишь по отклонению температуры модуля от заданного значения, иные метеорологические факторы не учитываются.

В данной работе авторами предложена информационно-измерительная и управляющая система водяным охлаждением фотоэлектрических модулей, в которой управляющие воздействия будут вырабатываться с учетом не только температуры модуля, но и с учетом температуры окружающей среды, скорости ветра, солнечной радиации, тока и напряжения нагрузки.

Разработана структурная схема информационно-измерительной и управляющей энергосберегающей системы охлаждения фотоэлектрических модулей, отражающая состав основных ее компонентов, принципиальная схема системы и алгоритм работы, информационно-измерительная и управляющая энергосберегающая система водяного охлаждения ФЭМ.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, температура фотоэлектрического модуля, коэффициент полезного действия, информационно-измерительная и управляющая система, водяное охлаждение, контроллер, алгоритм, эффективность фотоэлектрических модулей, энергосберегающая система

V. G. Ilichev¹, R. G. Dzhambekov², A. V. Rybakov²

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL ENERGY-SAVING WATER COOLING SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC MODULES

¹ Astrakhan State University named after V. N. Tatishchev

² Vyksa Metallurgical Plant LLC

The efficiency of photovoltaic modules decreases with increasing temperature, so the problem of cooling photovoltaic modules for hot regions is relevant. The existing cooling systems are mainly controlled only by the deviation of the module temperature from the set value, other meteorological factors are not taken into account.

In this paper, the authors propose an information-measuring and control system for water cooling of photovoltaic modules, in which the control effects will be generated taking into account not only the temperature of the module, but also taking into account ambient temperature, wind speed, solar radiation, current and load voltage.

A block diagram of an information-measuring and control energy-saving cooling system for photovoltaic modules has been developed, reflecting the composition of its main components, a schematic diagram of the system and an algorithm for an information-measuring and control energy-saving water cooling system photovoltaic modules.

Keywords: photovoltaic module, temperature of the photovoltaic module, efficiency, information measuring and control system, water cooling, controller, algorithm, efficiency of photovoltaic modules, energy-saving system

Введение

Коэффициент полезного действия фотоэлектрических модулей снижается с ростом температуры, поэтому проблема охлаждения фотоэлектрических модулей для жарких регионов является актуальной [1].

Принято выделять две группы методов охлаждения фотоэлектрических модулей: активное и пассивное охлаждение [2]–[17].

Как для пассивных, так и для активных систем охлаждения обычно используются охлаждающие среды – воздух и вода. Воздушное охлаждение, описанное в работах [3; 5; 7–10], плохо подходит для извлечения тепловой энергии из фотоэлектрического модуля в жарких регионах. Водяное охлаждение, описанное в работах [2; 4; 6; 11–17], позволяет работать при гораздо более высоких температурах и более эффективно использовать рекуперацию отработанного тепла. Следовательно, водяное охлаждение во многих случаях является более выгодным вариантом.

Для автоматизации системы водяного охлаждения фотоэлектрических модулей используются различные подходы. Один из наиболее простых способов – это использование контроллера для управления работой насоса и других компонентов системы на основе данных о температуре ФЭМ. Контроллер подключен к датчикам температуры, которые передают информацию о температуре модулей в реальном времени. На основе этой информации контроллер автоматически производит включение и отключение подачи охлаждающей жидкости, чтобы обеспечить оптимальное охлаждение и повысить эффективность фотоэлектрических модулей.

Согласно алгоритму, предложенному в работе [19], температура датчика, установленного на ФЭМ сравнивается с установленной (заданной) температурой. Если температура датчика больше установленной (заданной) температуры, контроллер подает управляющие сигналы на схему управления двигателя насоса с заданным значением времени. Система управления и схема, описанная в работе [19], показали свою достаточную эффективность. Однако стоит отметить, что управление в этой системе идет лишь по отклонению температуры модуля от заданного значения, иные метеорологические факторы не учитываются.

Анализ представленных работ показывает, что тренд на внедрение систем охлаждения фотоэлектрических модулей постепенно развивается. При разработке системы автоматизированного охлаждения ФЭМ необходимо учитывать ряд переменчивых погодных факторов, а именно: солнечную радиацию, облачность, пыль, ветер, давление, температуру и влажность окружающей среды. Более того, на наш взгляд, при проектировании систем охлаждения фотоэлектрических модулей надо также принимать во внимание изменение температуры солнечной ячейки в зависимости от тока нагрузки. Согласно исследованиям, проведенным авторами настоящей статьи [20], при подключении к фотоэлектрическому модулю нагрузки, соответствующей точке максимальной мощности, в дневное время суток наблюдалось возрастание температуры тыльной стороны модуля на 10 градусов.

В настоящем исследовании была поставлена задача разработки автоматизированной системы водяного охлаждения ФЭМ, в которой

управляющие воздействия будут вырабатываться с учетом не только температуры модуля, но и с учетом температуры окружающей среды, скорости ветра, солнечной радиации, тока нагрузки, напряжения. Разработка автоматизированной системы водяного охлаждения начинается с выбора датчиков тока, напряжения, температуры, скорости ветра, солнечной радиации.

Структурная схема информационно-измерительной и управляющей энергосберегающей системы водяного охлаждения ФЭМ

В настоящей статье разработана информационно-измерительная и управляющая энергосберегающая система водяного охлаждения ФЭМ, в которой управляющие воздействия вы-

рабатываются не только с учетом температуры модуля, но и с учетом температуры окружающей среды, скорости ветра, солнечной радиации, тока нагрузки, напряжения.

Структурная схема информационно-измерительной и управляющей энергосберегающей системы охлаждения фотоэлектрических модулей отражает состав основных компонентов: фотоэлектрический модуль, электрическая нагрузка, датчики электрических величин (тока и напряжения нагрузки), датчики показателей внешней окружающей среды (температура окружающей среды, скорость ветра, солнечная радиация), датчик температуры тыльной стороны ФЭМ, контроллер и насос для подачи хладагента (рис. 1).

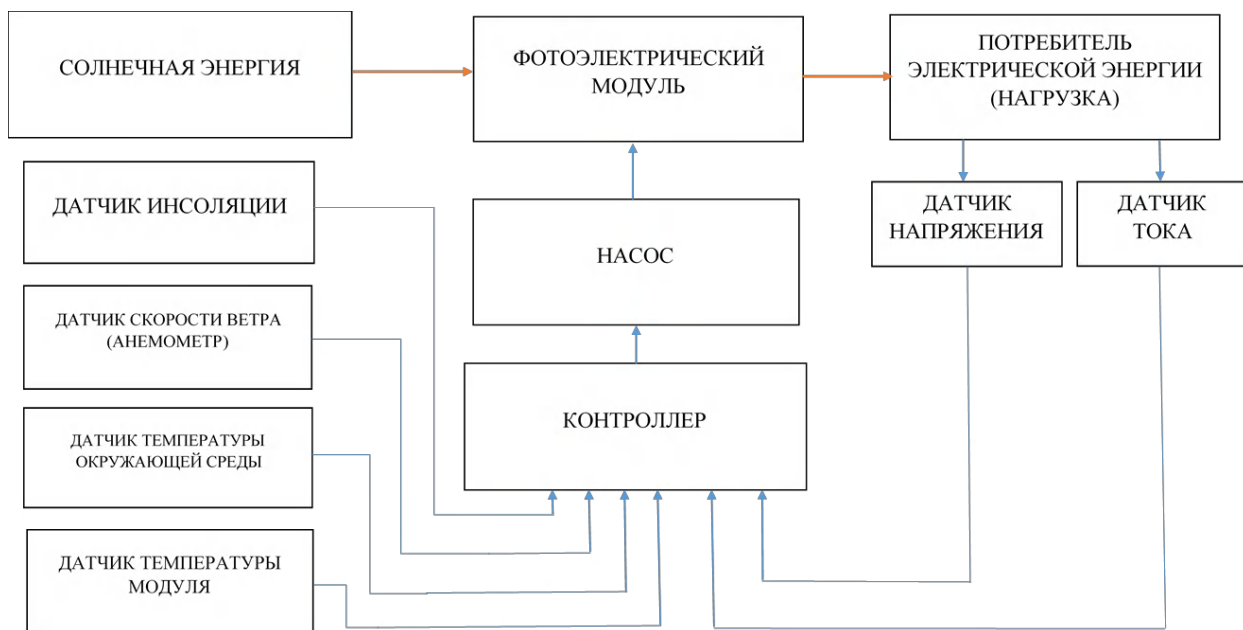


Рис. 1. Структурная схема информационно-измерительной и управляющей энергосберегающей системы охлаждения фотоэлектрических модулей

Принципиальная схема информационно-измерительной и управляющей энергосберегающей системы охлаждения фотоэлектрических модулей

Разработана принципиальная схема информационно-измерительной и управляющей энергосберегающей системы охлаждения фотоэлектрических модулей (рис. 2).

Состав схемы:

PV – фотоэлектрический модуль;

R – электрическая нагрузка;

A_1 – датчик тока;

V_1 – датчик напряжения;

dt_1 – датчик температуры модуля;

dt_2 – датчик температуры окружающей среды;

Q_1 – датчик скорости ветра;

Q_2 – датчик солнечной радиации;

C_1 – контроллер;

M_1 – насос;

k_1 – реле;

X_1 – шинная линия.

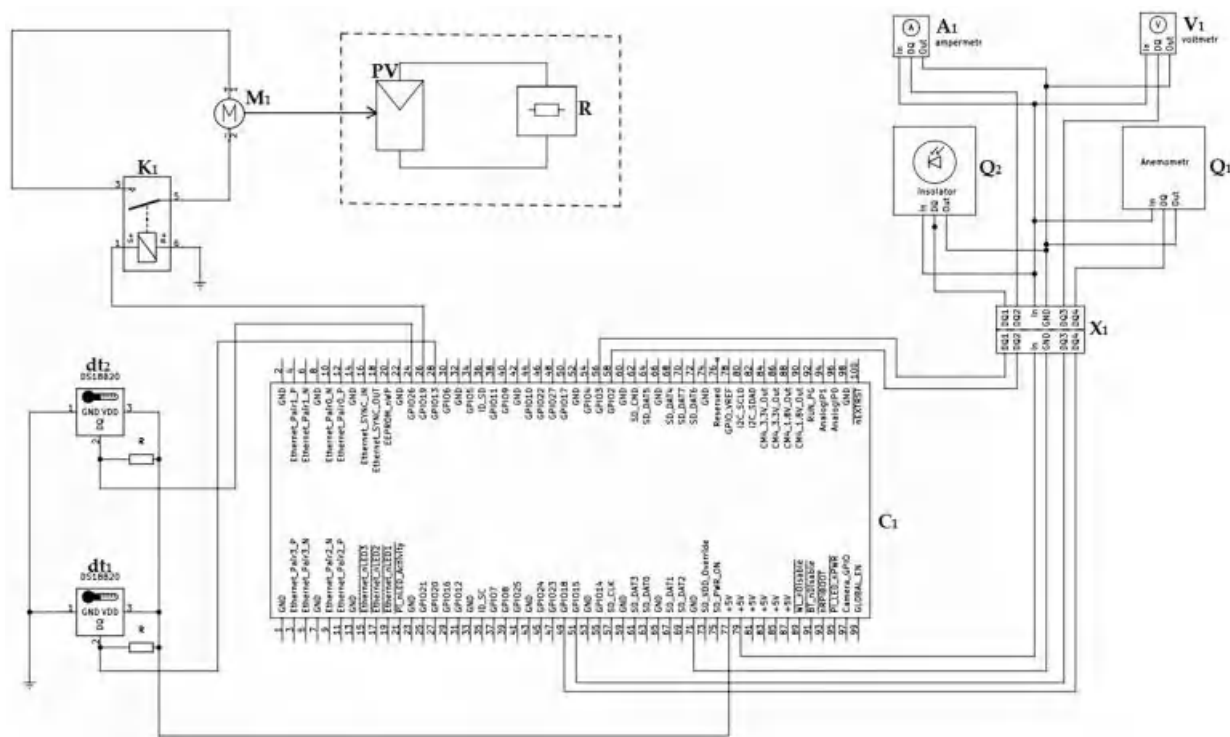


Рис. 2. Принципиальная схема автоматизированной системы водяного охлаждения фотоэлектрических модулей

Алгоритм работы информационно-измерительной и управляющей энергосберегающей системы охлаждения фотоэлектрических модулей

Разработка алгоритма работы информационно-измерительной и управляющей энергосберегающей системы охлаждения фотоэлектрических модулей требует учета различных условий и параметров, таких как температура окружающей среды, температура модулей, интенсивность солнечного излучения, ток нагрузки, напряжение, скорость ветра. Вот общие шаги для разработки такого алгоритма:

1. Сбор данных: Система должна собирать данные с датчиков интенсивности солнечного излучения, температуры модулей, температуры окружающей среды, скорости ветра, напряжения и тока нагрузки.

2. Анализ данных: Проведение анализа собранных данных, чтобы определить текущие условия эксплуатации и потребность в охлаждении модулей.

3. Принятие решений: На основе анализа данных система должна принимать решения о регулировании работы охладителей.

4. Управление охлаждением: Система должна эффективно управлять активными охладителями в зависимости от текущих условий и потребностей в охлаждении.

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма работы информационно-измерительной и управляющей энергосберегающей системы охлаждения фотоэлектрических модулей на примере модуля «Pramac 125».

В блок-схеме использованы следующие обозначения:

U_{xx} – напряжение холостого хода, В;

$I_{кз}$ – ток короткого замыкания, А;

I_{MPP} – ток в точке максимальной мощности, А;

U_{MPP} – напряжение в точке максимальной мощности, В;

$T_{мод}$ – температура тыльной стороны фотоэлектрического модуля, °С;

$T_{зад}$ – заданная температура модуля, °С;

$T_{гран}$ – граничная температура модуля «Pramac-125»;

V – скорость ветра, м/с;

$V_{зад}$ – заданная скорость ветра, м/с.

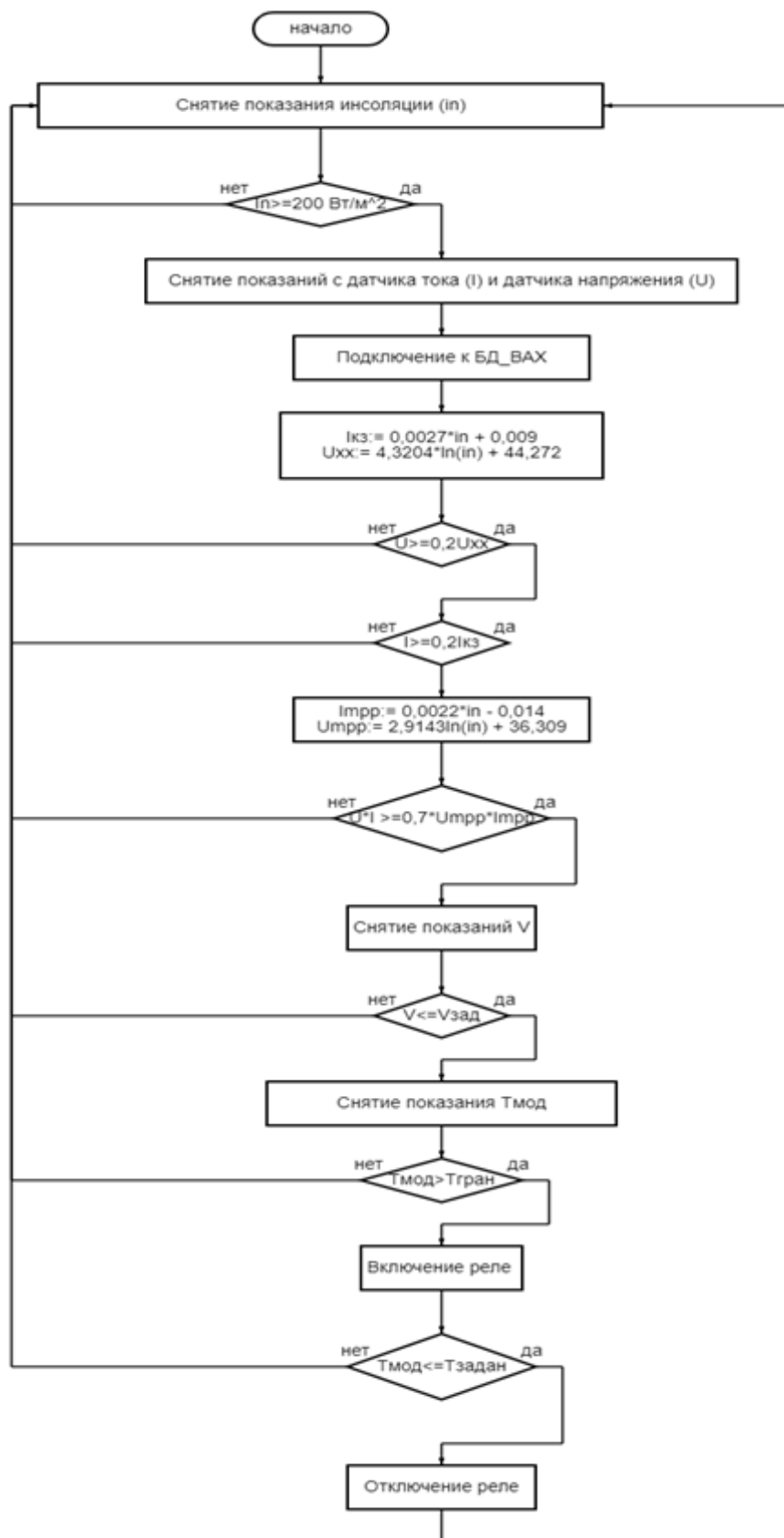


Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы информационно-измерительной и управляющей энергосберегающей системы охлаждения ФЭМ на примере модуля «Primas 125»

В начале алгоритма происходит снятие показаний с датчика солнечной радиации. Если солнечная радиация принимает значение менее 200 Вт/м^2 , охлаждение фотоэлектрического модуля производить нерационально, так как выработки, получаемой от фотоэлектрического

модуля, либо нет, либо она минимальна. Паспортные данные вольтамперных характеристик фотоэлектрического модуля «Pramac 125» при солнечных радиациях ($200\text{--}1000 \text{ Вт/м}^2$) приведены в таблице.

Паспортные данные вольт-амперных характеристик фотоэлектрического модуля «Pramac 125» при солнечных радиациях ($200\text{--}1000 \text{ Вт/м}^2$)

$I_n, \text{ Вт/м}^2$	$T_{\text{мод}}, ^\circ\text{C}$	$I_{\text{МРР}}, \text{ А}$	$U_{\text{МРР}}, \text{ В}$	$I_{\text{кз}}, \text{ А}$	$U_{\text{хх}}, \text{ В}$
1000	25	2,21	56,6	2,71	74,1
800	25	1,79	55,5	2,19	73
600	25	1,3	55	1,61	72,1
400	25	0,89	53,9	1,1	70,2
200	25	0,43	51,7	0,55	67,1

Допустим, величина солнечной радиации в текущий момент равна 1000 Вт/м^2 , тогда мы работаем с массивом данных вольт-амперной характеристики $I_n = 1000 \text{ Вт/м}^2$, взятой из паспортных данных модуля.

Далее происходит снятие показаний с датчика тока I и датчика напряжения U .

Если измеренное напряжение U находится в диапазоне $U \geq 0,2 \cdot U_{\text{хх}}$, в нашем случае для солнечной радиации $I_n = 1000 \text{ Вт/м}^2$ напряжение холостого хода $U_{\text{хх}} = 74,1 \text{ В}$, то

$$U \geq 0,2 \cdot 74,1 = 14,82.$$

Переходим к снятию значений силы тока.

Если измеренное значение силы тока находится в диапазоне $I \geq 0,2 \cdot I_{\text{кз}}$, в нашем случае для солнечной радиации $I_n = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ток короткого замыкания $I_{\text{кз}} = 2,71 \text{ А}$, то

$$I \geq 0,2 \cdot 2,71 = 0,542.$$

Получаем рабочую область для дальнейшей работы с модулем (на ВАХ для 1000 Вт/м^2 выделена фоном) (рис. 4).

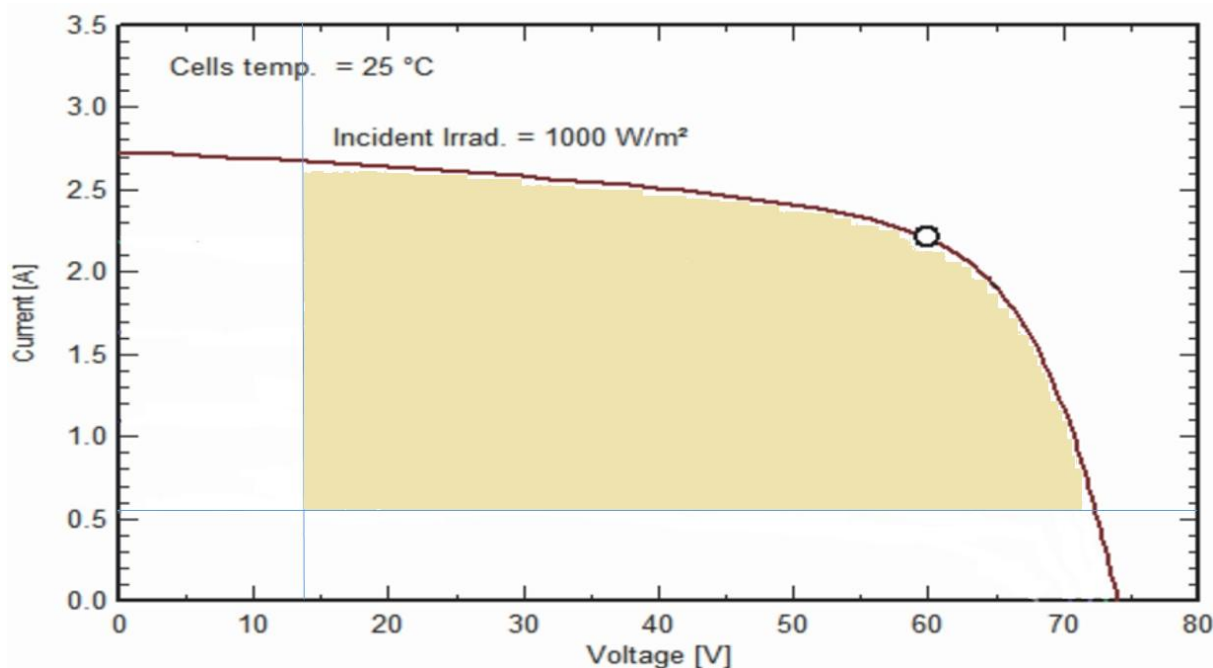


Рис. 4. Рабочая область вольт-амперной характеристики ФЭМ «Pramac-125», при солнечной радиации $I_n = 1000 \text{ Вт/м}^2$

Следующим шагом осуществляется ввод силы тока в точке максимальной мощности (I_{MPP}) и напряжения в точке максимальной мощности (U_{MPP}), соответствующей ВАХ (Для ВАХ при 1000 Вт/м^2 $I_{MPP} = 2,21 \text{ А}$, $U_{MPP} = 56,6 \text{ В}$).

Далее происходит сравнение произведения снятых ранее напряжения U и силы тока I и произведения введенных силы тока в точке максимальной мощности (I_{MPP}) и напряжения в точке максимальной мощности (U_{MPP}) соответствующей ВАХ.

Если произведение снятых значений напряжения и тока принимает значение:

$$U \cdot I \geq 0,7 \cdot I_{MPP} \cdot U_{MPP}$$

В нашем случае для солнечной радиации $I_n = 1000 \text{ Вт/м}^2$:

$$U \cdot I \geq 0,7 (2,21 \cdot 56,6) = 87,56$$

Тогда переходим к снятию показаний датчика ветра V . Ветер является естественным теплоотводом для фотоэлектрических модулей, поэтому при высокой скорости ветра водяное охлаждение будет излишним. Кроме того, ветер может привести к частичному разбрызгиванию воды помимо поверхности ФЭМ.

Если скорость ветра меньше заданной скорости $V \leq V_{\text{зад}}$, тогда переходим к снятию показаний с датчика температуры тыльной стороны модуля.

Если температура модуля превышает значения 45°C (Ранее нами на основании изучения литературы и проведения ряда экспериментов было принято считать температуру фотоэлектрического модуля «Pramac-125», равную 45°C граничной для целей охлаждения), $T_{\text{мод}} > 45$, тогда происходит включение реле для подачи охлаждающей жидкости. Отключение реле происходит после того, как температура модуля становится меньше заданной температуры (рационально принимать не ниже температуры окружающей среды):

$$T_{\text{мод}} \leq T_{\text{зад}}$$

Затем цикл повторяется.

Если текущее значение солнечной инсоляции принимает некоторые промежуточные значения, отличающиеся от значений, приведенных в таблице, тогда соответствующие значения: U_{xx} , I_{kz} , U_{MPP} , I_{MPP} следует брать из приведенных ниже графиков

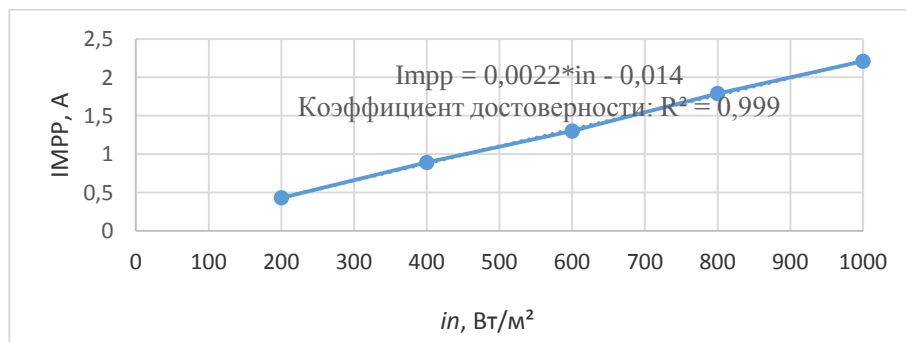


Рис. 5. Зависимость силы тока в точке максимальной мощности от солнечной радиации для фотоэлектрического модуля «Pramac 125»

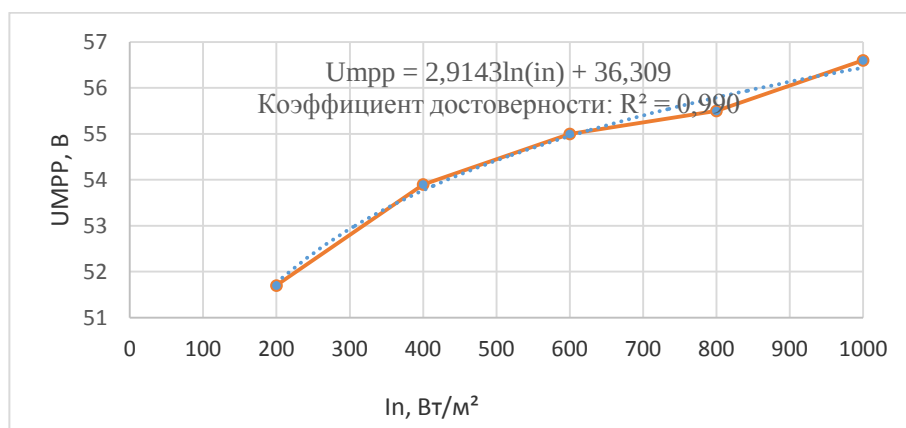


Рис. 6. Зависимость напряжения в точке максимальной мощности от солнечной радиации для фотоэлектрического модуля «Pramac 125»

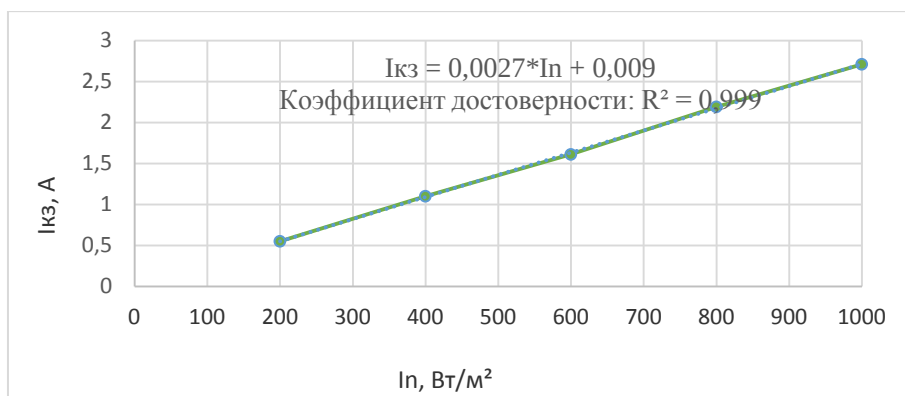


Рис. 7. Зависимость тока короткого замыкания от солнечной радиации для фотоэлектрического модуля «Primas 125»

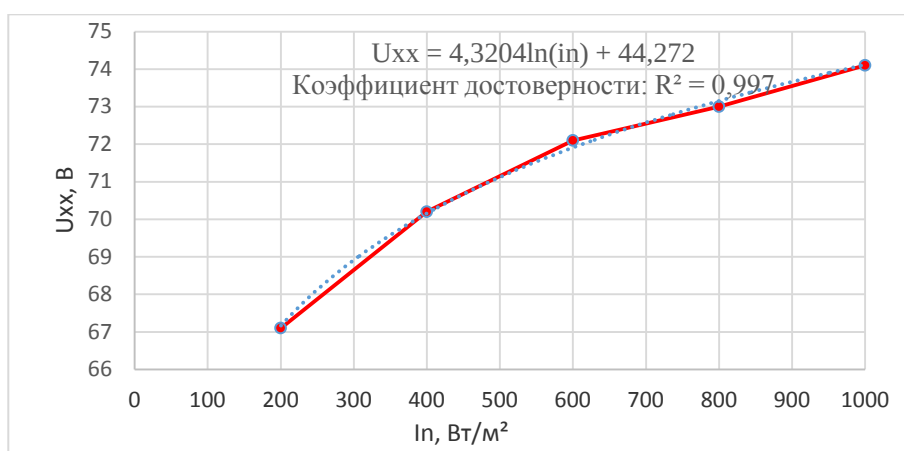


Рис. 8. Зависимость напряжения холостого хода от солнечной радиации для фотоэлектрического модуля «Primas 125»

Заключение

Выявлено, что на сегодняшний момент существуют пассивные и активные системы охлаждения ФЭМ. Однако известные системы зачастую являются системами с ручным управлением, а также учитывают лишь малую часть метеорологических факторов, влияющих на снижение выработки ФЭМ.

В связи с этим в данной работе авторами впервые предложена информационно-измерительная и управляющая энергосберегающая система водяного охлаждения ФЭМ, в которой управляющие воздействия вырабатываются не только с учетом температуры модуля, но и с учетом температуры окружающей среды, скорости ветра, солнечной радиации, тока нагрузки, напряжения.

Представлены структурная и принципиальные схемы. Разработан алгоритм работы информационно-измерительной и управляющей энергосберегающей системы охлаждения фотоэлектрических модулей.

Разработанная информационно-измерительная и управляющая система водяного охлаждения ФЭМ имеет следующие преимущества.

Адаптивность к изменяющимся условиям: система способна адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды и потребностям нагрузки модулей, регулируя работу охлаждения в реальном времени.

Безопасность: обеспечивается безопасность работы модулей, предотвращается перегрев модулей за счет своевременного включения охлаждения.

Энергосбережение: затраты энергии на охлаждение уменьшены за счет исключения работы охладителей при холостом ходе и малых нагрузках ФЭМ.

В климатических условиях юга России водяное охлаждение фотоэлектрических модулей вполне эффективно и может обеспечивать существенное повышение выходной мощности (порядка 15–20 %). Соответственно, для солнечных электростанций средней и большой

мощности, эксплуатирующихся в климатических условиях юга России, использование водяного охлаждения становится целесообразным и может дать существенное приращение абсолютных значений выработки электроэнергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Bijjargi, Y. S. Kale S. S., Shaikh K. A.* Cooling techniques for photovoltaic module for improving its conversion efficiency: a review. July–Aug 2016. – Volume 7. – Issue 4. – Pp. 22–28. Article ID: IJMET_07_04_003. Available online at – <http://iaeme.com/Home/issue/IJMET?Volume=7&Issue=4>.
2. *Mehrotra, S. Rawat P., Debbarma M., Sudhakar K.* Performance of a solar panel with water immersion cooling technique // *International Journal of Science, Environment ISSN 2278-3687 (O) and Technology.* – 2014. – Vol. 3. – № 3. – Pp. 1161–1172. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.155>.
3. *Gotmare, J. A. Borkar D. S., Hatwar P. R.* Experimental Investigation of PV Panel with Fin Cooling Under Natural Convection // *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science.* Volume No.03, Special Issue No. 02, February 2015. <https://www.semanticscholar.org/paper/EXPERIMENTAL-INVESTIGATION-OF-PV-PANEL-WITH-FIN-Gotmare-Borkar/9ee5360c79cd9274d077dcdc54712>.
4. *Chandrasekar, M., Senthilkumar T.* Passive thermal regulation of flat PV modules by coupling the mechanisms of evaporative and fin cooling / *Heat Mass Tran.*, 52 (7) (2016). – Pp. 1381–1391 T. Nehari, M. Benlakam, D. Nehari, 60 (2016). DOI: 10.1007/s00231-015-1661-9. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84939423942&origin=inward-&txGid=4aaa913434016c39a0c44b6d49184af2>.
5. *Nehari, Taieb, Benlakam Mohamed, Nehari Driss* Effect of the Fins Length for the Passive Cooling of the Photovoltaic Panels // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering.* 60(2). – Pp. 89–95, 2016 <https://doi.org/10.3311/PPme.8571>.
6. *Patil, M. Sidramappa A., Angadi R.,* Experimental Investigation of Enhancing the Energy Conversion Efficiency of Solar PV Cell by Water Cooling Mechanism // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2018. – Vol. 376. – P. 14. DOI 10.1088/1757-899X/376/1/012014. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/376/1/012014/meta>. DOI 10.1088/1757-899X/376/1/012014.
7. *Ibtisam Ahmed Hasan, Iman Saleh Kareem, Duha Adil Attar.* Effect of Evaporative Cooling Combined with Heat Sink on PV Module Performance / *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences / Electro mechanical Engineering Department University of Technology Baghdad, Iraq.* – Vol. (27), No. (2): 2019. – Pp. 252–254. DOI:10.13140/RG.2.2.23413.42728 https://www.researchgate.net/publication/33367591_Effect_of_Evaporative_Cooling_Combined_with_Heat_Sink_on_PV_Module_Performance.
8. *Krutika Bansod, Mayuri Garmale, Pooja O. Tiwari, Snehal Dhore, Rupesh Sangrame.* Thermoelectric Effect Based Temperature Controlled Photovoltaic System / 4th National Conference on Advances in Engineering and Applied Science Organized by : Anjuman College of Engineering and Technology (ACET) Nagpur, Maharashtra, India, In association with International Journal of Scientific Research in Science and Technology / Electrical Department, GHRIET, Nagpur, Maharashtra, India, 2020 IJSRST | Volume 5 | Issue 7 | Print ISSN : 2395-6011 | Online ISSN: 2395-602X, pp. 154–161. <https://www.ijrst.com/IJSRST205737>.
9. *Farhana, Z. Irwan Y. M., Azimmi R. M. N., Razliana A. R. N., Gomesh N.,* Experimental investigation of photovoltaic modules cooling system // 2012 IEEE Symposium on Computers & Informatics (ISCI). IEEE, (2012) DOI: 10.1109/ISCI.2012.6222687 <https://ieeexplore.ieee.org/document/6222687>.
10. *Ameri M., Mahmoudabadi M. M., Shahsavari A.,* An Experimental Study on a Photovoltaic/Thermal (PV/T) Air Collector with Direct Coupling of Fans and Panels // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 34(10):929-947 (2012). DOI:10.1080/15567031003735238. https://www.researchgate.net/publication/254304160_An_Experimental_Study_on_a_PhotovoltaicThermal_PVT_Air_Collector_with_Direct_Coupling_of_Fans_and_Panels.
11. *Bahaidarah H., Subhan A., Gandhidasan P., Rehman S.,* Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions // *Energy.* Volume 59, 15 September 2013, Pages 445-453 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.050>.
12. *Nizetic S., Coko D., Yadav A., Grubišić-Cabo F.,* Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response // *Energy Conversion and Management* 108:287-296, January 2016. DOI:10.1016/j.enconman.2015.10.079. https://www.researchgate.net/publication/284355729_Water_spray_cooling_technique_applied_on_a_photovoltaic_panel_The_performance_response.
13. *Abu Syed Keron, Abu Bakkar Sikder, Sama-E-Shan, Dil Afroz Zerin and Dr. Bodius Salam.* Fabrication and Experimental Analysis of Solar Panel Water Cooling System / *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy 2017 (ICMERE2017)* 18–20 December, 2017, Chittagong, Bangladesh. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.043>.
14. *Abdul Quddus, Faizullah Khan, Fazal Muhammad, Muhammad Waleed Raza, Surat Khan, Imran Qureshi.* Performance Evaluation and Enhancement of Solar PV Panels / *International Journal of Scientific & Engineering Research* Volume 9, Issue 2, February-2018. <https://www.researchgate.net/publication/374087371>.
15. *B. A. Supian, C. Ekaputri and W. Priharti.* Increasing the output power of solar panel by using cooling system / *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 830 (2020) 032039 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/830/3/032039. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/830/3/032039>.
16. *Vicky Andria Kusuma, Happy Aprilia, Sena Sukmananda Suprpto, Muhammad Nizhom Ramadhani, Aji Akbar Firdaus, Dimas Fajar Uman Putra.* Analysis of the effect of a microcontroller-based solar panel cooling system on temperature and power output / *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)* Vol. 12, No. 2, June 2023, pp. 119-125 ISSN: 2252-8792, DOI: 10.11591/ijape.v12.i2. <https://www.researchgate.net/publication/370944048>.
17. *Gatot Setyono, Navik Kholili, Yanuariza Rakhmadanu.* The Impact of Utilization The Solar-Panels With a Cooling-Water System as a Source of Micro-Power Generation / *Jurnal Infotekmesin* Vol.13, No.01, pp.87-92. Januari 2022 p-ISSN: 2087-1627, e-ISSN: 2685-9858 DOI: 10.35970/infotekmesin.v13i1.1001, <https://www.researchgate.net/publication/358423652>.
18. *Benato A., Stoppato, A.* An Experimental Investigation of a Novel Low-Cost Photovoltaic Panel Active Cooling System. *Energies.* 2019;12(8):1448. <https://doi.org/10.3390/en12081448>.

19. Л. В. Тханг, А. В. Шагин, Н. С. Кыонг, Т. Х. Нгуен. Построение и моделирование контроллера системы водяного охлаждения для фотоэлектрических модулей: Некоторые первые результаты // *European Journal of Renewable Energy*. – 2019. – Т. 1, № 4. – С. 3–11. – DOI 10.13187/ejre.2019.1.3. – EDN OOXZLY.

20. Зайнутдинова, Л. Х., Ильичев В. Г., Джамбеков Р. Г.

Экспериментальное исследование нагрева фотоэлектрического модуля Прамас-125. Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики: сборник трудов российской конференции, 21-23 ноября 2022 г., Санкт-Петербург. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022 С. 99–100. ISBN 978-5-7422-7926-6. – Режим доступа: <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id22-248>.

УДК 004.94

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-40-45

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

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ В СРЕДЕ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ SIMINTECH

Ставропольский государственный аграрный университет

vorotn_in@mail.ru, stas.mishukov.92@mail.ru, mma_26@inbox.ru

shaliko69@mail.ru, nata.stavitzkaja@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Станислав Вадимович Мишуков, stas.mishukov.92@mail.ru

Моделирование является важнейшей процедурой научно-исследовательского познания сложных технических объектов, не требующее серьезных затрат времени, трудовых ресурсов и денежных средств на изготовление опытных моделей. Творческий процесс моделирования позволяет разнопрофильным специалистам выполнять сложные исследования и устранять неточности в конструкторской, технологической, нормативной и другой документации, что значительно упрощает создание новых и модернизацию известных технических решений в различных областях жизни человека. В частности, подобным средством моделирования является программная среда Simulation In Technic (SimInTech), раскрывающая достижения отечественных ученых в автоматизации, энергетике, теплотехнике, авиации и предоставляющая неограниченные возможности для исследований в указанных и других направлениях науки и техники. В рамках настоящей статьи рассматривается прикладная задача определения параметров многоэлементных двухполюсников, представляющих из себя четырехэлементную схему замещения емкостных измерительных преобразователей, применяемых для оценки влажности сельскохозяйственных культур. Для реализации алгоритма определения в среде модельно-ориентированного проектирования SimInTech была разработана и исследована модель операционного усилителя, которая отсутствовала в стандартных библиотеках среды. На основе вышеизложенного целью данной научной статьи является проверка работоспособности построенной модели операционного усилителя и подбор необходимых значений основных характеристик – коэффициента усиления и постоянной времени интегрирования. При этом были выполнены исследования влияния значений указанных характеристик на отклонение выходного напряжения от теоретического экспоненциального процесса в диапазоне от 10 до 10^5 для коэффициента усиления и от 0,1 до 9,0 с для постоянной времени интегрирования, что позволило установить оптимальные значения и оценить максимальную относительную погрешность в динамике.

Ключевые слова: моделирование, операционный усилитель, измерительная схема, емкостной преобразователь, двухполюсник, апериодическое звено

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

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF OPERATIONAL AMPLIFIER MODEL IN SIMINTECH MODEL-BASED DESIGN ENVIRONMENT

Stavropol State Agrarian University

Modeling is the most important procedure for the scientific and research knowledge of complex technical objects, which does not require serious expenditure of time, labor and money for the production of experimental models. The creative modeling process allows diverse specialists to perform complex research and eliminate inaccuracies in design, technological, regulatory and other documentation, which greatly simplifies the creation of new and modernization of well-known technical solutions in various areas of human life. In particular, a similar modeling tool is the Simulation In Technic (SimInTech) software environment, which reveals the achievements of Russian scientists in automation, energy, thermal engineering, aviation and provides unlimited opportunities for research in these and other areas of science and technology. In the framework of this article, the applied problem of determining the parameters of multi-element bipolar circuits, which are a four-element replacement circuit of capacitive measuring transducers used to assess the moisture content of crops, is considered. To implement the detection algorithm in the SimInTech model-oriented design environment, an operational amplifier model was developed and investigated,

which was not available in the standard libraries of the environment. Based on the above, the purpose of this scientific article is to check the operability of the built operational amplifier model and select the necessary values of the main characteristics – the gain factor and the integration time constant. At the same time, studies were carried out on the effect of the values of these characteristics on the deviation of the output voltage from the theoretical exponential process in the range from 10 to 10^5 for the gain factor and from 0.1 to 9.0 s for the integration time constant, which made it possible to establish optimal values and estimate the maximum relative error in dynamics.

Keywords: modeling, operational amplifier, measuring circuit, capacitive converter, bipolar, aperiodic link

Разработка и проектирование сложных технических систем, приборов и объектов связана с необходимостью их предварительного моделирования в различных специализированных средах, что позволяет выполнить ряд исследований и выявить значительное количество ошибок, не прибегая к изготовлению опытных образцов, экспериментальных моделей и прототипов, на которые затрачиваются трудовые ресурсы, время и денежные средства. На сегодняшний день существуют сотни различных программных сред для моделирования – Mathcad, Simulink, Micro-Cap, Proteus, Electronics Workbench, Matlab, PSpice и другие, однако выбор подходящего программного обеспечения для конкретных задач остается открытым, поскольку не существует универсального инструмента, полностью удовлетворяющего требованиям разнопрофильных специалистов [1–2].

На решение данной проблемы направлено отечественное программное обеспечение Simulation In Technic (SimInTech), представляющее из себя комплексную среду моделирования в реальном времени с возможностью детального исследования энергетических, атомных, нефтегазовых и других технических объектов, реализованных в одном взаимосвязанном проекте, объединяющем переменные сигналы физического, математического, электрического или иного рода. Такое ПО предоставляет профильным специалистам неограниченное количество областей применения и формирует новый подход к моделированию в виде универсальной и доступной среды со всеми необходимыми инструментами и библиотеками, которые постоянно улучшаются и обновляются производителем при непосредственном участии ведущих научных коллективов страны [3–4].

Нестандартной областью применения среды SimInTech является построение измерительных цепей (ИЦ) и исследование протекающих в них переходных процессов. В качестве примера рассмотрим частную прикладную задачу определения параметров многоэлементных двухполюсников, представляющих из себя четырехэлементную схему замещения емкостных изме-

рительных преобразователей (ЕИП) (рис. 1), которые используются при определении электрофизических свойств различных продуктов [5].

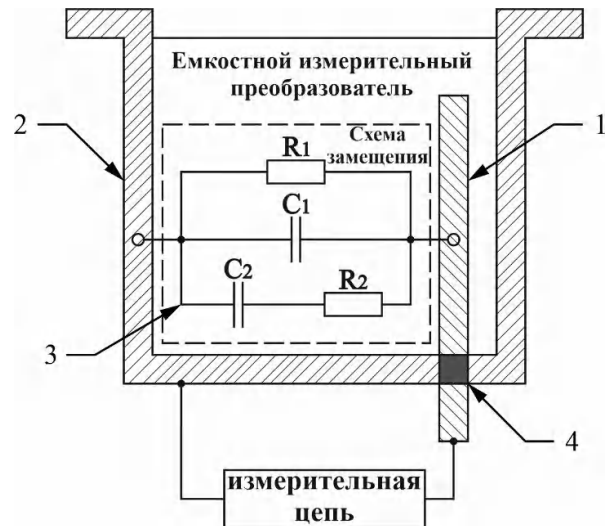


Рис. 1. Емкостной измерительный преобразователь и его схема замещения:

1 – внутренний электрод (стержневой); 2 – внешний электрод (контейнер); 3 – схема замещения; 4 – диэлектрическая вставка

Одним из способов реализации алгоритма определения RC -параметров двухполюсной схемы замещения является применение в измерительной цепи операционного усилителя (ОУ), модель которого отсутствует в стандартных библиотеках среды SimInTech, в связи с чем требуется ее разработка и исследование (рис. 2). Исходя из частотных характеристик универсальных ОУ, наиболее оптимальное решение построения модели заключается в использовании блока 1 «Аналитическая аперидика 1-го порядка» (АА), обеспечивающего вычисление выходного сигнала в дискретные моменты времени на каждом шаге интегрирования. Для реализации инверсного и прямого входов усилителя применено сравнивающее устройство (СУ) 2, выполняющее поэлементное вычитание одного входного векторного сигнала из другого. При этом сопротивление на входах модели «in –» и «in +» создается резисторами R_1 и R_2 , что позволяет приблизить характеристики ОУ к идеальным, то есть реализовать бесконечно большое сопротивление $R_{ex} \rightarrow \infty$.

Использование вольтметров 3–4 в предлагаемой модели обосновано необходимостью преобразования электрического сигнала в математический, что позволяет обеспечить стабильность и независимость работы блоков СУ и АА.

В свою очередь, математический сигнал на выходе блока 1 преобразуется в электрический с помощью блока 5, представляющего из себя источник напряжения (ИН), вход которого управляется функцией напряжения.

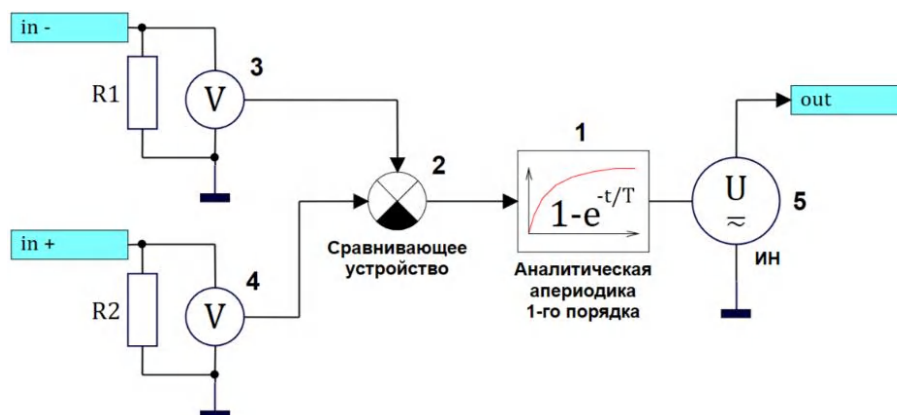


Рис. 2. Модель операционного усилителя в среде SimInTech:

1 – аналитическая апериодика; 2 – сравнивающее устройство; 3–4 – вольтметры; 5 – источник напряжения

В качестве основных характеристик ОУ рассматривались коэффициент усиления K и постоянная времени интегрирования τ , на основе которых выполнялся анализ изменения выходного напряжения $U_{\text{вых}}(t)$, изменяющегося в рамках поставленной прикладной задачи по экспоненциальному закону переходного процесса [6]:

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{U_0 C_1}{C_0} + \frac{U_0}{R_1 C_0} t + \frac{U_0 C_2}{C_0} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} \right),$$

где U_0 – напряжение на входе СЗ, В; C_0 – опорная емкость, пФ; R_1 , R_2 – сопротивления СЗ, кОм; C_1 , C_2 – емкостные элементы СЗ, пФ.

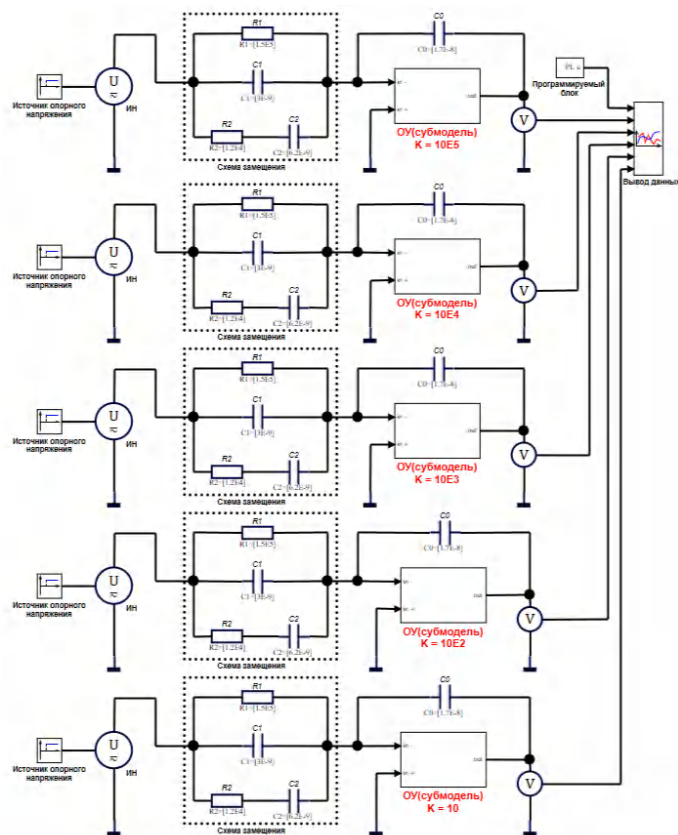


Рис. 3. Измерительная цепь для определения влияния коэффициента усиления K на модель ОУ

Для выполнения исследований в среде SimInTech построена отдельная ИЦ (рис. 3), включающая следующие компоненты:

- блок «Ступенька», выполняющий функцию источника опорного сигнала (ИОН) и формирующий математический сигнал установленной величины $U_0 = 5 \text{ В}$;
- блок «Источник напряжения» (ИН), генерирующий электрический сигнал напряжения в зависимости от установленного математического сигнала предыдущего блока;
- схему замещения в виде RC -цепи, состоящую из блоков резисторов R_1 – R_2 и конденсаторов C_1 – C_2 с произвольно заданными значениями сопротивления и емкости;
- исследуемую модель ОУ, объединенную в отдельный блок «Субмодель» с помощью библиотеки «Субструктуры», которая позволяет упростить конечный проект от большого количества блоков;
- опорный конденсатор C_0 , обеспечивающий обратную отрицательную связь ОУ;
- блок «Вольтметр идеальный», преобразующий электрический сигнал в математический, что необходимо для представления результатов исследований в графическом виде;

• блок «Временной график», обеспечивающий построение диаграмм изменения напряжения в графической форме;

• блок «Язык программирования», который выполняет построение идеальной расчетной кривой в соответствии с экспоненциальным законом по формуле.

Определение влияния коэффициента усиления K на выходное напряжение $U_{\text{вых}}(t)$ модели ОУ выполнялось в диапазоне от 10 до 10^5 , при этом для каждого значения строились соответствующие графики, которые сравнивались с расчетным экспоненциальным процессом (рис. 4). В результате моделирования установлено, что при уменьшении коэффициента усиления форма экспоненциальной кривой переходного процесса значительно искажается и стремится к линейному характеру при малых значениях, о чем свидетельствует отклонение выходного напряжения от расчетного графика в диапазоне от $0,45$ до $2,5 \text{ В}$. Предпочтительным значением коэффициента усиления K для построенной модели ОУ является 10^5 , что подтверждается совпадением графика с расчетной экспоненциальной кривой [7].

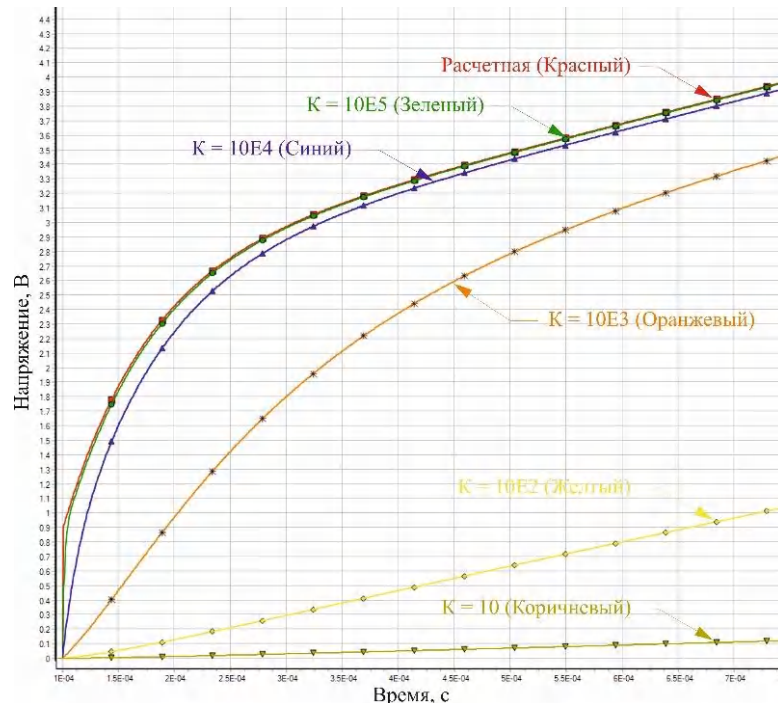


Рис. 4. Графические зависимости при изменении коэффициента усиления K

Для подтверждения сделанных выводов в измерительную цепь были добавлены пять СУ (рис. 5), что позволило реализовать пошаговое вычитание сигналов в модели ОУ при разных

значениях коэффициента усиления K от расчетной экспоненциальной кривой, являющейся эталонной функцией выходного напряжения реального ОУ.

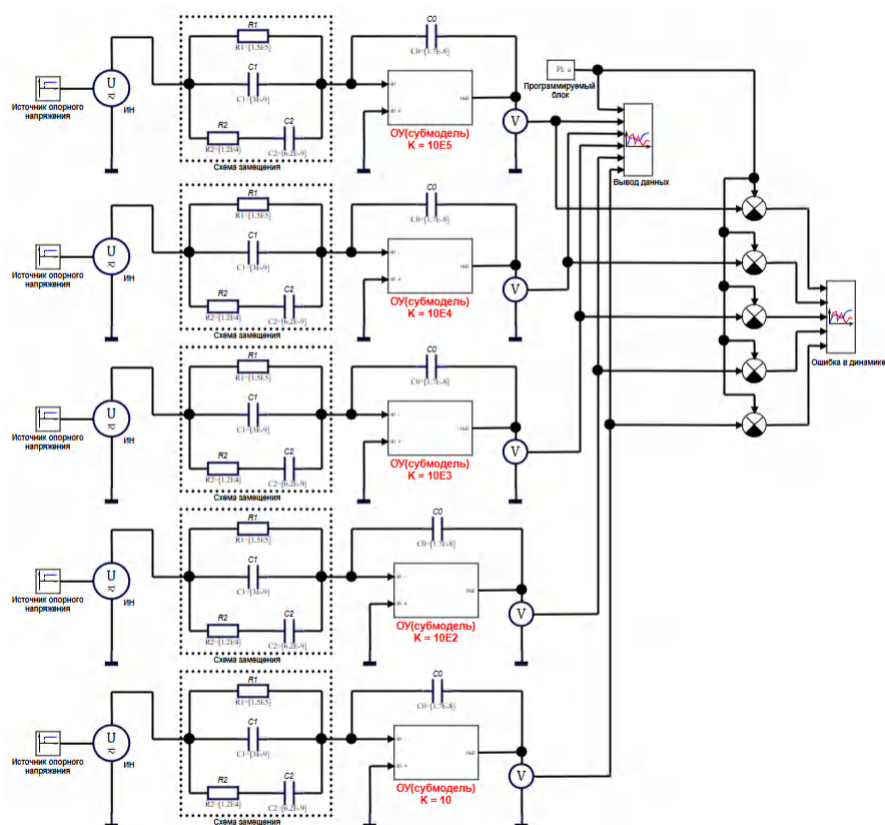


Рис. 5. Измерительная цепь для определения динамики отклонения выходного напряжения модели ОУ

В результате были получены кривые отклонения выходного напряжения $U_{\text{вых}}(t)$ (рис. 6), показывающие величину ошибки в течение заданного времени, что в свою очередь позволяет

определить максимальную относительную погрешность при изменении коэффициента усиления (см. таблицу).

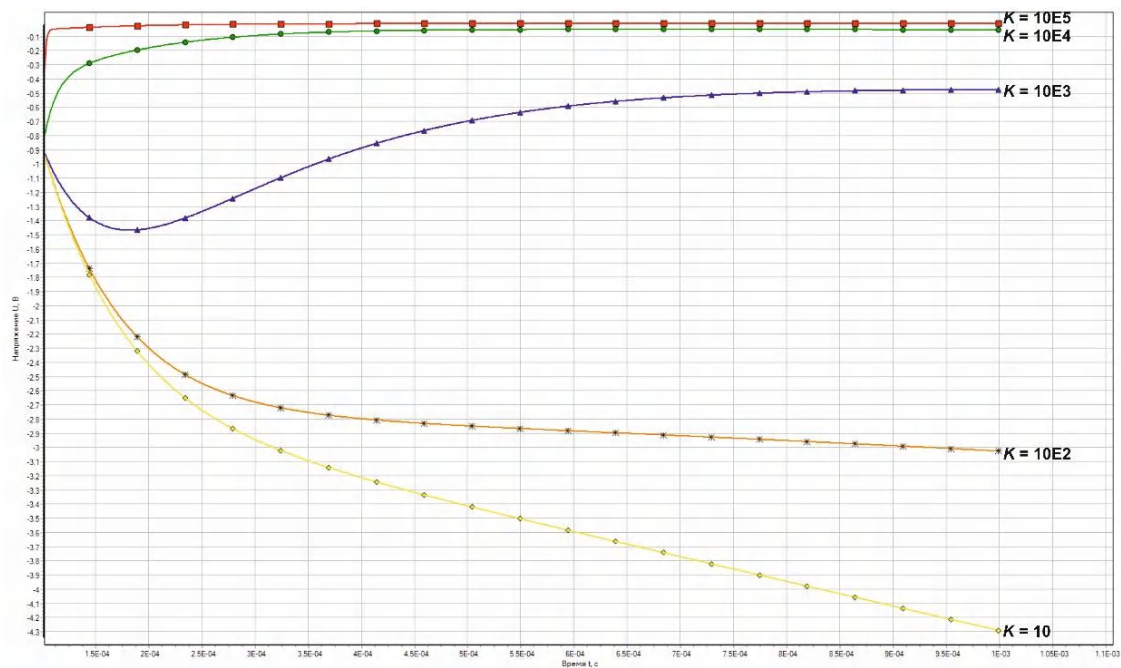


Рис. 6. Графические зависимости при оценке величины отклонения выходного напряжения

**Максимальная погрешность измерения
при оценке влияния коэффициента усиления K**

№ п/п	Коэффициент усиления K	Динамическое отклонение напряжения, В	Реальное значение напряжения, В	Максимальная погрешность измерения $\delta_{\text{макс}}$, %
1.	10^5	- 0,02	2,426	$\pm 0,82$
2.	10^4	- 0,177		$\pm 7,296$
3.	10^3	- 1,452		$\pm 59,852$
4.	10^2	- 2,297		$\pm 94,683$
5.	10^1	- 2,413		$\pm 99,464$

Аналогичным образом выполнено исследование влияния постоянной времени интегрирования τ на изменение выходного напряжения $U_{\text{вых}}(t)$ модели ОУ в диапазоне от 0,1 до 9,0 с, что позволило установить оптимальное значение, равное 0,1 с, которое подтверждается сопоставлением графика с расчетной экспоненциальной кривой. При этом использование значений τ от 0,5 до 9,0 с приводит к значительному искажению кривых и накоплению максимальной относительной погрешности $\delta_{\text{макс}}$ в диапазоне от $\pm 3,545$ до $\pm 56,761$ %, что неприменимо для получения точной модели ОУ.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод о работоспособности предлагаемой модели операционного усилителя в среде SimInTech, верном выборе основных элементов и блоков, а также правильном подборе оптимальных значений коэффициента усиления $K = 10^5$ и постоянной времени интегрирования $\tau = 0,1$ с. Практическая значимость разработанной модели заключается в возможности ее применения при моделировании измерительных цепей контрольно-измерительных приборов и аппаратуры, что в свою очередь позволит обеспечить энерго- и ресурсосбережение технологических процессов в промышленности и сельском хозяйстве. Предложенная модель операционного усилителя успешно применена при решении частной прикладной задачи определения параметров многоэлементных двухполюсников, представляющих из себя четырехэлементную схему замещения емкостного измерительного преобразователя. При этом относительная погрешность измерений в процессе имитационного моделирования не превысила $\pm 0,23$ %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование объемных характеристик области нагрева контактного провода подвижной электрической дугой и их вычисление в среде MathCAD / И. А. Кондрашов, Ю. Г. Семенов, А. Д. Цой, Д. А. Кецкало // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(81). – С. 140–148. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_140. – EDN LUEWYO.
2. Иванов, В. Э. Модель усилителя постоянного тока с цифровым управлением в среде SimInTech / В. Э. Иванов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 3-1(117). – С. 49–57. – DOI 10.23670/IRJ.2022.117.3.008. – EDN PLNV CX.
3. Карачин, В. И. Динамическое моделирование в среде SimInTech микромашинных мехатронных модулей позиционирования лазерных источников облучения в установке экспресс-контроля структуры потоков скважинной жидкости / В. И. Карачин, Р. С. Кашаев, В. Ю. Корнилов // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2023. – № 11. – С. 27–31. – DOI 10.26160/2541-8637-2023-11-27-31. – EDN TSCCSW.
4. Среда динамического моделирования SimInTech: официальный сайт. – Москва, 2024. – Режим доступа: URL: <https://simin-tech.ru> (дата обращения: 17.06.2024 г.).
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. – EDN GZTHPW.
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. – DOI 10.21685/2307-5538-2021-3-6.
7. Мишуков, С. В. Особенности имитационного моделирования измерительных схем емкостных датчиков / С. В. Мишуков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – Т. 10, № 1(36). – DOI 10.26102/2310-6018/2022.36.1.017. – EDN SEJFYH.

УДК 681.586.74

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-46-52

*И. Н. Воротников, С. В. Мишуков, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, Н. А. Ставицкая***ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ В СОСТАВЕ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ВЛАЖНОСТИ И НАЛИЧИЯ ПРИМЕСЕЙ В ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУРАХ****Ставропольский государственный аграрный университет**vorotn_in@mail.ru, stas.mishukov.92@mail.ru, mma_26@inbox.ru,
shaliko69@mail.ru, nata.stavitzkaja@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Станислав Вадимович Мишуков, stas.mishukov.92@mail.ru

Статья посвящена особенностям применения емкостных датчиков для определения влажности и наличия примесей в зерновых культурах, что является актуальной проблемой сельскохозяйственных производителей при хранении и обработке зерна. Представлен аналитический обзор существующих методов определения влажности и выполнено их сравнение с диэлектрическим способом, на основе которого построен принцип работы емкостных датчиков. Приведены основные преимущества и недостатки таких датчиков, а также рассмотрены направления их применения при определении влажности различных зерновых культур, таких как пшеница, ячмень, кукуруза, рапс и др. Рассмотрены известные методы определения влажности и примесей с помощью прямого и уравнивающего преобразования параметров многоэлементных двух-полюсников, а также предложен способ идентификации электрофизических свойств материалов. На его основе представлена информационно-измерительная система с встроенным алгоритмом обработки полученных данных, направленным на автоматизацию классических операций регулирования и управления технологическими процессами сельскохозяйственного предприятия. Приведены функциональная схема системы и блок-схемы основных циклов, выполняемых при реализации указанного алгоритма, что позволяет обеспечить высокий уровень контроля за состоянием зерновых культур в режиме реального времени.

Ключевые слова: зерновые культуры, качество, влагомер, диэлектрический способ, емкостной датчик, структурная схема, блок-схема, цикл, алгоритм

*I. N. Vorotnikov, S. V. Mishukov, M. A. Mastepanenko, Sh. Zh. Gabrielyan, N. A. Stavitskaya***FEATURES OF USING CAPACITIVE SENSORS AS PART
OF INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS FOR DETERMINING
MOISTURE AND IMPURITY IN GRAIN CROPS****Stavropol State Agrarian University**

The article is devoted to the consideration of the features of using capacitive sensors to determine humidity and the presence of impurities in grain crops, which is an urgent problem for agricultural producers during grain storage and processing. An analytical review of existing methods for determining humidity is presented and their comparison with the dielcometric method, based on which the principle of operation of capacitive sensors is built, is performed. The main advantages and disadvantages of such sensors are presented, as well as the directions of their application in determining the humidity of various cereals, such as wheat, barley, corn, rapeseed, etc. Known methods for determining humidity and impurities based on methods of direct and balancing transformation of parameters of multi-element bipolar circuits are considered, and a method for identifying the electrophysical properties of materials is proposed. Based on it, an information and measurement system with a built-in algorithm for processing the received data is presented, aimed at automating classical operations of regulation and control of technological processes of an agricultural enterprise. The functional scheme of the system and block diagrams of the main cycles performed during the implementation of the specified algorithm are presented, which made it possible to ensure a high level of control over the condition of grain crops in real time.

Keywords: crops, quality, moisture meter, dielcometric method, capacitive sensor, block diagram, block diagram, cycle, algorithm

Влажность зерновых культур является одним из основных показателей качества при производстве, хранении и обработке, поскольку ее изменение приводит к ускорению процессов гниения, прорастания, образования плесени

и развития других видов порчи, что в свою очередь негативно влияет на потребительские свойства конечной продукции – муки, крупы, крахмала, хлебных и макаронных изделий [1]. Низкое качество зерновых культур может стать

причиной развития негативных процессов в животноводстве и птицеводстве, а именно, снижения количества и качества мяса, молока, яиц и т. д., поскольку в основе рациона любого животного обязательно предусмотрены злаковые – пшеница, кукуруза, ячмень и др.

Для предотвращения указанных негативных процессов требуется постоянный контроль качества зерновых культур с помощью специальных приборов – влагомеров, обеспечивающих быстрое и точное определение влажности в режиме реального времени. Основываясь на полученных данных от приборов, принимаются меры по доведению влажности культуры до регламентированных значений, например, влажность при хранении пшеницы, ржи, ячменя, риса, гречихи не должна превышать 14,5 %, кукурузы, проса, сорго, овса – 13,5 %, семян подсолнечника, рапса – 7 %, гороха, фасоли, чечевицы, бобов – 16 %. При этом слишком низкая влажность также может привести к проблемам при обработке и хранении зерна, а именно увеличению сопротивления и нагрузки на дробильные аппараты и установки для измельчения сырья [2].

На сегодняшний день существует большое количество методов определения влажности зерновых культур – воздушно-тепловые, вакуумно-тепловые, химические, дистилляционные, экстракционные, пикнометрические, механические, кондуктометрические и другие, однако одним из самых простых и наиболее эффективных является диэлькометрический (емкостной) метод [3]. Этот метод основан на явлении высокой диэлектрической проницаемости воды $\epsilon_{\text{воды}} \approx 81$ Ф/м, которая может находиться в зерновых культурах в химически, физически и механически связанных состояниях. Для его реализации применяются первичные измерительные преобразователи – емкостные датчики (ЕД), представляющие из себя простейший конденсатор с двумя электродами (рис. 1), между которыми помещается исследуемая культура. Ее увлажнение приводит к значительному изменению диэлектрической проницаемости и увеличению емкости датчика $C_{\text{дат.}}$, определяемой по следующему выражению [4]:

$$C_{\text{дат.}} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (1)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м; ϵ_0 – относительная диэлектрическая проницаемость, Ф/м; S – площадь перекрытия пластин (электродов), мм²; d – расстояние между пластинами (электродами), мм.

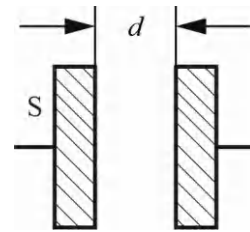


Рис. 1. Схема простейшего конденсатора

Следует отметить универсальность емкостных датчиков, которые применяются для измерения не только влажности зерновых культур, но и уровня, давления, позиционирования, толщины, перемещения и т. д. Некоторые примеры таких датчиков приведены на рис. 2 [5].



Рис. 2. Области применения емкостных датчиков

Большое количество областей применения ЕД свидетельствует об актуальности их использования для определения влажности зерновых культур, при этом на сегодняшний день разработаны и используются различные измерительные схемы, как с уравниванием сигнала от датчика – мостовые на постоянном или переменном токах (рис. 3, а–б), квазиуравновешенные, трансформаторные (рис. 3, в), многоплечие и др., так и с прямым преобразованием – резонансные, с делителем напряжения, диодно-емкостные и др. [6–7].

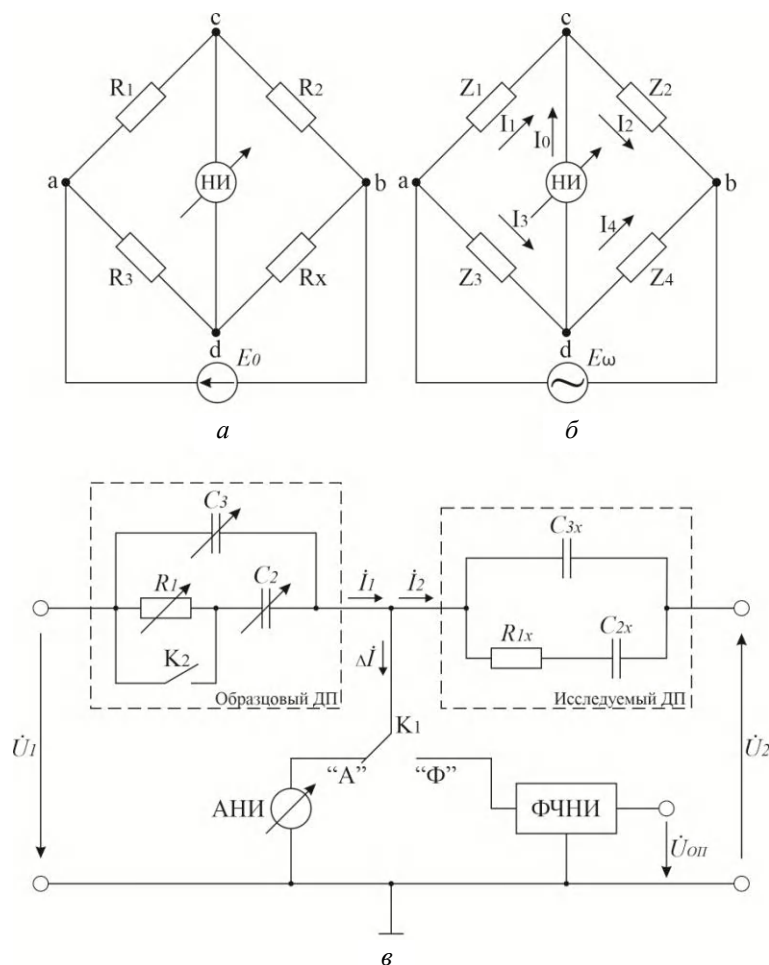


Рис. 3. Мостовые измерительные схемы:
 а – на постоянном токе; б – на переменном токе; в – одинарный трансформаторный мост

Среди методов прямого преобразования можно выделить способы получения значений влажности, построенные на анализе динамических процессов, возникающих при подаче постоянного или переменного воздействия на емкостной датчик, который условно может быть представлен схемой замещения в виде двухполюсника (ДП) (рис. 4). Для зерновых культур он состоит из четырех основных элементов – сквозного активного сопротивления R_{1x} , емкости мгновенной поляризации C_{1x} , релаксационного сопротивления R_{2x} и релаксационной поляризации C_{2x} [8].

Значительный вклад в разработку и исследование приведенных методов внес Мелентьев В. С., которым были разработаны и исследованы подходы, технические решения и алгоритмы определения параметров ДП, имеющих от двух до трех элементов с различными схемами соединения, характеризующими большое количество преобразователей и объектов измерения, например, сельскохозяйственных продуктов

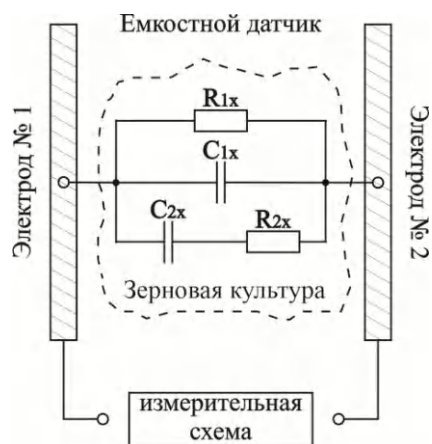


Рис. 4. Схема замещения емкостного датчика

(пшеница, ячмень, кукуруза, овес, рапс, просо и др.) [9]. Однако предложенные в его трудах технические решения имеют некоторые недостатки:

1. Необходимость проведения четырех измерений напряжения в течение быстропротекающего динамического процесса, в результате

чего происходит накопление аддитивных и мультипликативных погрешностей;

2. Ограниченное количество элементов в ДП, что снижает точность определения электрофизических свойств широкого спектра объектов измерения;

3. Различные точки включения объектов измерения в цепи прямой и обратной связи операционных усилителей, что требует посто-

янного контроля и переключения в ручном режиме.

Эти недостатки частично были устранены в предлагаемом сотрудниками Ставропольского ГАУ способе определения параметров многоэлементных двухполюсников [10], который заключается в разделении измерительного процесса на два режима – установившийся (цепь I) и динамический (цепь II) (рис. 5).

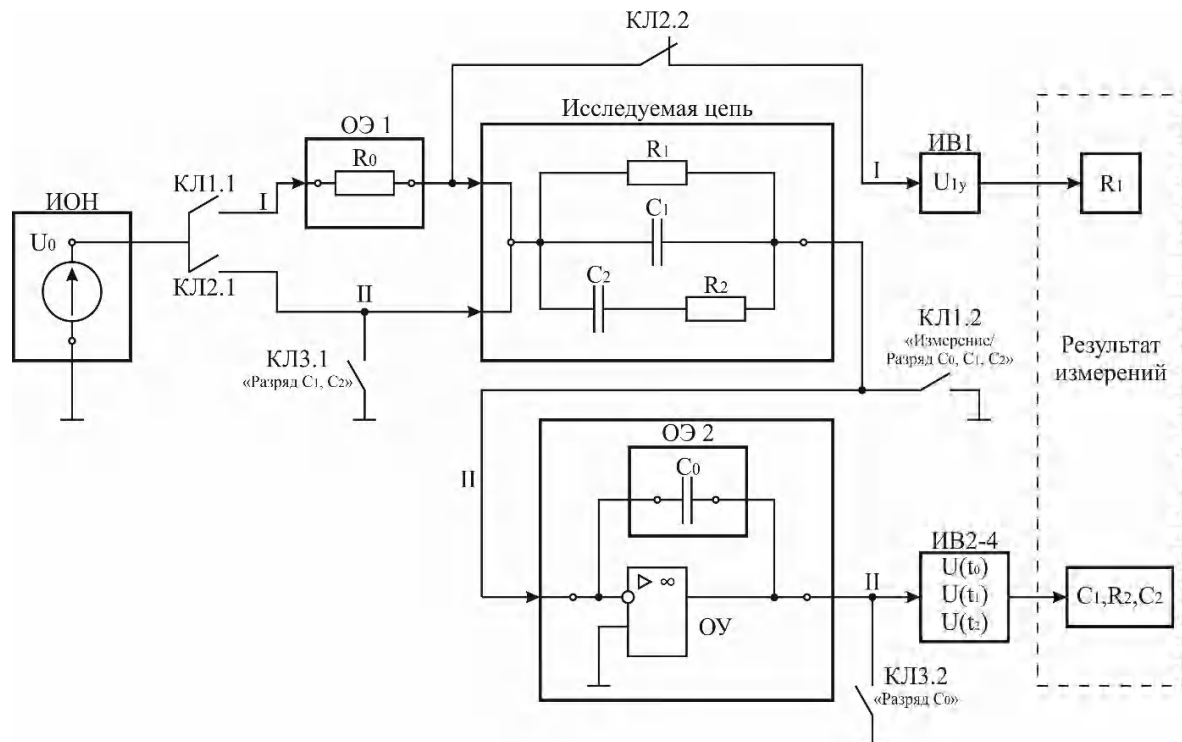


Рис. 5. Структурная схема предлагаемого способа

Подробное описание алгоритма работы предлагаемого способа представлено в публикациях [11–12], в которых была обоснована актуальность его применения в информационно-измерительных и управляющих системах для определения влажности и примесей зерновых культур. При этом была разработана функциональная схема (рис. 6), которая включает в себя следующие компоненты: ЕИП – емкостной датчик; ИОН – источник опорного напряжения; ОУ – операционный усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ШД – шины данных; ШУ – шины управления; К1-К6 – автоматические контакты; Секции ОЭ1-2 – блоки опорных элементов и др.

Особенностью представленной системы является использование встроенного алгоритма обработки полученных данных, направленного на автоматизацию классических операций регулирования и управления технологическими

процессами сельскохозяйственного предприятия. Этот алгоритм можно разделить на следующие отдельные циклы:

1. Цикл анализа и обработки данных, полученных от емкостных датчиков (рис. 7).

Данный цикл является для системы основным и выполняется непрерывно, поскольку от актуальности полученных данных зависит результат принятия верных решений на каждом этапе обработки зерновых культур. Полученные от емкостных датчиков результаты измерений передаются на сервер с присвоением номера «N***», который задается измерительным устройством на полевом уровне. Эти данные архивируются в журнале и заносятся в ячейку памяти сервера, к которой обращается система в процессе чтения базы данных, например, типа MySQL, включающей сведения о нормируемых показателях влажности и количества примесей в соответствии с ГОСТ.

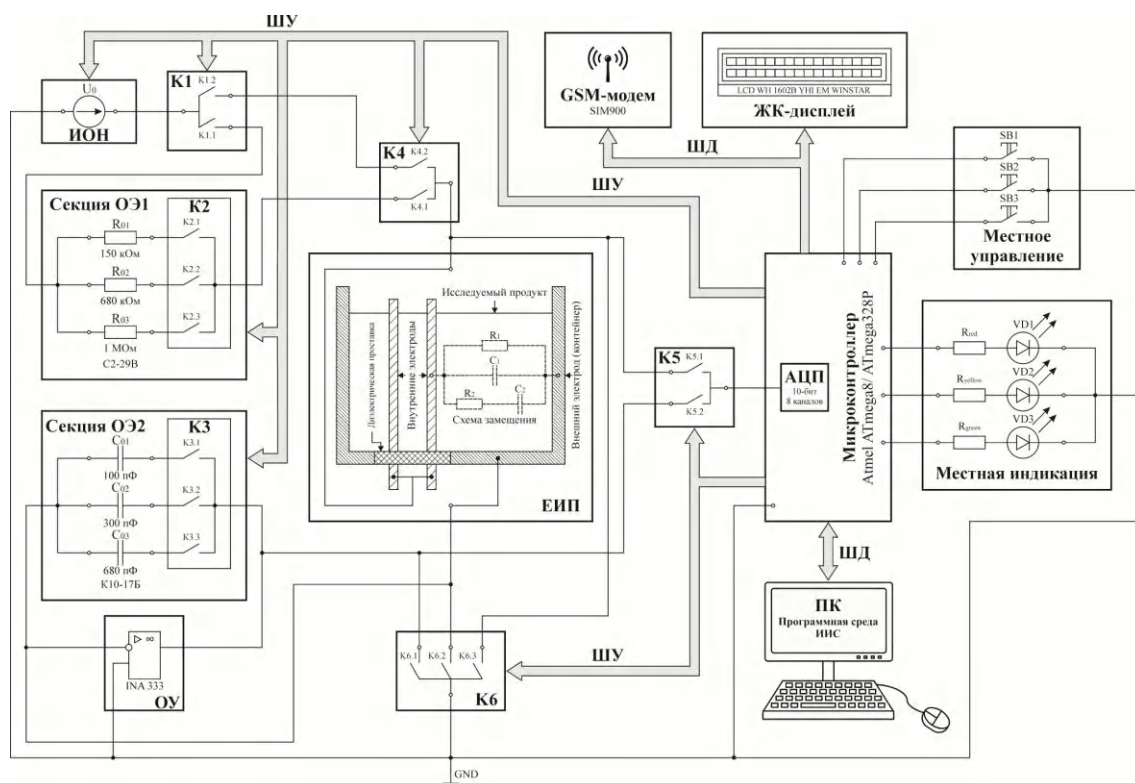


Рис. 6. Функциональная схема информационно-измерительной системы

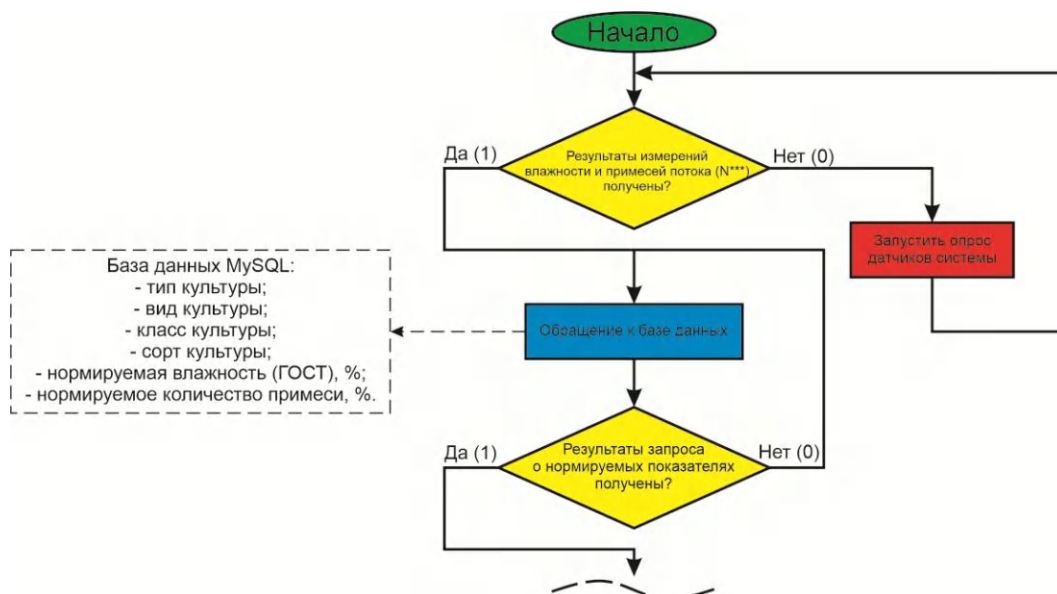


Рис. 7. Блок-схема цикла анализа и обработки данных

2. Следующий цикл алгоритма заключается в проведении сравнения результатов измерений емкостными датчиками и нормируемых значений зерновой культуры (рис. 8).

В случае несоответствия измеренных значений влажности и примесей нормативным по-

казателям система выдает задания на выполнение сушки или очистки, которые направляются ответственному лицу (технологу, агроному, мастеру и т. д.), при этом происходит дублирование задания работнику, отвечающему за сушильное или очистное оборудование.

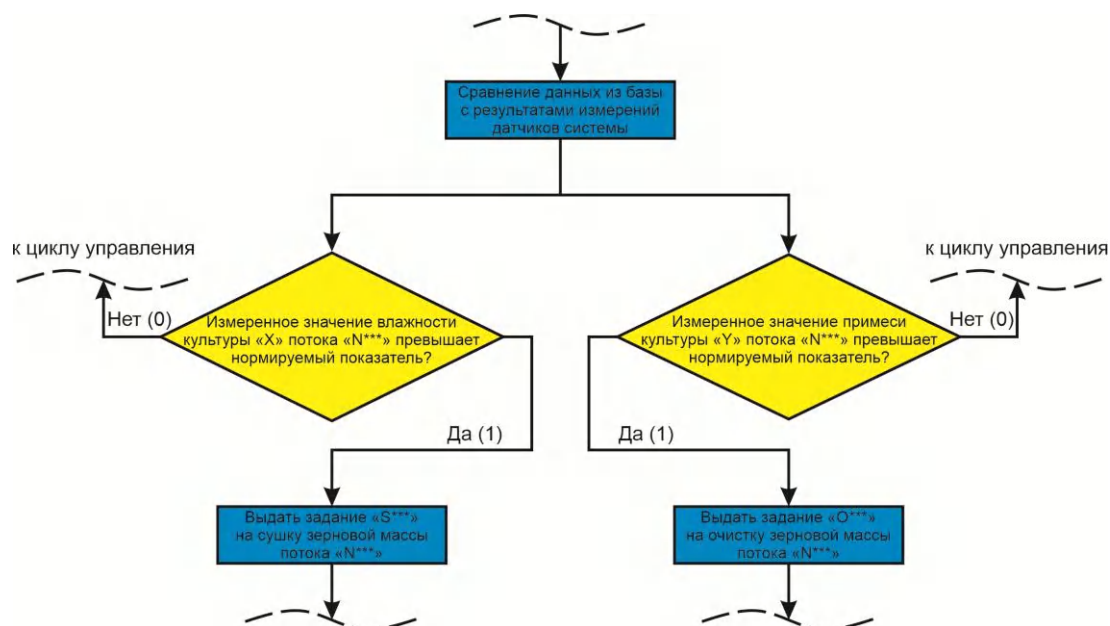


Рис. 8. Блок-схема сравнения измеренных значений влажности и количества примесей

3. Заключительным циклом является контроль выполнения сформированных заданий (рис. 9).

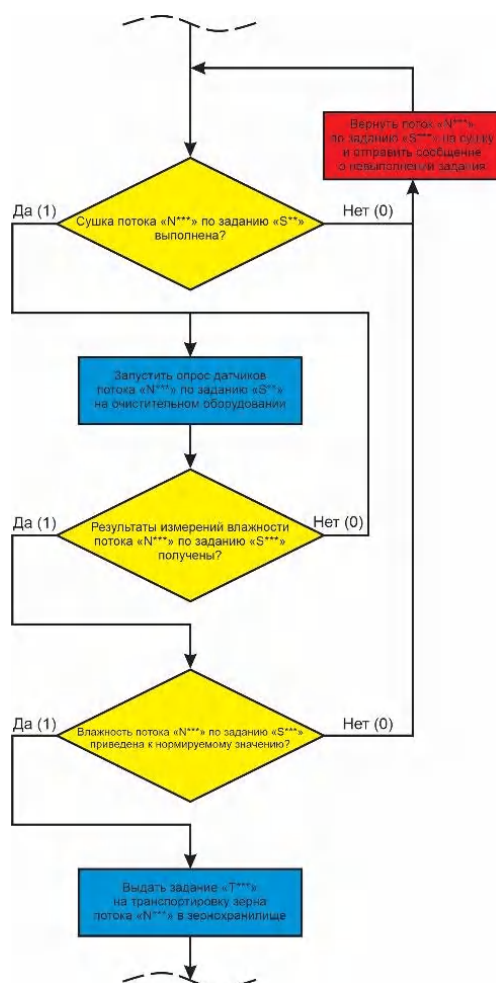


Рис. 9. Блок-схема цикла контроля выполнения сформированных заданий

Реализация приведенного цикла заключается в направлении запросов о завершении процессов сушки или очистки, которые должны иметь положительный ответ, чтобы система могла перейти на следующий цикл.

Таким образом, применение емкостных датчиков при определении влажности и примесей зерновых культур дает возможность реализовать современные информационно-измерительные и управляющие системы, обеспечивающие высокий уровень автоматизации технологических процессов сельскохозяйственных предприятий, что в свою очередь позволяет: выполнять своевременный контроль качества культуры; снизить продовольственные потери; повысить производительность труда работников; устранить необходимость лабораторных исследований; улучшить качество и сохранность урожая; обеспечить энерго- и ресурсосбережение при производстве, хранении и переработке продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование влияния влажности зерна на процесс экструзии и качество готовой продукции / В. В. Матюшев, А. В. Семенов, И. А. Чаплыгина [и др.] // Вестник КрасГАУ. – 2022. – № 7(184). – С. 228–234. – DOI 10.36718/1819-4036-2022-7-228-234. – EDN BIPLXQ.
2. Гриценко, Г. М. Проблемы обеспечения и регулирования качества зерна и зернопродукции / Г. М. Гриценко, Н. Н. Величко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – № 4(90). – С. 115–120. – EDN OXAKWP.
3. Рындин, А. А. Подходы к совершенствованию системы контроля качества зерна на элеваторах / А. А. Рындин, А. Н. Стрелюхина, Ю. А. Сорокина // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. – Т. 83, № 3(89). – С. 61–67. – DOI 10.20914/2310-1202-2021-3-61-67. – EDN UCRZFR.
4. Современные методы диэлькометрического контроля в технологиях сельскохозяйственного производства / В. П. Якушев, И. П. Ананьев, Е. В. Тулин [и др.] // Плодородие. – 2007. – № 5(38). – С. 28–31. – EDN KUCKUH.
5. Чураков, П. П. Преобразователь параметров бесконтактных емкостных датчиков для кондуктодиэлькометрических измерений / П. П. Чураков, А. В. Грачев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 4–7. – С. 1363–1366. – EDN ZAULUN.
6. Иванов, В. И. Преобразователь параметров многоэлементных двухполюсников с уравниванием токов / В. И. Иванов, В. С. Титов, Д. А. Голубов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2012. – Т. 55, № 2. – С. 73–84. – EDN OXOULN.
7. Карпов, В. А. Чувствительность и погрешность мостовой схемы с одним измерительным элементом / В. А. Карпов, О. М. Ростюкина // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2011. – № 2(45). – С. 72–77. – EDN PYAJLF.
8. Колдов, А. С. Определение параметров нерезонансных четырехэлементных электрических цепей по результатам совокупных измерений / А. С. Колдов, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3(29). – С. 39–47. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-5. – EDN SVFMKB.
9. Мелентьев, В. С. Исследование метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям сигналов, распределенным в пространстве / В. С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, Е. В. Павленко // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: Сборник научных статей Международной научно-технической конференции, Пенза, 10–12 ноября 2014 года. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2014. – С. 19–22. – EDN TCLCKZ.
10. Патент № 2714954 С1 Российская Федерация, МПК G01R 27/02. Способ определения параметров многоэлементных двухполюсников : № 2019118177 : заявл. 11.06.2019 : опубл. 21.02.2020 / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, С. В. Мишуков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет». – EDN DDJNIQ.
11. Мишуков, С. В. Разработка и исследование системы контроля влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов / С. В. Мишуков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2022. – № 2(40). – С. 5–12. – DOI 10.21685/2307-5538-2022-2-1. – EDN GQZGDK.
12. Интеллектуальная система контроля влажности и наличия примесей в зерновых культурах / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян [и др.] // Сельский механизатор. – 2023. – № 4. – С. 14–15. – DOI 10.47336/0131-7393-2023-4-14-15-17. – EDN SKAVZG.

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-53-55

ОФТАЛЬМОЛОГИЧЕСКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ФОТОМЕТР

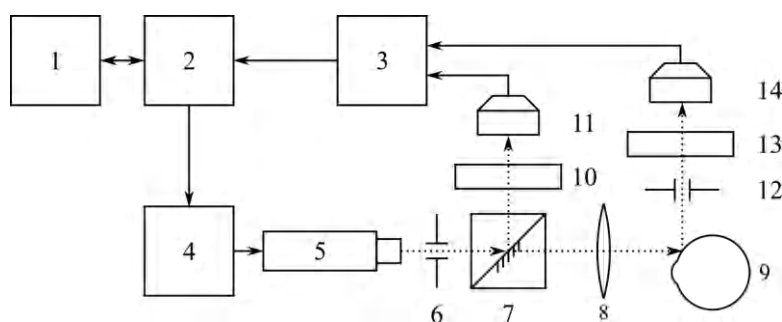
Автор, ответственный за переписку: Андрей Леонидович Якимец,
yakimets_volsu@mail.ru

Ключевые слова: лазерный фотометр, гематоофтальмический барьер, барьер кровь–водянистая влага, фотометрия, рассеяние света, измеритель лазерного излучения, обратная связь, контроль мощности, относительные измерений, фильтрация помех

OPHTHALMIC LASER PHOTOMETER

Keywords: laser photometer, hematophthalmic barrier, blood-watery moisture barrier, photometry, light scattering, laser radiation meter, feedback, power control, relative measurements, interference filtering

в органических растворителях. Также фотометры широко используются в задачах изучения рассеяния света как низкомолекулярными, так и высокомолекулярными соединениями в клинико-диагностических лабораториях медицинских учреждений.



1 – персональный компьютер; 2 – устройство управления; 3 – измерительный блок; 4 – управляемый источник тока; 5 – лазер; 6, 12 – диафрагма; 7 – светоделитель; 8 – фокусирующая линза; 9 – исследуемый объект; 10, 13 – светофильтр; 11, 14 – фотодиод

уровня помех от искусственных источников освещения, все измерения синхронизируются с переменным напряжением электрической сети. Сетевое напряжение подается на трансформатор Тр1, пониженное напряжение со вторичной обмотки после однополупериодного выпрямителя подается на компаратор DA1, формирующий синхронизирующую последовательность импульсов. Полученная последовательность используется управляющим устройством для формирования входной цифровой последовательности цифро-аналогового преобразователя DA2, напряжение с выхода которого является опорным для источника тока управляемым напряжением, собранным на элементах DA3, Т1. Сформированный ток определяет интенсивность лазерного излучения модулем D3 с максимальной мощностью 5 мВт. Оптическое излучение после светоделителя, рассеянное на исследуемом объ-

екте, падает на фотодиоды D4, D5, работающие в фотогальваническом режиме. Полученные напряжения поступают на вход фильтров нижней частоты DA5.1, DA7.1 с частотой среза примерно 100 Гц. Отфильтрованные сигналы дополнительно усиливаются DA5.2, DA7.2 и преобразуются аналого-цифровым преобразователем DA8 в цифровой эквивалент. Полученные отсчеты сигнала передаются в управляющее устройство, где выполняется предварительная обработка сигнала, и далее сформированные данные обрабатываются на персональном компьютере.

На рис. 3. представлен пример измерения рассеяния лазерного излучения на матовой стеклянной пластине. По оси абсцисс отложена относительная интенсивность излучения, нормированная на интенсивность опорного сигнала. Погрешность измерения во всем измеряемом диапазоне не превосходит 1 %.

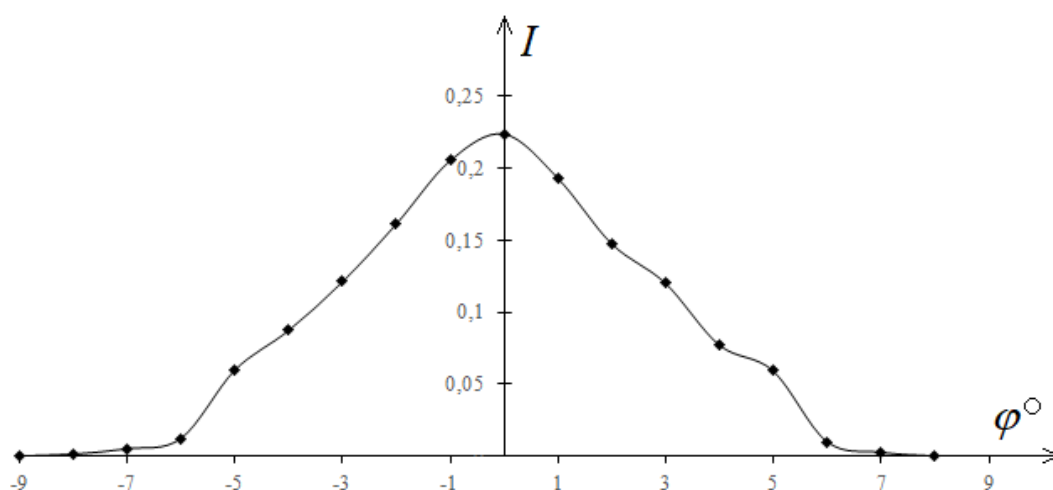


Рис. 3. Рассеяние света на матовой стеклянной пластине

Лазерный фотометр проводит измерения на переменном сигнале с частотой 25 Гц. Измерение на частоте сигнала равной половине частоты напряжения электрической сети позволяет при использовании синхронного программного детектирования существенно уменьшить влияние на результаты измерений внешних оптических помех от естественных и искусственных источников света. Использование двух оптических каналов позволяет контролировать мощность лазерного излучения и проводить относительные измерения в отличие от известных устройств [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Астахов, Ю. С. Значение лазерной фотометрии в клинической практике / Ю. С. Астахов, Т. И. Кузнецова // Офтальмологические ведомости. – Том 9. – № 2. – 2016. – Общество с ограниченной ответственностью «Эко-Вектор» Санкт-Петербург).
2. Sawa, M. Laser flare-cell photometer: principle and significance in clinical and basic ophthalmology. Jpn. J. Ophthalmol. – 2017; 61(1):21–42. DOI: 10.1007/s10384-016-0488-37.
3. Zborovska O.V., Dorokhova O.E., Korol A R., Troianovska K.V., Zadorozhnyy O.S., Kolesnichenko V.V., Pasyechnikova N.V. Assessing quantitatively the state of the blood-aqueous barrier by laser flare photometry: a review. Oftalmologicheskii Zhurnal.= Journal of Ophthalmology (Ukraine). – 2023. 4 (513):67-73.

УДК 621.315

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-56-61

*Д. Н. Авдеюк***МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА МАГИСТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ*****Волгоградский государственный технический университет**

avdprod@yandex.ru

В статье рассматривается современная методика мониторинга магистральных линий электропередач, направленная на повышение надежности и эффективности эксплуатации энергетической инфраструктуры. Описано устройство, предназначенное для повышения точности определения места повреждения на линии электропередач с учетом внешних климатических факторов. С учетом внедрения в практику рефлектометра в сочетании с предлагаемым устройством также предлагается дополненная методика мониторинга магистральных линий электропередач.

Ключевые слова: методика, повышение точности, линия электропередач, рефлектометр, BPMN-диаграмма

*D. N. Avdeyuk***THE METHODOLOGY OF MONITORING MAIN POWER LINES****Volgograd State Technical University**

The article discusses a modern method of monitoring main power transmission lines aimed at improving the reliability and efficiency of energy infrastructure operation. A device designed to increase the accuracy of determining the location of damage on a power line, taking into account external climatic factors, is described. Taking into account the introduction of a reflectometer into practice in combination with the proposed device, an additional method for monitoring main power lines is also proposed.

Keywords: methodology, accuracy improvement, power line, reflectometer, BPMN diagram

Введение

Магистральные воздушные линии электропередач (далее – МЛЭП) – это системы высоковольтных линий электропередач, которые используются для передачи больших объемов электроэнергии на длинные расстояния. Они представляют собой систему опор с проводами, по которым передается электрический ток.

Магистральные воздушные линии электропередач являются частью энергетической инфраструктуры и используются для передачи электроэнергии от генераторов (например, на электростанциях) к потребителям на большие расстояния. Они обычно имеют напряжение от 110 кВ до 1200 кВ и протяженность до нескольких тысяч километров [1].

Магистральные воздушные линии электропередач имеют несколько преимуществ перед другими способами передачи электроэнергии, такими как подземные кабели. Они более экономичны, поскольку требуют меньше материалов и работы для установки, а также их легче обслуживать и ремонтировать. Кроме того, магистральные воздушные линии электропередач

могут быстро и легко расширяться при необходимости.

Описание ИИС

В линию электропередачи, на которой произошла аварийная ситуация, после отключения ее релейной защитной автоматикой, посылается зондирующий импульс, генерируемый рефлектометром. Однако в любом рефлектометре перед измерением расстояния нужно установить коэффициент укорочения.

Точность измерения расстояния до места повреждения зависит от правильной установки коэффициента укорочения. Короткие импульсные сигналы, используемые при методе импульсной рефлектометрии, распространяются в разных линиях с разной скоростью. Эта скорость определяется материалом изоляции проводников линии.

Скорость распространения импульсных сигналов в воздушных линиях (изоляция – воздух) очень близка к скорости света в вакууме. Скорость распространения в кабельных линиях, в зависимости от материала изоляции, может быть значительно ниже (до нескольких раз) скорости распространения света в вакууме.

© Авдеюк Д. Н., 2024

* Исследование выполнено за счет средств программы развития ВолгГТУ «Приоритет 2030», в рамках научного проекта № 38/653-24.

При импульсной рефлектометрии расстояние до места повреждения или до конца линии определяется по времени задержки отраженных сигналов относительно зондирующих, в соответствии с выражением:

$$L = \frac{v_{\text{фаз}} * T}{2} = \frac{C}{2 * g} * T,$$

где L – расстояние до места повреждения, T – время задержки отраженных сигналов относительно зондирующих, $v_{\text{фаз}}$ – скорость распространения импульсного сигнала по линии, C – скорость света в вакууме (300 000 000 м/с), g – коэффициент укорочения.

Коэффициент укорочения показывает во сколько раз скорость распространения сигналов в линии меньше скорости света в вакууме и определяется выражением $g = C/v_{\text{фаз}}$.

Используя данные зависимости изменения параметров линии, необходимо проводить коррекцию, которая в свою очередь скорректирует фазовую скорость и, следовательно, расстояние до места повреждения, что уменьшит погрешность определения места повреждения линии электропередачи [2].

С учетом коррекции формула фазовой скорости будет выглядеть следующим образом:

$$v_{\text{фаз}} = \frac{\omega}{\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega^2 L_{0\partial} C_{0\partial} - R_{0\partial} G_{0\partial} + \sqrt{(R_{0\partial}^2 + \omega^2 L_{0\partial}^2) \cdot (G_{0\partial}^2 + \omega^2 C_{0\partial}^2)}}}$$

$$L_{0\partial} = L_0 \pm \Delta L_0; R_{0\partial} = R_0 \pm \Delta R_0; C_{0\partial} = C_0 \pm \Delta C_0; G_{0\partial} = G_0 \pm \Delta G_0 \quad (1)$$

где ΔL_0 , ΔC_0 , ΔR_0 , ΔG_0 – значения отклонения параметров от нормируемых значений [3].

Для вычисления значений отклонения параметров от нормируемых значений необходимо измерить параметры окружающей среды, а именно:

- температуру провода;
- температуру воздуха;
- влажность воздуха;
- диэлектрическую проницаемость земли.

Описание методики мониторинга магистральной линии электропередачи

Суть метода заключается в следующем. Рефлектометр для определения расстояния до места повреждения линии электропередачи (рис. 1) подключается к линии электропередачи (ЛЭП) через коммутатор, который является связующим звеном между рефлектометром, ЛЭП и предлагаемым аппаратно-программным устройством. Отраженный сигнал через коммутатор поступает на усилитель, коэффициент усиления которого корректируется по функциональной зависимости, обратной функции затухания сигнала в линии. Далее усиленный сигнал поступает в блок стабилизации амплитуды сигнала, который представляет собой устройство автоматической регулировки усиления (АРУ) [4].

Блоки адаптивного усилителя и стабилизации амплитуды сигнала позволяют реализовать двухступенчатую стабилизацию отраженного сигнала и повысить достоверность работы устройства в целом.

По известному времени от начала посылы зондирующего импульса и времени возврата отраженного импульса от неоднородности линии происходит подсчет количества тактов, соответствующих времени прохождения зондирующего импульса до места аварии на линии.

Микроконтроллер, на вход которого поступает информация о времени прохождения зондирующего импульса, на основе программного обеспечения производит, согласно формулы (1), расчет фазовой скорости и поправочного коэффициента укорочения рефлектометра.

Расчет фазовой скорости происходит с учетом усредненных по времени показаний с датчиков окружающей среды (температуры провода и воздуха, влажности воздуха и диэлектрической проницаемости земли).

После чего скорректированное значение импульса через коммутатор поступает в рефлектометр, на экране которого представлена информация о расстоянии и характере повреждения на линии электропередачи.

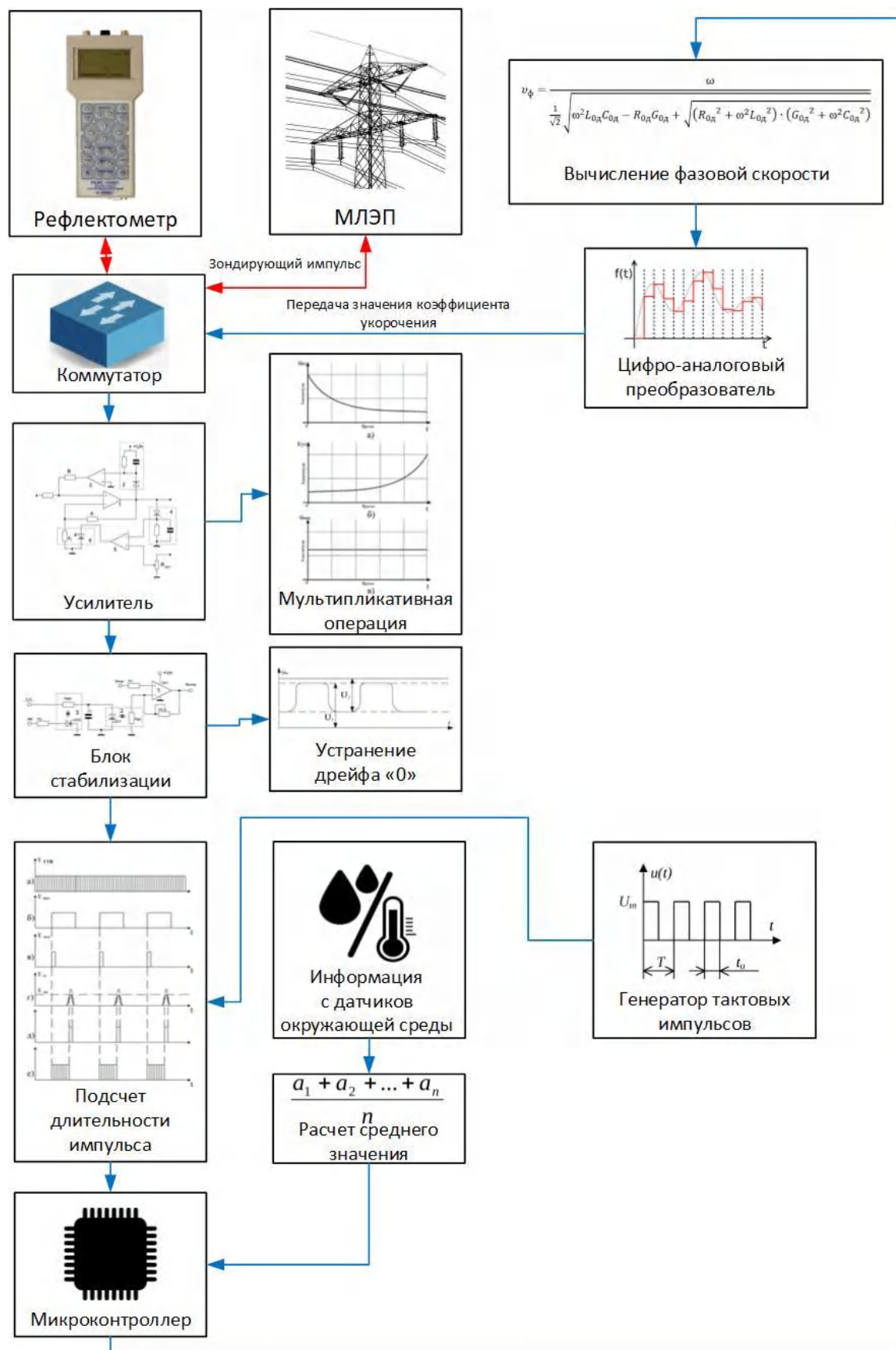


Рис. 1. Схема метода повышения достоверности ИИС определения мест повреждения на линии электропередач

Схема подключения ИИС представлена на рис. 2.

Микроконтроллер МК может устанавливать два режима работы: режим установки фазовой скорости или коэффициента укорочения электромагнитной волны в линии электропередачи и режим определения вида и места аварии. В режиме установки коэффициента укорочения работают блоки ДТП, ДТВ, ДДП, ДСЗ и МК. В режиме определения вида и места повреждения работают все блоки структурной схемы кроме датчиков.

Необходимо отметить, что устройство предназначено для работы в системе релейной защиты. В последних разработках системы релейной защиты также используются системы

автоматической коррекции влияния метеорологических факторов на токи короткого замыкания в воздушных линиях. Причем для коррекции используются такие же блоки – ДТП, ДТВ, ДДП, ДСЗ и МК. Поэтому эти блоки могут быть общими для обеих систем.

Учитывая тот факт, что метеорологические факторы окружающей среды изменяются относительно плавно на протяжении линии, то установка датчиков предполагается единой группой возле опоры.

Созданная информационно-измерительная система позволяет повысить достоверность контроля МЛЭП и снизить погрешность при определении места повреждений линий на 6 %.

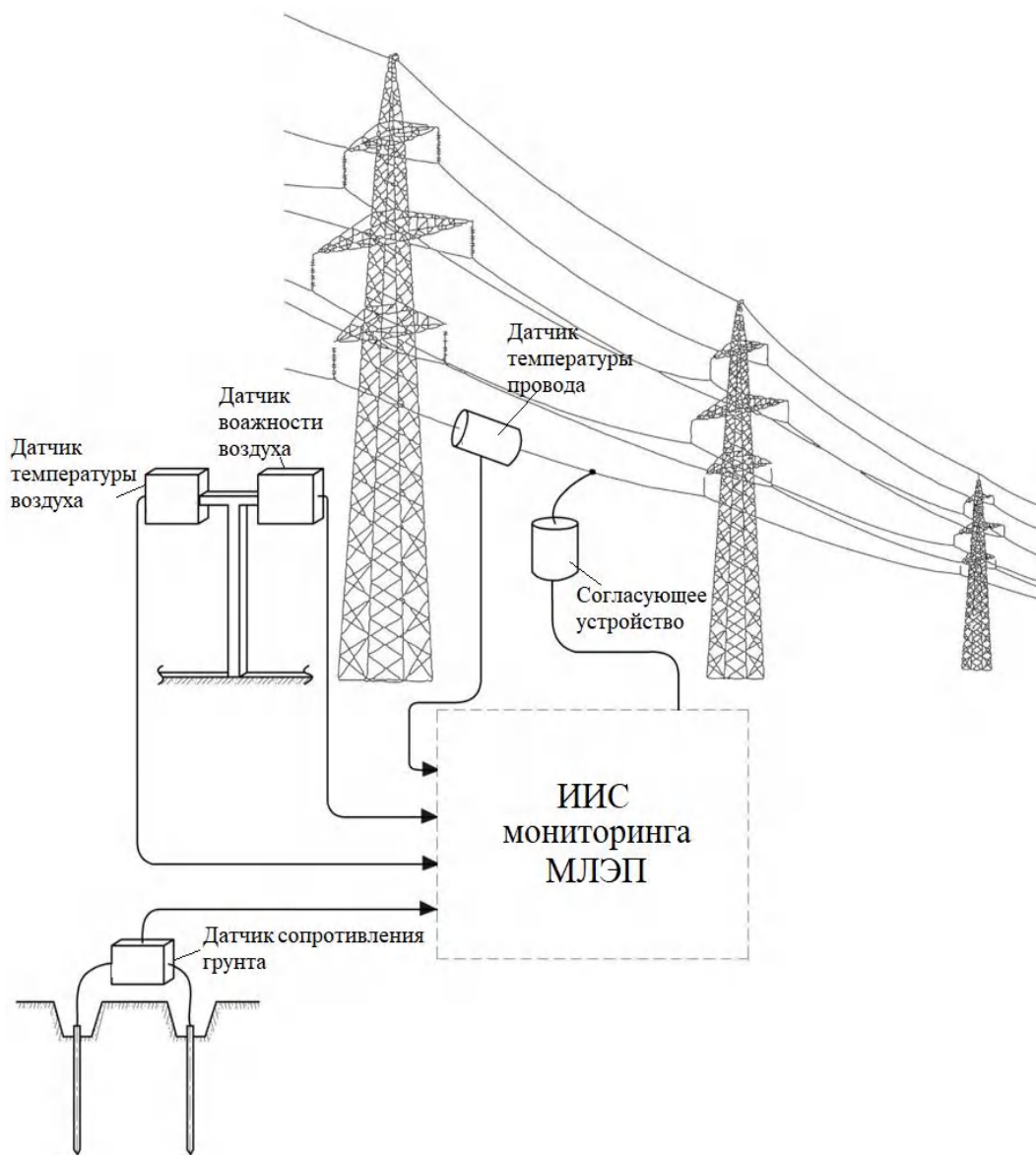


Рис. 2. Схема подключения ИИС к МЛЭП

На рис. 3 представлена BPMN-схема руководства по проведению мероприятий с исполь-

зованием разработанного устройства.

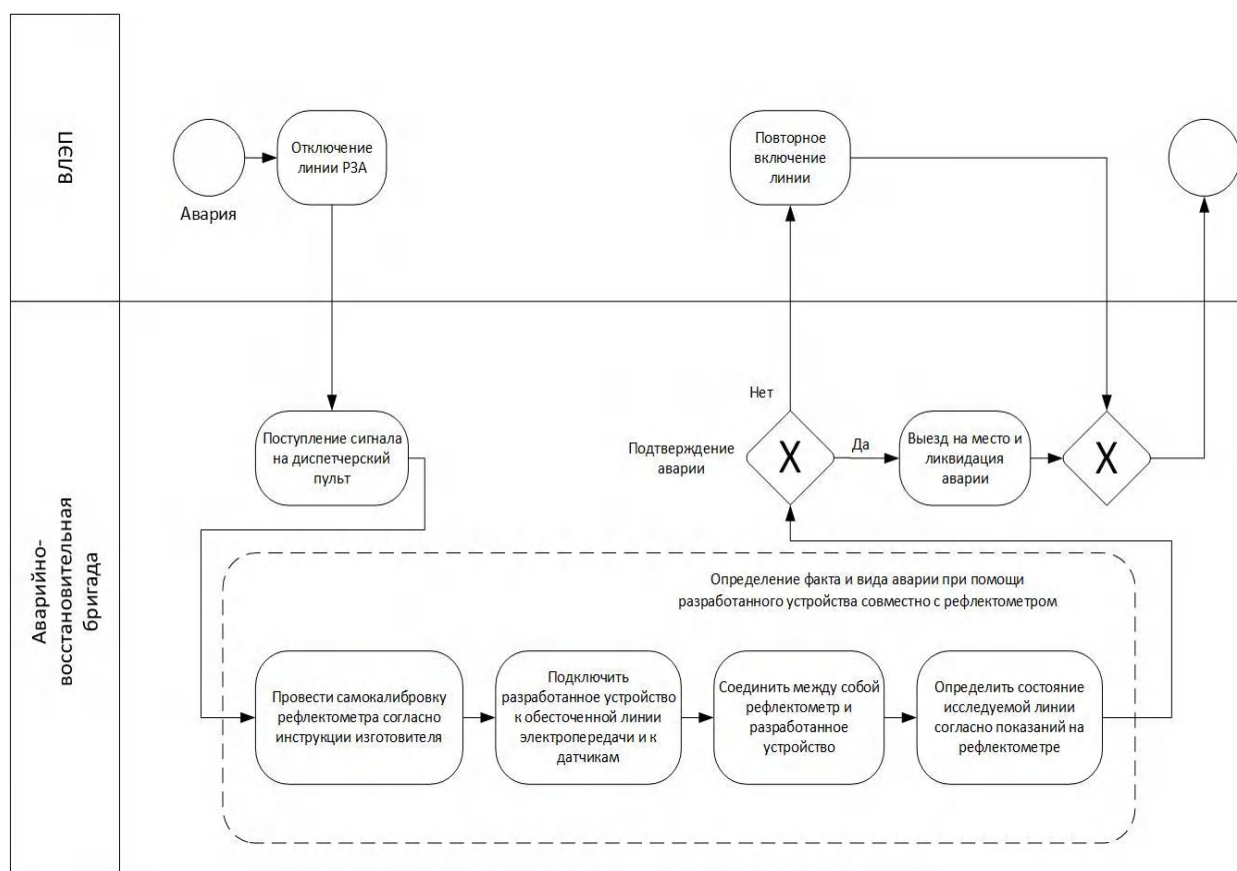


Рис. 3. BPMN-диаграмма инженерной методики мониторинга магистральной линии электропередачи

Вышеуказанная схема представляет из себя инструкцию по работе с устройством в случае возникновения аварии на линии электропередачи:

1. При возникновении аварии на линии электропередачи происходит срабатывание релейной защиты и автоматики (РЗА), после чего линия остается обесточенной, и соответствующий сигнал поступает на диспетчерский пульт с дальнейшей передачей информации об инциденте аварийно-восстановительной бригаде;

2. Сотрудники электроэнергетической организации выезжают на место расположения РЗА;

3. При помощи рефлектометра и разработанного устройства исследуют линию электропередачи на наличие факта/вида аварийного режима;

После определения расстояния до места аварии энергетики могут приступить к ремонту поврежденной линии. Для этого им необходимо

использовать специальное оборудование, которое позволяет заменять поврежденные участки линии, провода и другие элементы электросети.

Важно отметить, что работа на поврежденной линии электропередачи является опасной и требует высокой квалификации и опыта. Поэтому энергетики должны соблюдать все необходимые меры безопасности и использовать соответствующее оборудование и инструменты [5].

Заключение

В результате работы рефлектометра в составе с предлагаемым устройством целесообразно изменить также и инженерную методику мониторинга магистральной линии электропередачи. При учете внешних климатических факторов повышается достоверность определения места повреждения на линии электропередач. Учитывая тот факт, что для работы предлагаемого устройства необходимы климатиче-

ские датчики, то необходимо учесть их установку в инженерной методике. Стоит отметить, что использование предлагаемого устройства повышает достоверность определения места повреждения на 6 %, таким образом дополнительные временные затраты на установку датчиков являются оправданными действиями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воротников, С. А.* Информационные устройства робототехнических систем: учеб. пособие / С. А. Воротников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 384 с.; ил. (Робототехника / Под ред. С. Л. Зенкевича, А. С. Ющенко).
2. *Шалыт, Г. М.* Определение мест повреждения линий электропередачи импульсными методами / Г. М. Шалыт. – М.: «Энергия», 1968. – 216 с.
3. Локационные приборы контроля линий электропередачи: учеб. пособие / А. Н. Шилин, А. А. Шилин, Над. С. Кузнецова, Д. Н. Авдеюк; ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – 128 с.
4. Пат. 2712771 Российская Федерация, МПК G01R31/11 Интеллектуальное устройство для измерения расстояния до места повреждения линий электропередачи / А. Н. Шилин, А. А. Шилин, Над. С. Кузнецова, Д. Н. Авдеюк; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2020.
5. Рефлектометр цифровой импульсный РИФ-9 [Электронный ресурс] // Сенсорика-ТМ. – Режим доступа: <https://sensorika-tm.ru/shop/trassoiskateli-reflektometry/impulsnyj-reflektometr-rif-9/> – (Дата обращения: 12.11.2024 г.).

УДК 629.11.42.012.57

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-62-70

П. В. Потапов, М. В. Морсков, В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОХОДИМОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТРАКТОРОВ
ПО ГРУНТАМ С НИЗКОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ**

Волгоградский государственный технический университет

paulflinx@gmail.com, morskovmaximvladimirovich@gmail.com,
shehovtsov@vstu.ru, tslmvsturu@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Виктор Викторович Шеховцов, shehovtsov@vstu.ru

В статье рассмотрена проблема необходимости наличия в парке сельскохозяйственных тракторов России гусеничных машин для выполнения сельхозработ на переувлажненных почвах в период весенней и осенней распутиц. Проанализированы конструктивные мероприятия для повышения проходимости колесных тракторов по грунтам с низкой несущей способностью. Рассмотрена возможность использования на тракторах класса 1,4 для обеспечения надлежащей проходимости сменного колесно-гусеничного хода. Рассмотрены возможности использования четырехгусеничного хода на тракторах более высокого тягового класса зарубежного и отечественного производства. Проанализирована конструкция гусеничной ходовой тележки трактора RSM 620 DT производства отечественного предприятия «Ростсельмаш». Приведено описание предложенного авторами технического решения индивидуальной гусеничной тележки для четырехгусеничной ходовой системы, обладающего лучшими показателями проходимости, плавности хода и ремонтопригодности.

Ключевые слова: повышение проходимости, сменный колесно-гусеничный ход, четырехгусеничная ходовая система, индивидуальная гусеничная тележка

P. V. Potapov, M. V. Morskov, V. V. Shekhovtsov, M. V. Liashenko

**IMPROVING THE CROSS-COUNTRY ABILITY OF AGRICULTURAL
TRACTORS ON SOILS WITH LOW LOAD-BEARING CAPACITY**

Volgograd State Technical University

The article considers the problem of the need to have tracked vehicles in the Russian agricultural tractor fleet to perform agricultural work on waterlogged soils during the spring and autumn thaw. Constructive measures to improve the cross-country ability of wheeled tractors on low-load-bearing soils are analyzed. The possibility of using a replaceable wheel-track mover on tractors of class 1,4 to ensure proper cross-country ability is considered. The possibilities of using a four-track drive on tractors of a higher traction class of foreign and domestic production are considered. The design of the tracked running trolley of the RSM 620 DT tractor produced by the domestic enterprise Rostselmash is analyzed. The authors describe the technical solution of an individual crawler track for a four-track running system, which has the best performance indicators, smoothness and maintainability.

Keywords: improving cross-country ability, replaceable wheel-track mover, four-track running system, individual crawler track

Введение

Значительная часть европейской территории России находится в зоне рискованного земледелия. В связи с климатическими условиями на этих территориях полевые работы необходимо начинать ранней весной, практически

сразу после схода снега, а заканчивать поздней осенью, во время осенней распутицы. Для этого необходима техника с высокой проходимостью. В качестве такой техники широко использовались гусеничные сельскохозяйственные тракторы производства Волгоградского тракторно-

го завода. Этот завод был в свое время крупнейшим в мире производителем гусеничных сельскохозяйственных тракторов. К сожалению, вследствие бурной турбулизации экономики страны в 90-е годы завод прекратил свое существование. Однако проблема необходимости обработки почвы в период весенней и осенней распутиц никуда не исчезла.

В настоящее время в фермерских хозяйствах основная нагрузка по обработке почвы падает на колесные тракторы, большую часть из которых составляют универсально-пропашные тягового класса 1,4. Для повышения их производительности используются следующие конструктивные мероприятия:

1. Уширители колес.
2. Накладные почвозацепы.
3. Разная ширина колеи передних и задних колес.
4. Добавочные грузы (балластирование).
5. Блокировка дифференциала.
6. Изменение внутришинного давления.
7. Сдвигание и страивание колес.
8. Полугусеничный ход.
9. Дифференциация массы.

Однако такие способы и средства повышения тягово-сцепных свойств колесных тракторов, как накладные почвозацепы, уширители колес, разная ширина колеи передних и задних колес и даже полугусеничный ход не получили широкого внедрения, а балластирование, дифференциация массы, блокировка дифференциала, изменение внутришинного давления, сдвигание и страивание колес не дают необходимого приращения тягового усилия трактора, оставляя его в своем тяговом классе [1; 2].

Использование колесных универсально-пропашных тракторов на энергоемких технологических операциях, таких как вспашка, дискование, вместо гусеничных тракторов третьего тягового класса неэффективна. Так, стоимость вспашки 1 га зяби МТА с трактором МТЗ-80/82 на 40 % выше, чем МТА с трактором ДТ-75М. Неэффективность проявляется и при предпосевной обработке почвы: сроки выезда на поле колесных тракторов на 5–7 дней позже гусеничных по причине высокого буксования ведущих колес [1; 2].

Результаты расчетного сравнения показателей гусеничных и сельскохозяйственных тра-

кторов [3] показало, что применение трактора АГРОМАШ 90ТГ на взрыхленных почвенных фонах по сравнению с трактором МТЗ-82.1 дает сокращение погектарного расхода топлива на большинстве операций на 10–30 % при большей (на 25–30 %) производительности при более низком буксовании, а также меньшее вредное воздействие на почву.

1. Использование сменного колесно-гусеничного хода на тракторах класса 1,4

Большую часть периода эксплуатации колесные тракторы класса 1,4 используются на колесном ходу, а повышение их тяговых свойств требуется только в период распутицы. Поэтому рядом исследователей предложен рациональный способ повышения этих свойств за счет использования сменного колесно-гусеничного хода. Например, такое техническое решение предлагается в следующем патенте [4].

Предложенная авторами тележка гусеничная сменная для транспортного средства (рис. 1) содержит гусеницу 1, звездочку 2, сдвоенные передний 3 и задний 4 опорно-натяжные катки, которые посредством переднего 5 и заднего 6 балансиров соединены с пружиной 7 и связаны шарнирно с балансирной балкой 8. Балансирная балка 8 выполнена с направляющей для пружины 9, и ось ее качания 10 крепится посредством коромысла 11 к рукаву трактора 12. Опорно-натяжные катки 3 и 4 выполнены с возможностью перемещения в продольно-вертикальной плоскости и регулирования угла их наклона к балансирной балке 8 при помощи винта-упора 13 переднего и винта-упора 14 заднего балансиров.

Сменная гусеничная тележка устанавливается вместо каждого ведущего колеса посредством простейших инструментов. Зубья звездочки 2 входят в зацепление с гнездами в гусенице 1, при вращательном движении звездочки 2 они тянут гусеницу 1, приводя в движение трактор. Сдвоенные передний 3 и задний 4 опорно-натяжные катки поворачиваются вокруг своих осей вместе со звеньями гусеницы 1. Натяжение гусеницы 1 постоянно и обеспечивается массой трактора, передаваемой через опорно-натяжные катки 3 и 4.

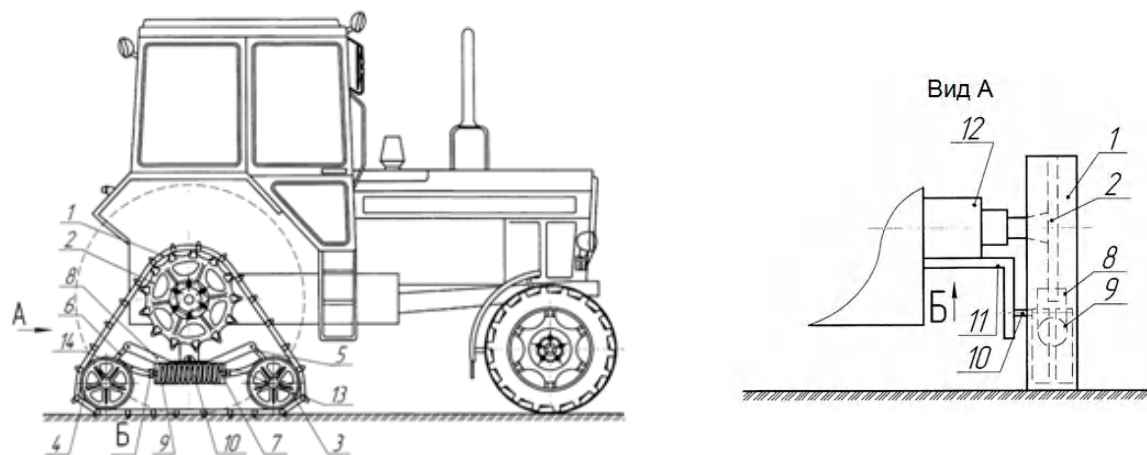


Рис. 1. Техническое решение тележки:

1 – гусеница; 2 – зуб звездочки; 3, 4 – опорно-натяжные катки; 5 – передний балансир; 6 – задний балансир; 7, 9 – пружины; 8 – балансирная балка; 10 – ось качания; 11 – коромысло; 12 – рукав трактора; 13 – винт-упор переднего балансира; 14 – винт-упор заднего балансира

При езде по деформируемой почве или неровностям происходит незначительное перемещение против хода движения переднего балансира 5, винта-упора переднего балансира 13, сжатие пружины 7, а также перемещение по ходу движения заднего балансира 6, винта-упора заднего балансира 14 и сжатие пружины 9. Поверхностный слой или неровность оказываются охваченными натянутой гусеницей, прогнувшейся на высоту осадки опорно-натяжных катков в почву или на высоту неров-

ности. Тем самым улучшаются эксплуатационные характеристики, увеличивается скорость перемещения трактора по неровной поверхности без вибраций, снижается буксование и разрушительное воздействие на плодородный слой почвы.

Известны также технические решения сменных гусеничных тележек, в которых используется эластичная гусеница из полимерных материалов. Такая конструкция (рис. 2) описана, например, в патенте [5] иностранных авторов.

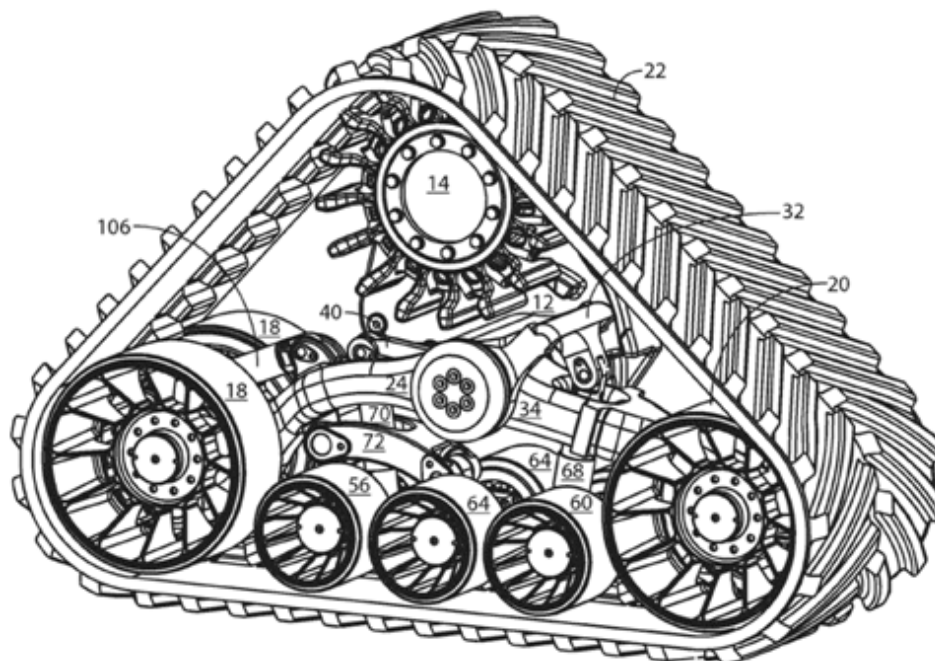


Рис. 2. Гусенично-модульное устройство для транспортного средства:

12 – рама; 14 – ведущее колесо; 18 – переднее направляющее колесо; 20 – заднее направляющее колесо; 22 – полимерная гусеничная лента; 24 – передний рычаг подвески; 32 – задний конец подвески переднего рычага; 34 – задний рычаг подвески; 40 – передний конец подвески заднего рычага; 56, 60, 64 – опорные катки; 68 – передний элемент подвески; 70 – задний элемент подвески; 72 – рычаг узла каретки; 106 – натяжной элемент

Гусенично-модульное устройство для транспортного средства содержит модульную раму 12, ведущее колесо 14, вращающееся относительно рамы 12, соприкасающиеся с землей передние и задние направляющие колеса 18, 20, опорные катки 56, 64, 60 и полимерную гусеничную ленту 22, обернутую вокруг колес и приводимую в движение за счет ее зацепления с ведущим колесом 14. Устройство также содержит передний 24 и задний рычаги подвески, узел каретки, передний и задний элементы 68, 70 подвески. Передний рычаг 24 подвески прикреплен с возможностью поворота к раме 12 и назад к заднему концу 32 подвески. Передний и задний элементы 68, 70 подвески прикреплены с возможностью поворота к заднему и переднему концам подвески соответственно.

За счет того, что данное гусенично-модульное устройство содержит шарнирно-сочлененный узел каретки и каждая ось может двигаться вертикально независимым образом, обеспечиваются равномерное распределение вертикальной нагрузки по осям, лучшее приспособление к неровностям почвенного фона и меньший износ полимерной гусеницы.

2. Использование четырехгусеничного хода на тракторах более высокого тягового класса

В настоящее время в ряде областей России в связи с появлением крупных фермерских хозяйств все большее распространение получают колесные сельскохозяйственные тракторы тяговых классов 5, 10, 15, 20 и даже 35. Их ос-

новным преимуществом является существенно более высокая производительность. Среди них известны машины зарубежных фирм, таких, как «McCORMICK» (Италия), «Зумлион» (КНР), «Мэсси Фергюссон» (США), «Кейс» (США), «Дойц Фар» (ФРГ), «Фендт» (ФРГ), «Джон Дир» (США), «Штайер» (Австрия), «Перкинс» (Великобритания) и других. Несмотря на то, что эти тракторы обладают достаточно высокой проходимостью и в ряде случаев позволяют сдвигать ведущие колеса, во время распутицы эта проходимость оказывается недостаточной и не позволяет этим машинам эффективно работать на переувлажненных почвах. Поэтому созданы конструкции некоторых из этих машин с полугусеничным ходом или со сменным колесно-гусеничным ходом [6; 7; 8; 9; 10; 11]. Достаточно часто для работы во время распутицы на такие машины устанавливают не две, а четыре гусеницы, что обеспечивает мощным и тяжелым машинам возможность за счет существенного (в разы) уменьшения удельного давления на почву производить сельскохозяйственные операции на почвах с высокой влагонасыщенностью. Так, расчетный анализ [12] показал, что переоборудование трактора ХТЗ-150К-09 на гусеничный ход дает снижение удельных давлений, повышение эффективности машины, а также переводит ее в 4-й тяговый класс. В частности, такой трактор выпущен в Белоруссии Минским тракторным заводом (рис. 3).



Рис. 3. Трактор Беларусь 3525.6

Известны и конструкции таких тракторов с шарнирно-сочлененной рамой (рис. 4), что

обеспечивает этим крупным машинам лучшую поворачиваемость и маневренность.



Рис. 4. Трактор John Deere 9rx 640

Но это все тракторы зарубежных компаний, приобретение и эксплуатация которых сопряжены с существенными материальными затратами. Также на рынке присутствуют зарубежные фирмы, предлагающие комплекты для переоборудования колесных тракторов на гусеничный ход: Poluzzi, Camso, Zuidberg, Lynx, Mattracks и другие. Однако в условиях санкций использование их продукции нецелесообразно, да и часто невозможно.

Тем временем в российском сельском хозяйстве существует настоятельная потребность в отечественных машинах такого рода. И в этом большие надежды возлагаются на продукцию Ростсельмаша.

Впервые за последние более чем полстолетия в России построен новый завод полного производственного цикла по выпуску тракторов. Торжественное открытие тракторного завода транснациональной корпорации RSM («Ростсельмаш») состоялось 5 марта 2024 года. Он предполагает выпускать модельный ряд тракторов серий 2000 и 3000. Среди них – лидер модельного ряда RSM 620 DT (DELTATRACK) (рис. 5) – универсальный полноприводный трактор на гусеничном ходу с шарнирно-сочлененной рамой [13]. На сегодня это самый мощный гусеничный трактор российского производства.

Конструкция гусеничной ходовой тележки трактора представлена на рис. 6.



Рис. 5. Трактор RSM 620 DT

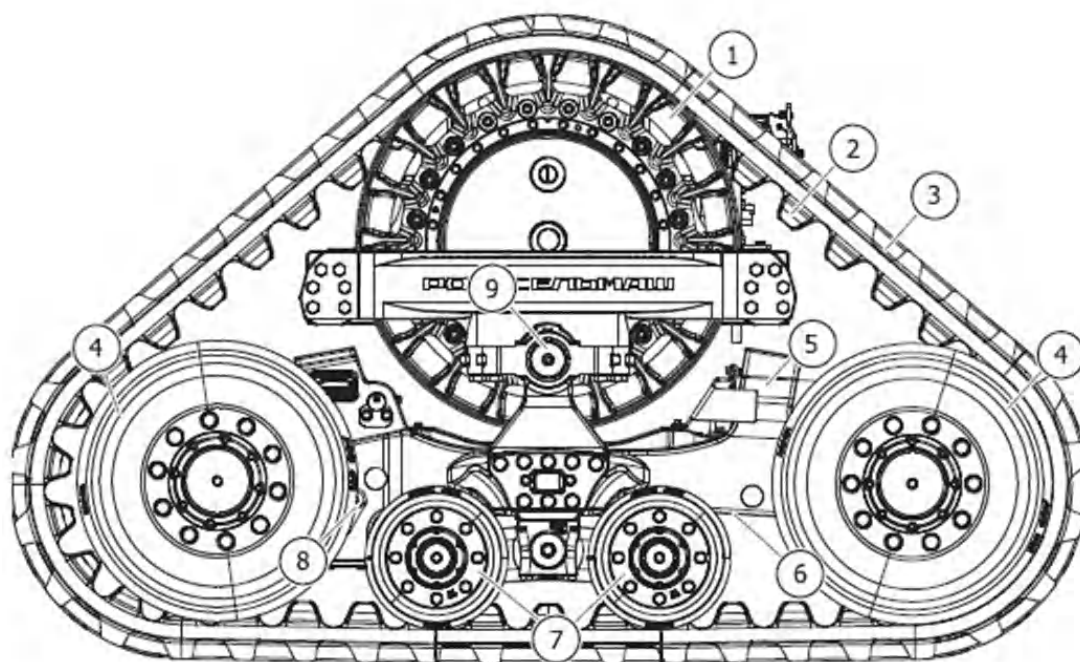


Рис. 6. Гусеничная ходовая тележка трактора RSM 620 DT:

1 – ведущее колесо; 2 – гребень гусеничной ленты; 3 – гусеничная лента; 4 – натяжное колесо; 5 – заправочный штуцер механизма натяжения; 6 – рама гусеничной тележки; 7 – опорные катки; 8 – устройство выравнивания; 9 – ось качания каретки опорных катков

Следует отметить, что, во-первых, в ходовой тележке всего два опорных катка, а большее их число должно способствовать лучшему распределению веса трактора по внутренней поверхности гусеницы, снижению среднего удельного давления на почву, то есть повышению проходимости.

Во-вторых, в конструкции тележки практически отсутствует система поддрессоривания, основную функцию которой здесь выполняет резиноармированная гусеница. Но сельскохозяйственный трактор основные работы выполняет на поле с движением как вдоль, так и поперек борозды с преодолением существенных неровностей почвы, поэтому гусеничные сельскохозяйственные трактора производства ВгТЗ были оборудованы эластичной пружинной подвеской. Поэтому вероятно, что нормированная плавность хода, то есть один из основных параметров гусеничной машины, вряд ли может быть обеспечена.

В-третьих, для гусеничных тракторов весом свыше 30 тонн проведение ремонтных или технологических работ связано с рядом трудностей, обусловленных большим весом ходовой тележки, что практически исключает применение ручного труда для демонтажа или монтажа узлов и требует применения механизации, подъемного оборудования и т. д. Таким обра-

зом, основная проблема выше описанной ходовой тележки в части ее ремонтпригодности заключается в том, что такие работы можно проводить только в заводских условиях. К этому еще приплюсовываются трудности с перемещением гусеничной машины такого веса к ремонтной площадке.

Для тяжеловесных гусеничных машин невозможность проведения ремонтных работ по месту нахождения машины приводит к потере рабочего времени, простоя оборудования и увеличению времени на проведение той работы, для которой эта машина предназначена.

Эти особенности затрудненного ремонта обусловлены компоновочным построением ходовой тележки. При сохранении традиционной схемы по размещению основных узлов ходовая тележка не предусматривает возможности демонтажа отдельных узлов без демонтажа тележки с машины.

3. Предложенная конструкция ходовой тележки

С целью устранения описанных выше недостатков авторами предложено усовершенствованное техническое решение индивидуальной гусеничной тележки, кинематическая схема которой представлена на рис. 7.

Созданы также комплект плоских и пространственных чертежей деталей нового техни-

ческого решения тележки и ее трехмерная модель (рис. 8.).

В отличие от конструкции, представленной на рис. 6, новое техническое решение тележки включает в себя (рис. 7) четыре опорных катка 4, 5, 6 и 7, причем сдвоенные катки 4 и 5, 6 и 7 соединены рычагами 14 и 15 соответственно и представляют собой балансирные каретки. Такое решение обеспечивает более существенное снижение удельного давления на почву и связанное с этим повышение проходимости. Кроме того, объединение опорных катков в балансирные каретки обеспечивает улучшение плавности

хода вследствие известного достоинства такого решения: когда под одним опорным катком каретки обнаруживается углубление в почве, а под другим одновременно получается возвышение, то, обкатывая рельеф поверхности, первый каток опускается, второй приподнимается, а за счет шарнирного соединения кареток с рычагами 10, 11 и 17, 18 ось качания рычагов 14 или 15 не меняет своего расположения в вертикальной плоскости, то есть каретка «проглатывает» неровность, а остов трактора ее не ощущает и не совершает вертикального перемещения.

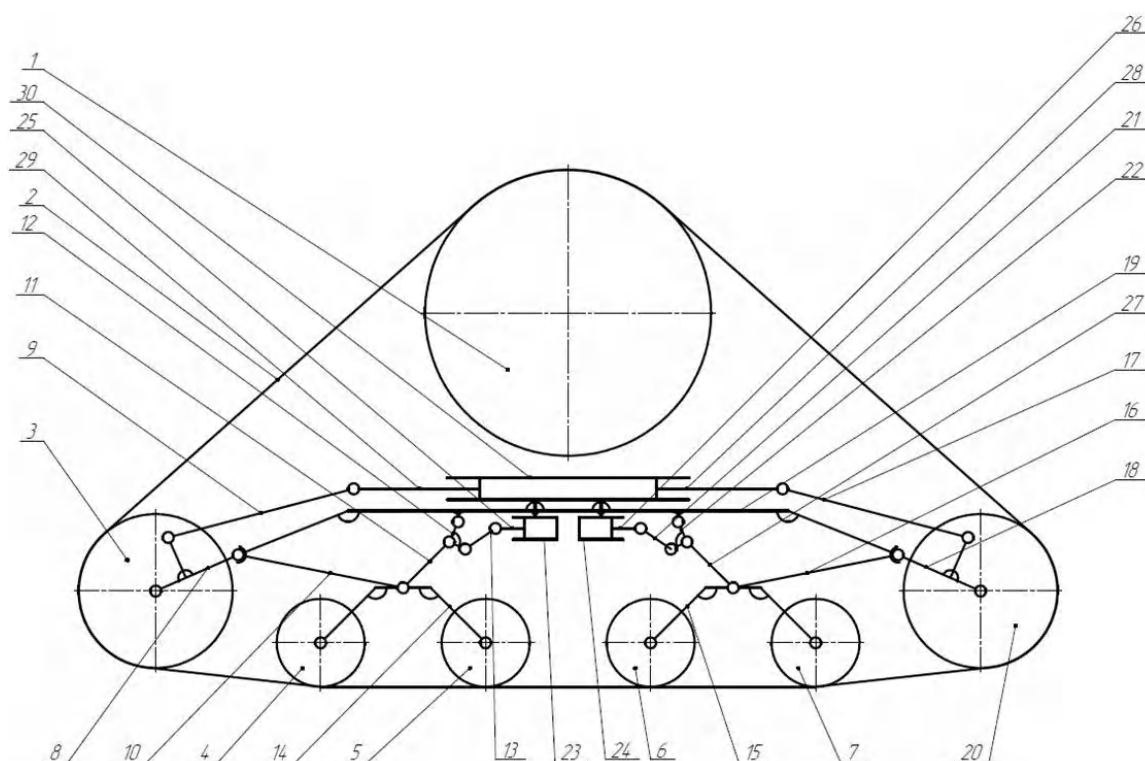


Рис. 7. Кинематическая схема предложенной индивидуальной гусеничной тележки:

1 – колесо ведущее; 2 – резиноматрица гусеницы; 3, 20 – сдвоенные опорные направляющие катки; 4, 5, 6, 7 – сдвоенные опорные катки; 8, 18 – натяжные рычаги; 9, 17 – тяги автоматического натяжного устройства; 10, 16 – рычаги подвески; 11, 27 – толкатели роке-ров; 12, 22 – роке-ры; 13, 21 – толкатели амортизаторов; 14, 15 – каретки балансирные; 19 – рама; 23, 24 – гидроцилиндры; 25, 26 – штоки гидроцилиндров; 28, 29 – штоки сдвоенного гидроцилиндра; 30 – корпус сдвоенного гидроцилиндра

В зависимости от условий проходимости предусмотрена возможность автоматического, по сигналу управляющей программы, изменения положения балансирных кареток по длине опорной ветви гусеницы – возможно сокращать или увеличивать расстояние между ними. При этом штоки 25 и 26 гидроцилиндров вдвигаются или выдвигаются, а через систему рычагов 10, 11, 12 и 16, 17, 22 движение передается соединениям рычагов 14 и 15, за счет чего каретки сближаются или удаляются. Эта операция совмещена с изменением длины опорной по-

верхности самой тележки, так как изменение положения рычагов 10 и 16 изменяет положение сдвоенных опорных направляющих катков 3 и 20 в горизонтальной плоскости. Это один из следующих инструментов управления проходимостью машины за счет изменения площади опорной поверхности под гусеницами.

В конструкции предусмотрен также сдвоенный гидроцилиндр 30, обеспечивающий натяжение гусеничной ленты 2. При этом штоки 28 и 29 гидроцилиндра 30 вдвигаются или выдвигаются, и через шарнирно связанные с ни-

ми рычаги 9 и 17 обеспечивают изменение расстояния между осями сдвоенных опорных направляющих катков 3 и 20, что позволяет обеспечивать либо дополнительное натяжение гусеницы, либо возможность демонтажа

гусеницы в случае необходимости. Поддержание заданного уровня натяжения гусеницы может быть обеспечено автоматически за счет специальной программы бортового компьютера.

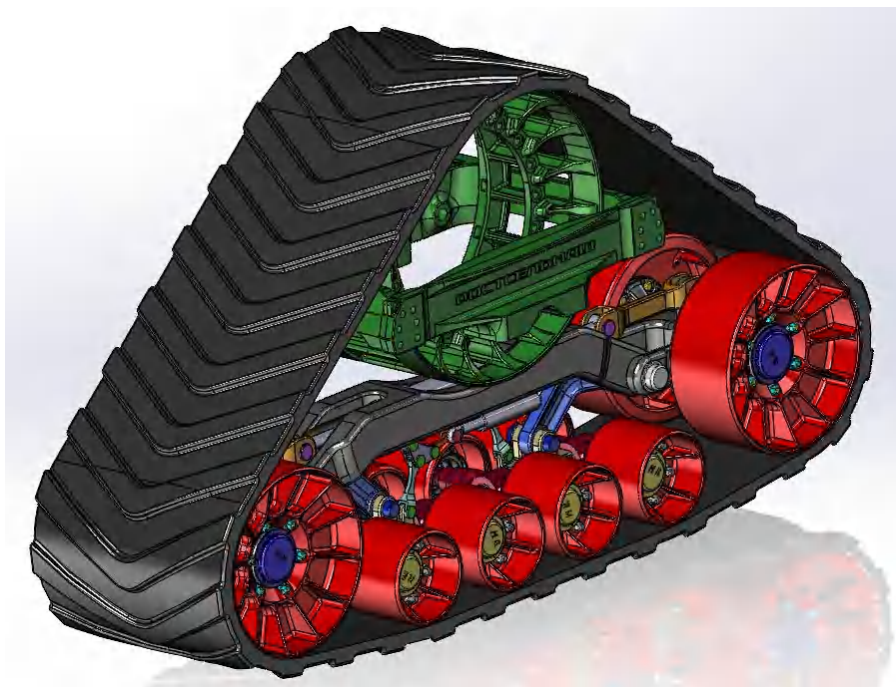


Рис. 8. Трехмерная модель индивидуальной гусеничной тележки

Таким образом, предложенное техническое решение индивидуальной гусеничной тележки обладает следующими достоинствами:

- улучшенной плавностью хода за счет объединения опорных катков в балансирные каретки, что позволяет трактору преодолевать неровности опорной поверхности, шаг и высота которых сравнимы с расстояниями между катками каретки, без изменения вертикального положения остова;
- улучшенной опорной проходимостью за счет использования четырех опорных катков, что уменьшает удельное давление на почву;
- обеспечивает возможность управления площадью опорной поверхности индивидуальной гусеничной тележки в зависимости от условий проходимости;
- обеспечивает возможность автоматического управления натяжением гусеницы;
- обеспечивает возможность простого монтажа/демонтажа резиноармированной гусеничной ленты;
- за счет открытости конструкции обеспечивается возможность быстрого доступа к деталям и узлам для технического обслуживания

шарниров, гидроцилиндров и замены деталей, подверженных быстрому износу.

Заключение

1. Рассмотрена проблема необходимости в парке сельскохозяйственных тракторов России гусеничных машин для выполнения сельскохозяйственных работ на переувлажненных почвах в период весенней и осенней распутиц.
2. Проанализированы конструктивные мероприятия для повышения проходимости колесных тракторов по грунтам с низкой несущей способностью.
3. Рассмотрена возможность использования на тракторах класса 1,4 для обеспечения надлежащей проходимости сменного колесно-гусеничного хода.
4. Рассмотрены возможности использования четырехгусеничного хода на тракторах более высокого тягового класса зарубежного и отечественного производства.
5. Проанализирована конструкция гусеничной ходовой тележки трактора RSM 620 DT производства отечественного предприятия «Ростсельмаш».

6. Приведено описание предложенного авторами технического решения индивидуальной гусеничной тележки для четырехгусеничной ходовой системы, обладающего лучшими показателями проходимости, плавности хода и ремонтпригодности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комкин, А. С. Повышение эффективности универсально-пропашных тракторов тягового класса 1,4 путем замены ведущих колес верхнеприводными гусеницами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киров, 2013.
2. Канделя, М. В. Сменные колесно-гусеничные движители уборочно-транспортных машин / М. В. Канделя, Н. М. Канделя, В. Л. Земляк; Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема. – Биробиджан, 2019. – 117 с.
3. Расчетная оценка топливной экономичности колесных и гусеничного тракторов на возделывании подсолнечника / В. В. Косенко, З. А. Годжаев, П. В. Потапов, М. П. Горюнков // Тракторы и сельхозмашины. – 2023. – Т. 90, № 1. – С. 73–82. – DOI 10.17816/0321-4443-112161.
4. Пат. 2446974 Российская Федерация, МПК B62D 55/04. Тележка гусеничная сменная для транспортного средства / А. А. Лопарев, В. И. Судницын, А. С. Комкин, М. Х. Фасхутдинов, С. А. Лопарев. – 2012.
5. Пат. 2676916 Российская Федерация, МПК B62D 55/104, B62D 55/30. Гусенично-модульное устройство с независимым от нагрузки распределением нагрузки / Тид Дуэйн, Решад Джамшид, Стэйси Тимоти Д., Джанкер Кеннет Дж. – 2016.
6. Емельянов, А. М. Гусеничные зернокомбайны (основы теории и конструктивно-технологические устройства): монография / А. М. Емельянов [и др.]. – Благовещенск: ДальГАУ, 2013. – 285 с.
7. Канделя, М. В. Исследование и обоснование технического уровня различных типов гусеничных ходовых систем уборочно-транспортных машин.: дис. ... канд. техн. наук. – Биробиджан, 1997. – 162 с.
8. Березов В. П. Исследование и обоснование основных параметров гусеничного движителя уборочно-транспортных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Биробиджан, 1997.
9. Климкович, В. А. Оптимизация параметров опорной поверхности гусеничных движителей уборочно-транспортных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. МИИСП, М., 1986, – 19 с.
10. Рябенко, В. Н. Исследование влияния удельного давления на проходимость гусеничного движителя уборочно-транспортных машин: дис. ... канд. техн. наук. – Благовещенск, 1971. – 150 с.
11. Лапик, В. П. Механико-технологические основы взаимодействия гусеничных движителей кормоуборочных машин с переувлажненной пойменной почвой: диссертация ... доктора технических наук: 05.20.01 / Лапик Владимир Павлович; [Место защиты: Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства РАСХН]. – Москва, 2015. – 288 с.
12. Косенко, В. В. Анализ изменения эксплуатационных показателей колесного сельскохозяйственного трактора при переоборудовании на гусеничный ход / В. В. Косенко, Е. А. Федянов, А. И. Искалиев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2021. – № 1(34). – С. 21–27.
13. Трактор сельскохозяйственный гусеничный 3000 DT. Руководство по эксплуатации 3000 DT РЭ 07/2021. – Россельмаш, 2021. – 368 с.

УДК 629.3.018.2

DOI 10.35211/2500-0586-2024-4-49-70-77

А. И. Искалиев, П. В. Потапов, В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, Е. В. Клементьев, А. В. Евсеева

АНАЛИЗ НАГРУЖАЮЩИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ КАБИНЫ ТРАКТОРА

Волгоградский государственный технический университет

asamat-iskaliev@mail.ru, paulflinx@gmail.com, shehovtsov@vstu.ru,
tslmvsturu@mail.ru, e-eevgenii@mail.ru, evseeva_apollinariya@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Искалиев Азамат Ибрагимович, asamat-iskaliev@mail.ru

В современной мировой испытательной практике используется стендовое оборудование, позволяющее реализовывать при испытаниях режимы нагружения, тождественные эксплуатационным по частотному и амплитудному составу воспроизводимых нагрузок. Это оборудование обычно включает в себя гидравлические нагружающие устройства, управляемые электрическим сигналом по заданной программе. Гидравлические исполнительные механизмы в силу таких их преимуществ, как компактность и высокая удельная мощность, малая инерционность рабочих органов, обеспечивают возможность воспроизведения на стенде нагрузок с требуемым законом изменения во времени. В описываемой конструкции стенда использованы подобные гидронагружатели. Для проведения ресурсных испытаний на стенд устанавливаются виброизоляторы с разными габаритными и упруго-диссипативными характеристиками, поэтому для испытаний каждой их партии должны быть подобраны нагрузочные характеристики стенда. Анализ возможностей воспроизведения на стенде необходимых нагрузочных характеристик для испытаний виброизолятора кабины трактора посвящена настоящая статья.

Ключевые слова: испытательный стенд, виброизоляторы, кабина, трактор, нагрузочные режимы, привод стенда

A. I. Iskaliev, P. V. Potapov, V. V. Shekhovtsov, M. V. Liashenko, E. V. Klementiev, A. V. Evseeva

ANALYSIS OF THE LOADING CAPABILITIES OF THE TRACTOR CAB VIBRATION ISOLATOR TEST STAND

Volgograd State Technical University

In modern world testing practice, bench equipment is used, which makes it possible to implement loading modes during testing that are identical to the operational ones in terms of the frequency and amplitude composition of the reproduced loads. This equipment usually includes hydraulic loading devices that are controlled by an electrical signal according to a given program. Hydraulic actuators, due to their advantages such as compactness and high specific power, low inertia of the working bodies, make it possible to reproduce loads with the required law of change in time on the stand. In the described design of the stand, similar hydraulic loaders are used. For carrying out life tests, vibration isolators with different dimensional and elastic-dissipative characteristics are installed on the stand, so the load characteristics of the stand must be selected for testing each batch of them. This article is devoted to the analysis of the possibilities of reproducing the necessary load characteristics on the stand for testing the vibration isolator of the tractor cab.

Keywords: test stand, vibration isolators, cabin, tractor, loading regimes, stand drive

Введение

В эксплуатации виброизоляторы кабины трактора одновременно испытывают нагрузки от вертикальных, продольно- и поперечно-угловых колебаний кабины, которые отличаются амплитудами, частотами и характером изменения во времени [2; 3; 4; 7].

Для воспроизведения в стендовых условиях нагружающих воздействий на виброизолятор, эквивалентных эксплуатационным, необходимо в эксплуатационном спектре выделить основные составляющие с их амплитудами и частотами. Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено [1; 2; 3], что основными в спектрах являются вертикальные вибровоздействия в диапазоне частот от 0 до 4 Гц с пиковыми значениями ускорений в диапазоне $0,173...0,5 \text{ м/с}^2$. В работе [4] показано, что основная часть энергии вертикальных колебаний кабины приходится на низкочастотный диапазон возмущений от 1 до 4 Гц (более половины от всей энергии процесса). В этом диапазоне имеют место и максимальные амплитуды вертикальных колебаний. Так, в работе [23] приведен диапазон ($0,003...0,006 \text{ м}$) экспериментально определенных амплитуд вертикальных перемещений в эксплуатации кабины колесного трактора К-708.4, поддрессоренной четырьмя резинометаллическими виброизоляторами АКСС-400М.

Установлено также, что энергия вертикальных колебаний кабины в разы превышает энергию продольно- и поперечно-угловых колебаний, поэтому основная нагруженность виброизолятора определяется именно вертикальными

колебаниями. Таким образом, необходимо, чтобы нагрузочные характеристики стенда обеспечивали возможность воспроизведения нагруженности испытуемого виброизолятора, эквивалентной эксплуатационной.

1. Конструкция стенда

В ВолгГТУ на протяжении ряда лет ведутся разработки стендового оборудования, результаты этих работ представлены в следующих публикациях [4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19]. Авторами предложено и запатентовано [17] техническое решение стенда с гидравлическими нагружающими устройствами, позволяющего воспроизводить на испытуемых виброизоляторах нагрузочные режимы, эквивалентные эксплуатационным. В этом стенде возможность воспроизведения вибронагрузок, действующих на виброизолятор одновременно в трех плоскостях, обеспечивается тремя ориентированными в вертикальном, продольно-осевом и поперечно-осевом направлениях гидронагружателями (рис. 1).

Нагрузочная платформа 2 стенда (рис. 1) имитирует поддрессоренную испытуемым виброизолятором 3 кабину трактора. Гидронагружатели 1 в зависимости от программы испытаний могут обеспечивать одно-, двух- или трехкомпонентное нагружение испытуемого виброизолятора 3 по взаимно перпендикулярным направлениям через нагрузочную платформу 2. Стойки 5 предназначены для ограничения угловых перемещений нагрузочной платформы 2. Платформа 6 имитирует поддрессоренный остов трактора [17].

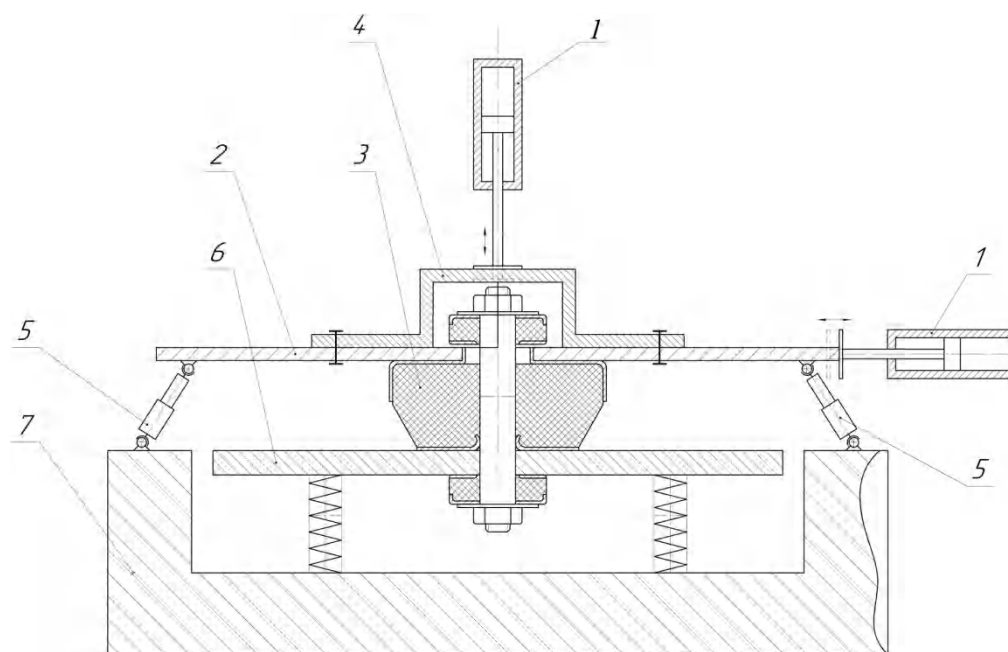


Рис. 1. Стенд для испытаний виброизоляторов:
 1 – гидронагружатель; 2 – нагрузочная платформа; 3 – испытуемый виброизолятор;
 4 – крышка; 5 – стойки; 6 – платформа; 7 – основание

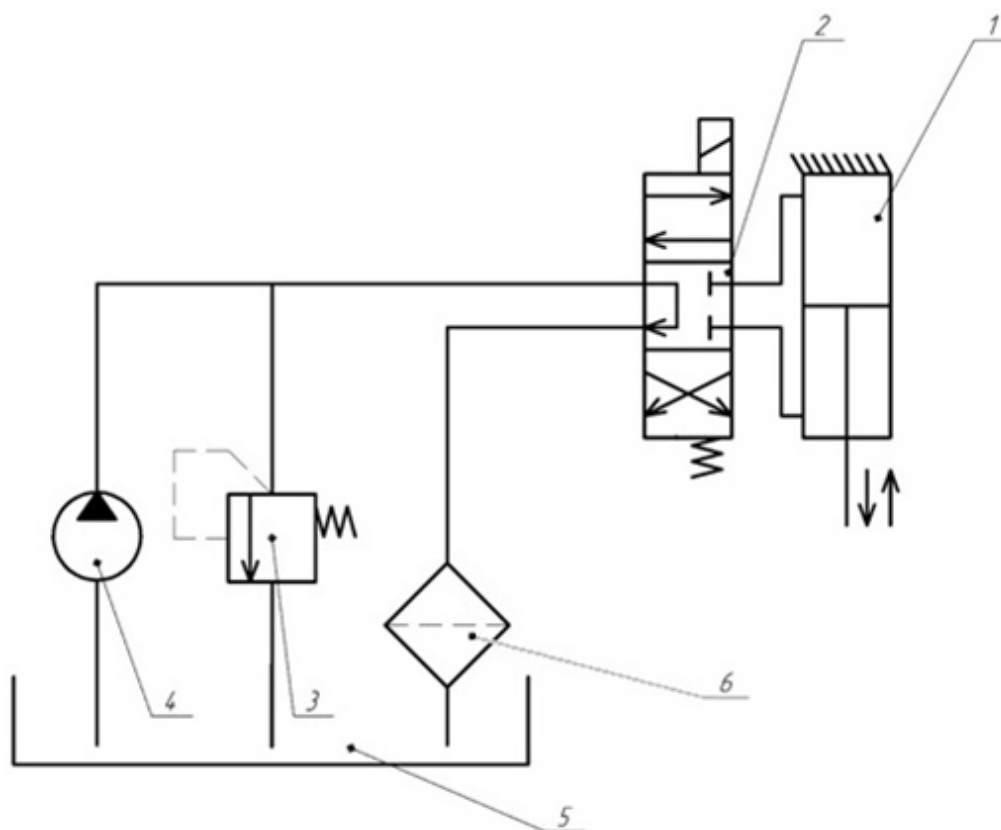


Рис. 2. Гидравлическая схема управления нагрузателем стенда:
 1 – гидронагружатель; 2 – гидрораспределитель с электромагнитным управлением;
 3 – предохранительный клапан; 4 – насос; 5 – бак; 6 – фильтр

Каждый гидронагружатель 1 стенда (рис. 2) включает в себя гидроцилиндр, надпоршневая и подпоршневая полости которого соединены с насосом 4 и баком 5 через гидрораспределитель 2 с электромагнитным управлением, который осуществляет переключение потоков рабочей жидкости в гидросистеме с задаваемой частотой при реализации режима нагружения. Предохранительный клапан 3 защищает гидросистему от несанкционированных скачков давления.

Техническое решение стенда обладает следующими достоинствами:

- возможность одновременного воспроизведения на испытуемом виброизоляторе нагрузок эксплуатационного характера от вертикаль-

ных, продольно- и поперечно-угловых колебаний кабины трактора;

- возможность регулирования частоты нагружающих воздействий;

- возможность реализации законов нагружения с различными амплитудами нагрузок и характером их изменения во времени.

2. Нагружающее оборудование

Для привода гидронагружателей в гидросистеме стенда предложено использовать насос НШ-10, широко применяемый в гидросистемах тракторов. Его техническая характеристика приведены в таблице, а зависимость производительности от давления показана на рис. 3 [22].

Техническая характеристика насоса НШ-10

Параметр	Значение
Номинальная подача, $\text{м}^3 / \text{с}$	0,00035
Номинальное давление, МПа	16
Максимальное давление, МПа	21
Коэффициент подачи, не менее	0,92
КПД, не менее	0,8
Номинальная потребляемая мощность, кВт, не более	8,6
Масса, кг	2,58
Номинальная частота вращения, об/мин	2400

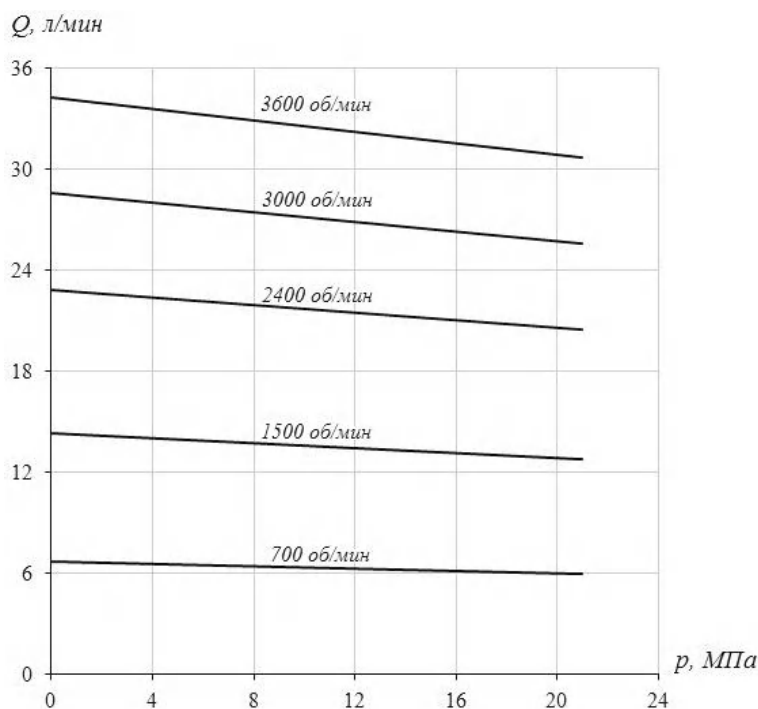


Рис. 3. Характеристика насоса НШ-10 и его внешний вид

В гидросистеме также использованы гидрораспределитель золотниковый В10, фильтр сетчатый типа ФС-7, установленный на линии слива, гидроцилиндр Ц100х200-3, бак для рабочей жидкости объемом 100 л, рабочая жидкость – масло И-40А.

В расчете потенциальных нагрузочных характеристик стенда в низкочастотной области (до 4 Гц) влияние на динамику процессов сжимаемости рабочей жидкости в гидросистеме, изменений при этом объема металлических трубопроводов несущественно, и им можно пренебречь. Также в данной области обеспечивается гарантированная возможность работы управляющих элементов гидросистемы стенда – гидрораспределителей с электромагнитным управлением, и исполнительных механизмов – гидроцилиндров. Из-за инерционности этих устройств воспроизведение нагрузок в более высоком диапазоне частот представляется затруднительным.

3. Определение нагрузочных характеристик стенда

Так как основные нагрузки на виброизолятор в эксплуатации действуют в вертикальном направлении, определение нагружающих возможностей стенда, то есть его нагрузочных ха-

рактеристик, выполнено для вертикального гидронагружателя.

Частота гармонического вертикального воздействия нагружателя на испытуемый виброизолятор с учетом реализации необходимого перемещения штока находится по формуле (1):

$$f = \frac{2 \cdot Q}{\pi^2 \cdot D^2 \cdot s}, \quad (1)$$

где Q – текущая подача насоса, $\text{м}^3/\text{с}$; D – диаметр поршня гидравлического привода нагружателя стенда, м ; s – реализуемая амплитуда перемещения штока, м .

Величина усилия вертикального воздействия нагружателя стенда на испытуемый виброизолятор определяется по формуле (2):

$$F = (p - \Delta p) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \eta_u^{\text{мех}}, \quad (2)$$

где p – текущее давление рабочей жидкости, создаваемое насосом в гидравлической системе, Па; Δp – суммарные потери давления рабочей жидкости в гидравлической системе (в расчете использовалось предельно допустимое значение, равное 6 % от номинального давления рабочей жидкости, создаваемое насосом [21]), Па; $\eta_u^{\text{мех}}$ – механический КПД гидроцилиндра ($\eta_u^{\text{мех}} = 0,95$).

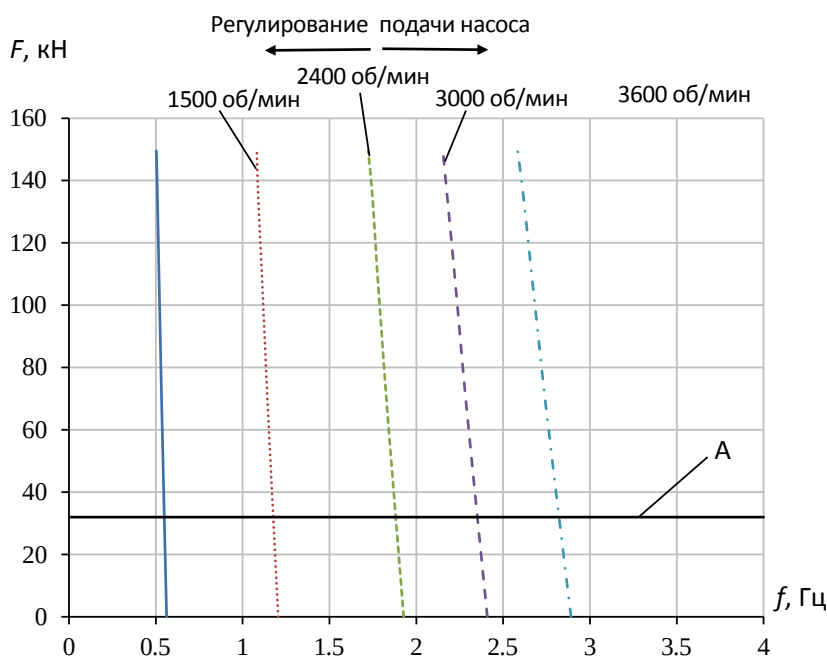


Рис. 4. Диапазон возможных амплитуд вертикальных нагрузок на испытуемый виброизолятор АКСС-400М при $s = 0,004$ м; А – усилие упругого сопротивления испытуемого виброизолятора



Рис. 5. Общий вид виброизолятора АКСС-400М

Результаты расчетов приведены на рис. 4, на котором представлены зависимости усилия, соз-

даваемого гидронагружателем в вертикальном направлении, от частоты гармонических возму-

щений (для примера выбрана амплитуда перемещений 0,004 м). Частотный диапазон вертикального силового воздействия на испытуемый виброизолятор АКСС-400М (рис. 5) при этом составил 0,549...2,822 Гц. Результат получен путем сопоставления характеристики выбранного насоса и возможных потерь в системе с конструктивными параметрами гидравлического привода.

Диапазон значений возможных при этом

амплитуд деформаций испытуемого виброизолятора можно рассчитать, преобразовав формулу (1) следующим образом (3):

$$s = \frac{2 \cdot Q}{\pi^2 \cdot D^2 \cdot f} \quad (3)$$

На рис. 6 представлены результаты расчетных исследований диапазона амплитуд, выполненных с использованием этой формулы (3).

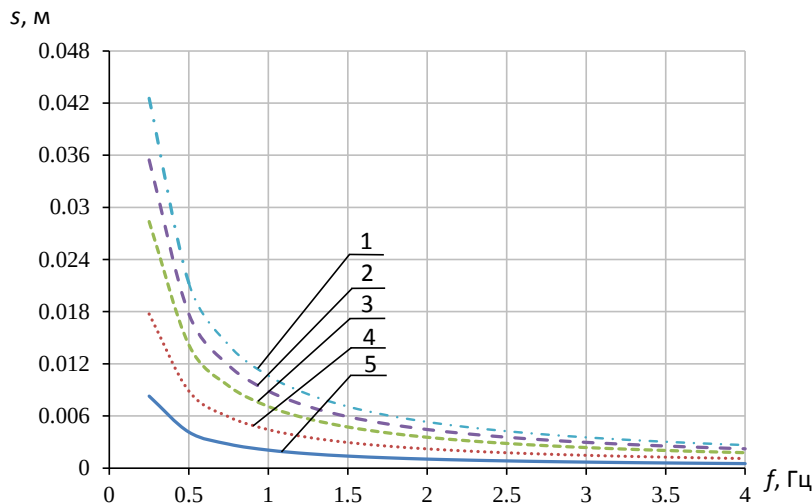


Рис. 6. Диапазон возможных амплитуд деформаций испытуемого виброизолятора при регулировании подачи насоса:

1 – 3600 об/мин, 2 – 3000 об/мин, 3 – 2400 об/мин, 4 – 1500 об/мин, 5 – 700 об/мин

Регулирование подачи выбранного насоса за счет повышения частоты вращения его вала в соответствии с результатами расчетных исследований (рис. 6) приводит к росту амплитуд перемещений штока гидронагружателя в частотном диапазоне от 0 до 4 Гц. При этом чем ниже задаваемая системой электромагнитного управления гидрораспределителя частота возмущений, тем более существенен прирост этих амплитуд.

Выполнено также расчетное исследование зависимости характеристик согласования управляющих параметров насоса (частоты вращения вала) и гидрораспределителя с электромагнитным управлением (частоты переключения), результаты которого представлены на рис. 7. Полученные зависимости позволяют определять либо корректировать амплитуду перемещений штока гидронагружателя.

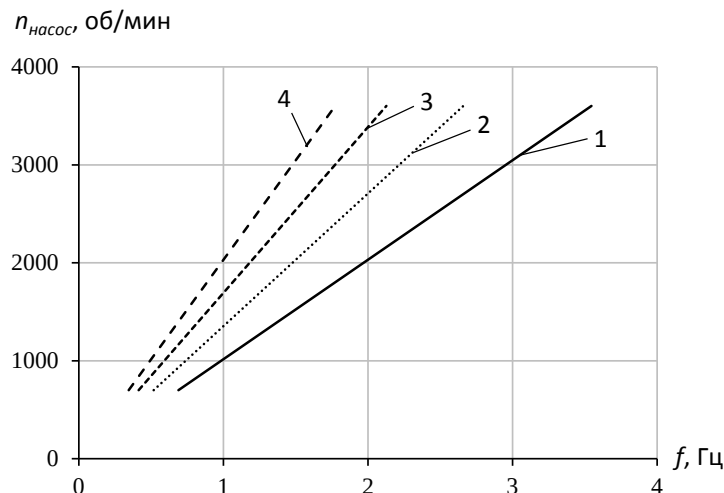


Рис. 7. Характеристика согласования частоты вращения вала насоса при реализации амплитуд перемещений штока гидроцилиндра:

1 – при $s = 0,003$ м ; 2 – при $s = 0,004$ м ; 3 – при $s = 0,005$ м ; 4 – при $s = 0,006$ м

Определен также возможный диапазон частотного регулирования гидрораспределителей с электромагнитным управлением при реализации возмущений в диапазоне от 0,003 до 0,006 м, характерных для виброизоляторов кабин колесных тракторов семейства «Кировец» [23] – он составил величины от 0,345 до 3,546 Гц.

Заключение

1. Разработан стенд для испытаний виброизоляторов кабины трактора с использованием гидронагружателей, обеспечивающий возможность одновременного воспроизведения на испытуемом виброisolаторе нагрузок эксплуатационного характера от вертикальных, продольно- и поперечно-угловых колебаний кабины (патент на полезную модель № RU 218642).

2. Предложена методика расчета характеристик гидронагружателей стенда, учитывающая возможные механические потери в гидроцилиндрах, объемные потери в насосах, потери давления рабочей жидкости в гидрелиниях, гидрораспределителях и т. д.

3. Определены и представлены графически возможные частотный и амплитудный диапазоны вертикального силового воздействия во время испытаний на виброisolатор АКСС-400М.

4. Определен возможный диапазон частотного регулирования гидрораспределителей с электромагнитным управлением для реализации возмущений, характерных для эксплуатации виброisolатора АКСС-400М, он составил от 0,345 до 3,546 Гц при реализации возмущений с амплитудами в диапазоне от 0,003 до 0,006 м.

5. Предложенная методика определения нагружающих характеристик стенда и полученные при ее использовании результаты расчетов исследований могут быть использованы в дальнейшем при проектировании стендов с гидравлическими исполнительными механизмами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Модель подвески кабины трактора / А. В. Победин, О. Д. Косов, В. В. Шеховцов, К. В. Шеховцов // Прогресс транспортных средств и систем – 2009: матер. междунар. н.-пр. конф., Волгоград, 13–15 окт. 2009 г.: в 2 ч. Ч. 1 / ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2009. – С. 222–223.
2. Разработка модели и расчетные исследования подвески кабины транспортного средства / В. В. Шеховцов, А. В. Победин, М. В. Ляшенко, К. В. Шеховцов // Проектирование колесных машин: матер. всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию начала подгот. инж. по автомобильной специальности в МГТУ им. Н. Э. Баумана (25–26 дек. 2009 г.) / ГОУ ВПО «МГТУ им. Н. Э. Баумана». – М., 2010. – С. 184–188.
3. Победин, А. В. Расчетные исследования для совершенствования подвески кабины автомобиля / А. В. Победин, В. В. Шеховцов, К. В. Шеховцов // Какой автомобиль нужен России?: матер. 69-й междунар. науч. техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) / ГОУ ВПО «Сибирская гос. автомоб.-дор. академия (СибАДИ)» [и др.]. – Омск, 2010. – С. 112–117.
4. Стендовое оборудование для испытаний виброизоляторов кабины трактора / З. А. Годжаев, А. В. Победин, М. В. Ляшенко, К. В. Шеховцов // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 3. – С. 43–48.
5. Победин, А. В. Испытания виброизоляторов на стенде / А. В. Победин, К. В. Шеховцов // Известия ВолгГТУ: междуз. сб. науч. ст. № 12 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Наземные транспортные системы»; вып. 4). – С. 41–43.
6. Шеховцов, К. В. Испытания виброизоляторов кабины трактора [Электронный ресурс] / К. В. Шеховцов // Инженерный вестник Дона: электронный журнал. – 2012. – № 1. – С. – Режим доступа: URL: <http://ivdon.ru/magazine/latest/n1y2012/639/>.
7. Ляшенко, М. В. Лабораторная установка для испытаний виброизоляторов / М. В. Ляшенко, А. В. Победин, К. В. Шеховцов // Вестник Академии военных наук. – 2011. – № 2 (спецвыпуск). – С. 270–274.
8. Шеховцов, В. В. Экспериментальное определение характеристик виброизоляторов кабины трактора / В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, В. П. Шевчук, Н. С. Соколов-Добрев, К. В. Шеховцов // Международный научно-исследовательский журнал = Research Journal of International Studies. – 2013. – № 7–2. – С. 118–122.
9. Шеховцов, В. В. Стендовое оборудование для испытаний виброизоляторов кабины трактора / В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, В. П. Шевчук, Н. С. Соколов-Добрев, К. В. Шеховцов // Международный научно-исследовательский журнал = Research Journal of International Studies. – 2013. – № 7–2. – С. 135–138.
10. Стенд для испытаний виброизоляторов [Электронный ресурс] / К. В. Шеховцов, А. В. Победин, М. В. Ляшенко, В. В. Шеховцов // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: матер. междунар. науч.-техн. конф. Ассоциации автомоб. инж. (ААИ), посвящ. 145-летию МГТУ «МАМИ» / Моск. гос. техн. ун-т «МАМИ». – М., 2010. – Кн. 1 (Секция 1). – С. 336–341. – Режим доступа: URL: www.mami.ru/science/mami145/scienti-fic/S_01.htm.
11. Шеховцов, К. В. Vibration Isolators's Laboratory Testing Plant / К. В. Шеховцов, А. В. Победин, О. Д. Косов // 30th Anniversary Seminar of the Students' Association for Mechanical Engineering (11-13.05.2011, Warsaw, Poland): book of Abstracts / Military University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering. – Warsaw, 2011. – S. 66–67. – Англ.
12. П. м. 104714 РФ, МПК G 01 M 7/02. Стенд для испытаний виброизоляторов / В. В. Шеховцов, А. В. Победин, Вл. П. Шевчук, М. В. Ляшенко, К. В. Шеховцов, Д. В. Бусалаев; ГОУ ВПО «Волгогр. гос. техн. ун-т». – 2011.
13. П. м. 118056 РФ, МПК G 01 M 7/02. Стенд для испытаний виброизоляторов в режиме вынужденных и собственных колебаний / К. В. Шеховцов, А. В. Победин, Вл. П. Шевчук, М. В. Ляшенко; ГОУ ВПО «Волгогр. гос. техн. ун-т». – 2012.
14. П. м. 112416 РФ, МПК G 01 M 7/02. Стенд для испытаний виброизоляторов в режиме вынужденных колебаний / К. В. Шеховцов, А. В. Победин, Вл. П. Шевчук, М. В. Ляшенко, Д. В. Бусалаев; ГОУ ВПО «Волгогр. гос. техн. ун-т». – 2012.

15. Пат. м. 112417 РФ, МПК G 01 М 7/02. Стенд для испытаний виброизоляторов в режиме вынужденных колебаний / К. В. Шеховцов, А. В. Победин, Вл. П. Шевчук, М. В. Ляшенко, Д. В. Бусалаев; ГОУ ВПО «Волгогр. гос. техн. ун-т». – 2012.

16. Пат. м. 112415 РФ, МПК G 01 М 7/02. Стенд для испытаний виброизоляторов при действии нагрузок с осевой и боковой составляющими / К. В. Шеховцов, А. В. Победин, Вл. П. Шевчук, М. В. Ляшенко, Д. В. Бусалаев; ГОУ ВПО «Волгогр. гос. техн. ун-т». – 2012.

17. Пат. 218642 Российская Федерация, МПК G01М 7/06 Стенд для испытаний виброизоляторов кабины транспортного средства / В. В. Шеховцов, М. С. Яркина, А. И. Искалиев, П. В. Потапов, А. В. Евсеева, А. А. Долотов, А. Ю. Лавренюк, Е. В. Клементьев; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2023.

18. Пат. 2794304 Российская Федерация, МПК G01М 13/02. Стенд с гидрозамкнутым силовым контуром для испытания трансмиссий тягово-транспортных средств / В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, П. В. Потапов, В. К. Мерляк, Шиян Я. Э. Энрикес; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2023.

19. Пат. 2794421 Российская Федерация, МПК G01М 13/02. Стенд с гидрозамкнутым силовым контуром для

испытания трансмиссий тягово-транспортных средств / В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, П. В. Потапов, В. К. Мерляк, Шиян Я. Э. Энрикес; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2023.

20. Яркина, М. С. Разработка и исследование конструкции стенда для испытаний виброизоляторов кабины трактора / М. С. Яркина // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, 24–28 апреля 2023 г.): тез. докл. / редкол. : С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]; ВолгГТУ, Отдел координации научных исследований молодых ученых УНИИ, Общество молодых ученых. – Волгоград, 2023. – С. 113–114.

21. Попова, О. И. Расчет объемного гидропривода: учеб. пособие / О. И. Попова, М. И. Попова, С. Л. Новокшенов ; ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Воронеж, 2019. – 87 с.

22. Все для гидравлики. Технические характеристики насосов НШ [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа : https://gik43.ru/katalog/harakteristiki_nasosov_nsh.

23. Кузьмин, В. А. Обоснование параметров системы подпрессоривания колесного сельскохозяйственного трактора класса 4: дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01, 05.02.13: защищена 25.12.18 / В. А. Кузьмин. – Москва, 2018. – 166 с.

УДК 621.433.2

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-77-82

Д. Н. Илюшин, Д. А. Ломов, Е. А. Салыкин, Е. А. Федянов

ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РАСХОДА ТОПЛИВА АВТОМОБИЛЕМ ПО ДАННЫМ CAN-ШИНЫ

Волгоградский государственный технический университет

infiniti1909@rambler.ru, lomov_danil_a@gmail.com, e_salykin@vstu.ru, fedyanov@vstu.ru

Автор, ответственный за переписку: Салыкин Евгений Александрович, *e_salykin@vstu.ru*

Выполнено сравнение значений эксплуатационного расхода топлива автомобилями «Лада Калина 2» и «Datsun on-Do», полученных двумя способами: по информации из бортовой CAN-шины и прямым измерением с помощью массового расходомера. Исследования выполнялись на динамометрическом ступичном стенде Dynapack DAQ+ V43, что позволило задавать последовательность нагрузочных режимов работы двигателя, соответствующих различным условиям движения автомобиля.

Установлено, что эксплуатационный расход топлива, полученный прямым его измерением, отличается от расхода, определенного по данным из CAN-шины автомобиля. На обоих испытанных автомобилях расход, полученный прямым измерением, выше. Различие рассматриваемых значений расхода практически не зависит от нагрузочного режима, но зависит от особенностей бортовой электронной системы автомобиля. Для автомобиля «Лада Калина 2» средняя величина различий в значениях расходов около 13 %, а для автомобиля «Datsun on-DO» – около 7,5 %. На автомобиле «Лада Калина» среднее значение различий расходов на режиме холостого хода несколько выше, чем на нагрузочных режимах.

Ключевые слова: автомобиль, расход топлива, CAN-шина, стендовые испытания

D. N. Ilyushin, D. A. Lomov, E. A. Salykin, E. A. Fedyanov

ACCURACY OF DETERMINING FUEL CONSUMPTION BY A VEHICLE BASED ON CAN BUS DATA

Volgograd State Technical University

A comparison was made of the operating fuel consumption values of «Lada Kalina 2» and «Datsun On-Do» cars obtained in two ways: according to information from the on-board CAN bus and direct measurement using a mass flow meter. The research was carried out on a «Dynapack DAQ»+ «V43» hub dynamometer, which made it possible to set a sequence of load operating modes of the engine corresponding to various vehicle driving conditions.

It has been established that the operational fuel consumption obtained by direct measurement differs from the consumption determined from data from the vehicle's CAN bus. On both vehicles tested, the consumption obtained by direct measurement is higher. The difference in the considered consumption values practically does not depend on the load mode, but depends on the features of the vehicle's on-board electronic system. The difference in the considered consumption values practically does not depend on the load mode, but depends on the features of the vehicle's on-board electronic system. For the «Lada Kalina 2» car, the average difference in cost values is about 13 %, and for the «Datsun on-DO» car – about 7,5 %. On a «Lada Kalina» car, the average difference in costs at idle mode is slightly higher than at load modes.

Keywords: car, fuel consumption, CAN bus, bench tests

Эксплуатационный расход топлива является важным показателем, который характеризует как условия эксплуатации автомобиля, так и его техническое состояние. В современных автомобилях, оснащенных электронными системами управления двигателем и агрегатами трансмиссии, информация о мгновенном расходе топлива передается по так называемой CAN-шине. На основе значений мгновенного расхода бортовая электронная система автомобиля формирует оценку эксплуатационного расхода, относя его, как правило, к фиксированной величине пробега автомобиля.

Значение мгновенного расхода, которое передается в CAN-шину, система управления определяет по осредненной характеристике форсунок в зависимости от длительности подаваемого на них управляющего импульса. Так как характеристика каждой конкретной форсунки в силу производственных допусков может несколько отличаться от осредненной, а также может несколько изменяться в процессе эксплуатации, то данные о мгновенных расходах, передаваемые по CAN-шине, а следовательно, и о эксплуатационном расходе, будут в некоторой мере отличаться от фактических. Авторы публикации [1], касающейся методов определения расходов топлива автомобилем, априори предполагают, что точность данных о расходе топлива, передаваемых по CAN-шине, недостаточна, и утверждают, что для определения расхода с приемлемой точностью, необходимо устанавливать на автомобиль специальное измерительное устройство.

Известны работы [2; 3], посвященные оценке точности определения эксплуатационного расхода топлива по данным бортовой CAN-шины автомобиля. В этих работах определение эксплуатационного расхода выполнялось по результатам дорожных испытаний автомобиля. В силу последнего по результатам этих работ можно дать лишь интегральную оценку погрешности в определении расхода по данным CAN-шины, однако выявить зависимость этой погрешности от режима работы двигателя не представляется возможным.

В данной работе определение эксплуатационного расхода топлива производилось на автомобилях, которые были установлены на динамометрическом стенде Dynapack DAQ+ V43 [10]. На этом стенде момент сопротивления на ведущих колесах автомобиля создается присоединенными к ступицам этих колес гидравлическими насосами объемного типа. Использование стенда позволяло задавать последовательность определенных нагрузочных режимов, соответствующих различным условиям движения автомобиля, и, тем самым, изучать влияние режима на погрешность измерения расхода по данным CAN-шины, а также сравнивать погрешности измерения расходов в системах управления различных автомобилей. Общий вид автомобиля на динамометрическом стенде показан на рис. 1.

В данной статье приводятся результаты испытаний двух автомобилей: «Лада Калина 2» с двигателем «BA3-21126» и «Datsun on-DO» с двигателем «BA3-11186». Первый автомобиль был оснащен автоматической коробкой передач, а второй – механической. Электронные системы управления двигателями на обоих автомобилях построены на базе контроллера M74, который связан с блоками управления других электронных систем автомобиля посредством бортовой CAN-шины со скоростью передачи данных 500 кбит/с.

В общедоступной технической документации на исследуемые автомобили отсутствуют надежные сведения о том, в каких пакетах данных CAN-шины содержится информация о мгновенном расходе топлива. С целью идентификации таких пакетов была использована следующая методика: двигатель с помощью динамометра переводился в режим принудительного холостого хода, на котором величина мгновенного расхода топлива равна нулю. Контроль величины расхода производился с помощью подключенного к CAN-шине автомобиля диагностического прибора (сканера) «Сканматик 2» [4]. Пакеты данных из CAN-шины автомобиля получали с помощью программируемого логического контроллера

«CANNY 7» [5], функционировавшего в режиме анализатора. В результате побитового анализа изменения значений пакетов данных с учетом информации, отображаемой диагно-

стическим прибором, установлено, что значение величины мгновенного расхода топлива содержится в пакете с идентификатором ID 551, а именно: в байтах D7:D6.

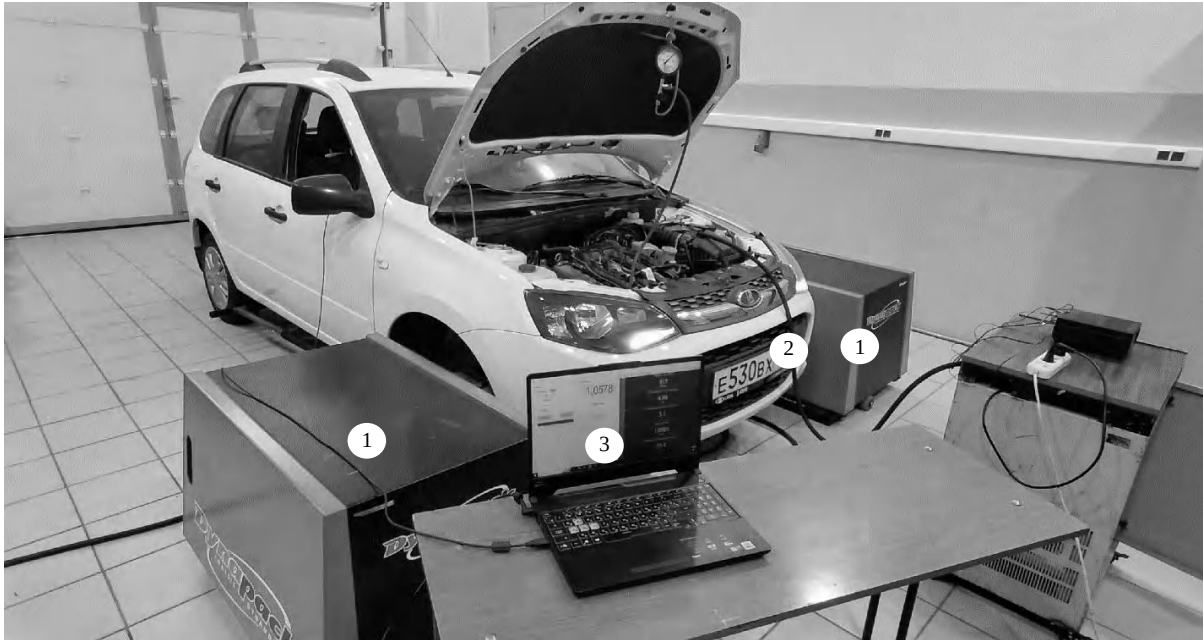


Рис. 1. Автомобиль VAZ-21126 на испытательном стенде Dynapack DAQ+ V43:
1 – динамометрический ступичный стенд, 2 – топливопровод, подключенный к топливной рампе автомобиля, 3 – персональный компьютер

С использованием графической среды CannyLab для контроллера «CANNY 7» создано программное обеспечение (рис. 2), выполняющее извлечение информации о мгновенном расходе топлива из потока данных CAN-шины и передачу ее через преобразователь «USB-UART CP2102» [6] на персональный компьютер. Программа реализована на языке C# в среде Microsoft Visual Studio.

Сравнение отображаемых на персональном компьютере данных о мгновенном расходе то-

плива, полученных с помощью разработанной программы и с помощью сканера «Сканматик 2», показало их совпадение (рис. 3).

В последующих исследованиях при измерениях расхода топлива также использовалось параллельное подключение к CAN-шине автомобиля логического контроллера «CANNY 7» и сканера «Сканматик 2», что позволило контролировать кроме мгновенного расхода топлива и другие необходимые параметры, характеризующие режим работы двигателя.

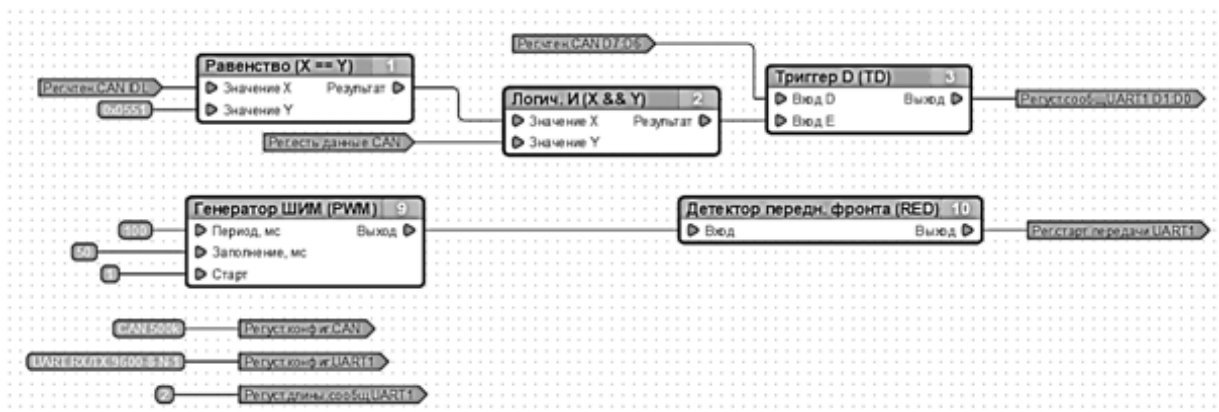


Рис. 2. Логика разработанной в графической среде CannyLab программы получения пакетов данных контроллером «CANNY 7»

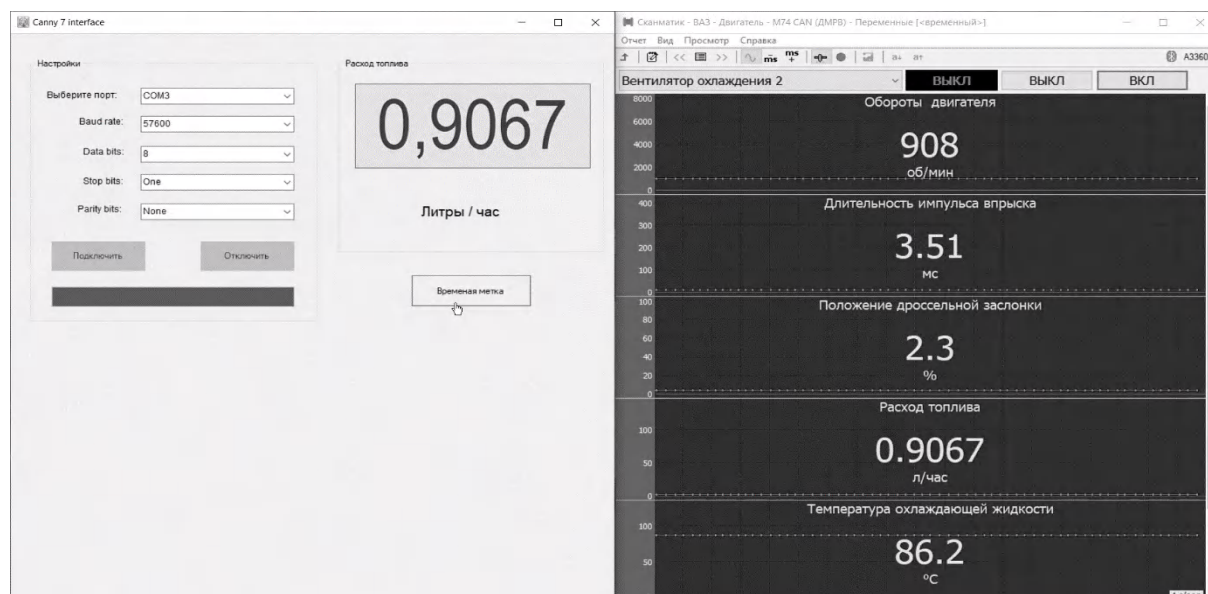


Рис. 3. Окна параллельно работающих программ:
разработанной для определения расхода топлива (слева) и «Сканматик 2» (справа)

Непосредственное измерение расхода топлива двигателем автомобиля выполнялось с помощью специально изготовленного расходомера. Конструкция этого массового расходомера (рис. 4) подобна ранее известным [7] и учитывает особенности топливных систем исследуемых автомобилей.

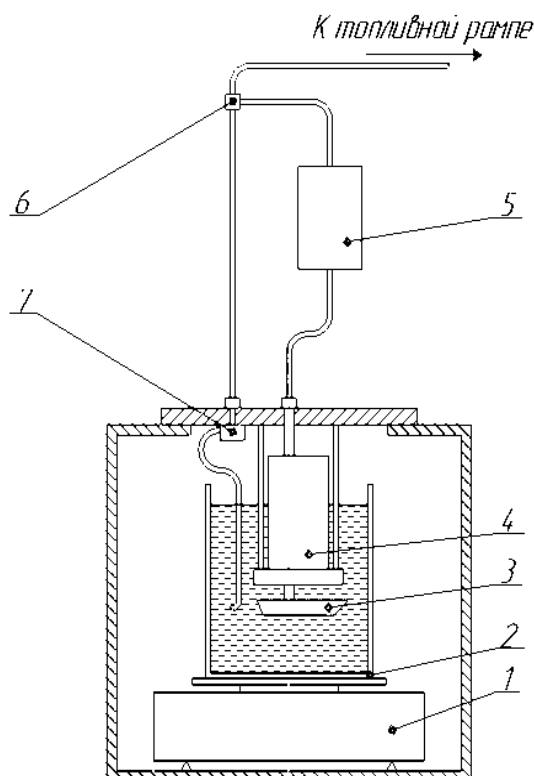


Рис. 4. Принципиальная схема расходомера:
1 – весы; 2 – измерительная емкость; 3 – фильтр грубой очистки;
4 – электробензонасос; 5 – фильтр тонкой очистки; 6 – тройник гидравлический; 7 – регулятор давления топлива

В этих системах топливо подается из бака в топливную рампу двигателя с помощью электробензонасоса под постоянным давлением 380 кПа, обеспечиваемым регулятором давления [8]. В данном случае топливо в топливную рампу подавалось электробензонасосом, погруженным в емкость расходомера. Электробензонасос штатной топливной системы автомобиля был отключен.

Емкость расходомера размещалась на весах «Mettler PE 4000» [9]. Расход топлива за контролируемый интервал времени определялся по разнице массы топлива в емкости в моменты начала и окончания измерения. При определении массы израсходованного топлива учитывалась величина выталкивающей силы, действующей на погруженные в топливо и жестко закрепленные на корпусе прибора бензонасос и топливный фильтр. Величина этой силы переменна, так как по мере расхода топлива из емкости объем погруженных в топливо элементов расходомера уменьшается. Зависимость выталкивающей силы от массы находящегося в емкости расходомера топлива была найдена экспериментально. С учетом найденной зависимости величина массы топлива в емкости расходомера в каждый момент времени вычислялась по формуле:

$$m_r = \frac{F_r}{g} - \rho_r \cdot f(F_r), \quad (1)$$

где F_r – показание весового устройства расходомера, g – ускорение свободного падения, ρ_r – плотность топлива, $f(F_r)$ – функция, вы-

ражающая поправку от действия выталкивающей силы.

Во время пробных экспериментов было установлено, что на результат измерения расхода топлива оказывает влияние работа клапана продувки адсорбера автомобиля. Это связано с неконтролируемым попаданием во впускной коллектор двигателя паров топлива из топливного бака автомобиля. Для повышения точности и повторяемости результатов экспериментов клапан продувки адсорбера был отключен. Поддержание температурного режима двигателя автомобиля осуществлялось с помощью потока воздуха от вентилятора стенда.

В процессе измерений расхода топлива на каждом из режимов обеспечивалось постоянство температуры охлаждающей жидкости в двигателе (в диапазоне $85 \div 95$ °С).

Как было отмечено выше, нагрузочные режимы работы двигателей автомобилей в ходе испытаний задавались с помощью динамометрического ступичного стенда. Частота вращения коленчатого вала двигателя была ограничена управляющей программой стенда величиной 3000 об/мин. Вывод двигателя на заданный режим выполнялся посредством изменения положения педали акселератора автомобиля при положении селектора автоматической коробки передач автомобиля «Лада Калина 2», соответствующем второму диапазону ее работы, а для автомобиля «Datsun on-DO» включенной третьей передаче механической коробки передач.

Испытания автомобиля «Лада Калина 2» были проведены на трех нагрузочных режимах (табл. 1), а автомобиля «Datsun» – на двух (табл. 2). Величина нагрузки оценивалась по значению момента M_k на оси ведущих колес. Для каждого из автомобилей замеры расхода топлива были проведены также на режиме холостого хода двигателя.

Измерение расхода топлива осуществлялось по следующей методике: вывод двигателя на необходимый режим работы; стабилизация контролируемых параметров; синхронные запуск отсчета времени измерения расхода топлива времени в программе, осуществляющей запись величины мгновенного расхода топлива по данным CAN-шины, и видеофиксация по шкале весового устройства значения массы топлива в емкости расходомера; синхронные остановка отсчета времени в программе и видеофиксация значения массы топлива в емкости расходомера; запись результатов измерения массы топлива. Продолжительность каждого измерения расхода топлива составляла 60 с.

В процессе испытаний периодически контролировалась плотность топлива, находившегося в емкости расходомера. Плотность определялась прямым взвешиванием отмеренного с помощью мерного цилиндра объема топлива. Полученная величина плотности использовалась при расчете по формуле (1) массы израсходованного топлива.

Таблица 1

Результаты измерений расхода топлива
для «Лада Калина 2»

№ измерения	Крутящий момент М _к , Н·м	Расход топлива			Относительная погрешность, %
		по информации из CAN-шины		по массовому расходомеру, г	
		объемный, л	массовый, г		
1	0	0,015	11,45	13,43	14,74
2	0	0,016	11,98	13,93	14,00
3	0	0,016	11,73	13,90	15,61
4	75	0,136	98,28	112,20	12,41
5	75	0,136	98,94	115,23	14,14
6	78	0,139	100,52	116,57	13,77
7	104	0,171	123,72	142,85	13,39
8	103	0,17	123,29	140,57	12,29
9	103	0,17	123,28	142,33	13,38
10	148	0,245	177,19	201,58	12,10
11	148	0,252	182,67	210,67	13,29
12	147	0,237	171,67	192,33	10,74

Таблица 2

Результаты измерений расхода топлива для «Datsun on-DO»

№ измерения	Крутящий момент Мк, Н·м	Расход топлива			Относительная погрешность, %
		по информации из CAN-шины		по массовому расходомеру, г	
		объемный, л	массовый, г		
1	0	0,015	10,84	11,70	7,35
2	0	0,014	10,67	11,50	7,22
3	0	0,014	10,53	11,40	7,63
4	99	0,167	121,41	130,56	7,01
5	98	0,168	121,69	131,55	7,49
6	99	0,169	122,35	133,00	8,01
7	131	0,228	165,36	178,00	7,10
8	131	0,230	166,15	180,00	7,69
9	131	0,229	165,76	185,77	7,85

Результаты измерений расхода топлива на различных стационарных режимах работы двигателей автомобилей, определяемые величиной крутящего момента M_k , представлены в табл. 1 и 2. Приведенные в таблицах значения относительной погрешности Δ_T вычислены по формуле:

$$\Delta_T = \frac{m_r - m_{CAN}}{m_r} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где m_r – расход топлива, полученный прямым измерением с помощью массового расходомера; m_{CAN} – расход топлива, полученный по информации из бортовой CAN-шины автомобиля.

Анализируя приведенные в таблицах данные, можно отметить хорошую повторяемость измерений при максимальной относительной погрешности метода измерения расхода топлива по информации из CAN-шины 15,6 % для «Лада Калина 2» и 10,77 % для «Datsun on-DO».

Анализ приведенных в таблицах данных позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, расход топлива, полученный прямым его измерением, заметно отличается от расхода, который бортовая электронная система автомобиля формирует на основе данных о мгновенном расходе, передаваемых по CAN-шины автомобиля. На обоих испытанных автомобилях расход, полученный прямым измерением, выше. Во-вторых, различие рассматриваемых значений расхода практически не зависит от нагрузочного режима, но зависит от особенностей бортовой электронной системы автомобиля. Для автомобиля «Лада Калина» средняя величина различий в значениях расходов около 13 %, а для автомобиля «Datsun on-DO» – около

7,5 %. На автомобиле «Лада Калина» среднее значение различий расходов на режиме холостого хода несколько выше, чем на нагрузочных режимах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Способы контроля расхода топлива [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://avtonavix.ru/news/sposobykontrolyarashkhodatopliva/?ysclid=lvgpsb7fgn505864419> (дата обращения: 30.04.2024 г.).
2. Торопов, Е. И. Оценка точности измерения расхода топлива на основе данных из бортовой CAN-шины / Е. И. Торопов, Ю. П. Трусов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2021. – № 1.
3. Блохин, А. Н. Сравнительный анализ определения расхода топлива автомобиля с использованием расходомера «DFL3X-5BAR» и расчетным методом с помощью данных диагностического протокола OBD II / А. Н. Блохин, Ю. И. Молев [и др.] // Fundamental research. – 2015. – № 8.
4. Scanmatik [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.scanmatik.ru/> (дата обращения: 30.04.2024 г.).
5. CANny [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://canny.ru/c7/> (дата обращения: 30.04.2024 г.).
6. Silicon Laboratories. CP2102-9. 2-Port USB 2.0 to UART Bridge Controller. Datasheet. – 2023. – Режим доступа: URL: <https://www.silabs.com/documents/public/datasheets/CP2102-9.pdf> (дата обращения: 30.04.2024 г.).
7. Martyr, A. J., Plint M. A. Engine Testing: The Design, Building, Modification and Use of Powertrain Test Facilities. – 2007.
8. Зимин, В. А. ЭСУД автомобилей семейств LADA SAMARA, LADA KALINA, LADA GRANTA с контроллером М74 Евро-4 – устройство и диагностика / В. А. Зимин, П. Н. Христов, Д. А. Прудских. – Тольятти, 2012. – 288 с.
9. SITRANS P200/P400. Operating Instructions. – Режим доступа: URL: https://www.mt.com/ru/ru/home/library/operating-instructions/other/PE200_400_BA.html (дата обращения: 30.04.2024 г.).
10. Dynapack. – Режим доступа: URL: <https://dynapack.com/> (дата обращения: 30.04.2024 г.).

УДК 621.433.2

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-83-85

*Р. А. Темин, Е. А. Федянов***ПРЕИМУЩЕСТВА ПОДАЧИ ПРИРОДНОГО ГАЗА
НЕПОСРЕДСТВЕННО В КАМЕРУ СГОРАНИЯ
ДВИГАТЕЛЯ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ****Волгоградский государственный технический университет**

romantemin@mail.ru, fedyanov@vstu.ru

Автор, ответственный за переписку: Роман Андреевич Темин, romantemin@mail.ru

Рассмотрены преимущества применения непосредственного впрыскивания природного газа в цилиндр двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием по сравнению с подачей газа во впускной трубопровод. Приведены результаты расчета значений теплоты сгорания топливовоздушного заряда в цилиндре газового двигателя при различных способах смесеобразования, подтверждающие возможность минимизировать снижение мощности бензинового двигателя при переводе его на питание природным газом путем подачи его непосредственно в цилиндр на такте сжатия.

Ключевые слова: газовый двигатель, подача газа, мощность газового двигателя*R. A. Tyomin, E. A. Fedyanov***ADVANTAGES OF INJECTING NATURAL GAS DIRECTLY
TO THE COMBUSTION CHAMBER OF A SPARK IGNITION ENGINE****Volgograd State Technical University**

The advantages of using direct injection of natural gas into the cylinder of an internal combustion engine with spark ignition compared to feeding gas into the intake manifold are considered. The results of calculating the heat of combustion of the fuel-air charge in the cylinder of a gas engine for various methods of mixture formation are presented, confirming the possibility of minimizing the decrease in the power of a gasoline engine when converting it to natural gas by feeding it directly into the cylinder during the compression stroke.

Keywords: gas engine, gas supply, gas engine power

В настоящее время наблюдается устойчивый рост числа двигателей внутреннего сгорания различного назначения, работающих на природном газе [1]. Двигатели на этом топливе обладают хорошими экологическими характеристиками, имеют, согласно многим данным [2; 3], повышенный срок службы цилиндропоршневой группы. Еще одним преимуществом природного газа как топлива является то, что его основной компонент – метан, обладает самым высоким по сравнению с другими горючими углеводородными газами относительным содержанием водорода. Соответственно, продукты сгорания метана содержат меньше диоксида углерода, чем продукты сгорания других углеводородных газов.

В расчете на килограмм массы теплота сгорания природного газа выше, чем бензина. Это обусловлено более высокой, чем у углеводородов, входящих в состав бензинов, теплотой сгорания метана. Содержание этого компонента в составе природных газов большинства месторождений лежит в пределах 92...98 %, а его низшая теплота сгорания около 50,0 МДж/кг [4], в то время как у большинства бензинов эта величина составляет примерно 44 МДж/кг [4].

Вместе с тем плотность метана примерно вдвое ниже, чем у воздуха, и почти на порядок меньше, чем у паров бензина. Вследствие этого при одинаковых значениях давления и температуры топливовоздушного заряда в цилиндре в конце такта впуска масса топливовоздушной смеси в двигателе, работающем на метане, оказывается меньше, чем в бензиновом двигателе. Еще одной причиной снижения теплоты сгорания заряда поступившей в цилиндр метановоздушной смеси является более высокое у метана, чем у бензина, значение теоретически необходимой для полного сгорания массы воздуха: 17,04 кг/кг у метана и 14,96 кг/кг у бензина. Как следствие, теплота сгорания стехиометрической метановоздушной смеси оказывается несколько ниже, чем у стехиометрической бензовоздушной: 2,72 МДж/кг и 2,78 МДж/кг, соответственно.

В силу изложенного выше при переводе питания двигателей с внешним смесеобразованием и принудительным зажиганием с бензина на природный газ мощность снижается.

При переоборудовании на питание природным газом карбюраторных бензиновых двигателей природный газ подавали через редуктор

и специальный смеситель во впускной трубопровод в пространство за дроссельной заслонкой. В смесителе система клапанов, управляемых разрежением во впускном трубопроводе, обеспечивала регулирование подачи газа в зависимости от количества поступающего в двигатель воздуха.

На двигателях с такой системой питания снижение мощности составляло 15...20 %.

Например, карбюраторный двигатель автомобиля «ЗИЛ-138А» со степенью сжатия 6,5, имевший рассмотренную выше систему подачи природного газа, развивал на бензине 150 л. с., а на природном газе 120 л. с., [5] то есть снижение мощности составляло 20 %. В двигателе «ЗИЛ-138И», в котором степень сжатия была повышена до 8, мощность снижалась на 15 %: от 117,3 кВт на бензине до 100 кВт на природном газе.

При переводе на питание природным газом современных бензиновых двигателей с распределенным впрыском бензина в ветви впускного коллектора газ подают специальными газовыми форсунками, которые устанавливают вместо бензиновых или рядом с бензиновыми, сохраняя возможность работать на двух видах топлива. Необходимый состав газовой смеси на различных режимах работы обеспечивает электронный блок управления, изменяющий в зависимости от режима длительность подачи газа форсункой. В этом случае при переходе с бензина на газ падение мощности меньше, так как впрыск газа под давлением в поток воздуха непосредственно около впускного клапана позволяет несколько ослабить влияние метана на плотность и, соответственно, массу смеси, поступающей в цилиндр. Так, например, двигатель рабочим объемом 1,6 дм³ с двухтопливной системой питания, устанавливаемый на автомобиль «Lada Largus CNG», развивает при $n = 5800 \text{ мин}^{-1}$ на бензине 78 кВт, а на природном газе 69 кВт [6]. Мощность двигателя на природном газе ниже на 12 %. Максимальный крутящий момент при переводе на природный газ снижается на 10 %.

Существенно уменьшить снижение мощности двигателя при переводе его питания с бензина на природный газ можно, подавая последний под давлением непосредственно в цилиндр двигателя в начале такта сжатия [7; 8; 9]. В этом случае масса образующейся в цилиндре газовой смеси будет определяться массой поступившего в цилиндр воздуха, стехиометрическим соотношением для метановоз-

душной смеси и требуемым значением коэффициента избытка воздуха.

Так, в указанном выше двигателе автомобиля «Лада Ларгус» масса поступившего в цилиндр рабочим объемом 0,399 дм³ воздуха составит в начале такта сжатия 0,00038 кг при условии, что давление окружающей среды 100 кПа, температура 20 °С и коэффициент наполнения равен 0,8. Подавая после закрытия впускного клапана в цилиндр метан, получим 0,0004023 кг стехиометрической метановоздушной смеси. Теплота сгорания этой массы метановоздушной смеси 1,094 кДж. При тех же условиях, но при внешнем смесеобразовании, масса стехиометрической бензовоздушной смеси была бы 0,000398 кг, а метановоздушной 0,000324 кг. Соответственно теплоты сгорания зарядов в цилиндре в расчете на один цикл составят 1,106 и 0,881 кДж.

Сопоставляя теплоту сгорания бензовоздушной смеси в цилиндре при внешнем смесеобразовании с теплотой сгорания метановоздушной смеси при внутреннем смесеобразовании, то есть при подаче метана непосредственно в цилиндр на такте сжатия, получаем, что теплота сгорания массы бензовоздушной смеси в цилиндре в расчете на один цикл только на 1 % больше аналогичной теплоты сгорания метановоздушной смеси. Однако следует иметь в виду, что при впрыске бензина непосредственно в цилиндр некоторое количество энергии затрачивается на его испарение. Принимая теплоту парообразования для бензина равной примерно 315 кДж/кг [4], получаем, что различие в теплоте, которая будет подведена к рабочему телу в цилиндре в сопоставляемых случаях менее 0,35 %. Таким образом, можно считать, что двигатель, работающий на природном газе с его подачей непосредственно в цилиндр на такте сжатия, и такой же двигатель, работающий на бензине с его непосредственным впрыскиванием в цилиндр, будут иметь одинаковую мощность.

Основной проблемой, которая препятствует применению непосредственной подачи газа в цилиндр при переоборудовании на питание природным газом бензинового двигателя с впрыскиванием бензина во впускной коллектор, является отсутствие в его головке цилиндров каналов для установки газовых форсунок. Поэтому непосредственную подачу природного газа в цилиндр рекомендуется применять, в первую очередь, на двигателях, которые специально проектируются для работы на таком

виде топлива. Непосредственную подачу природного газа в цилиндр следует также рекомендовать при переоборудовании на питание природным газом бензиновых двигателей с непосредственным впрыском бензина в цилиндр.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Развитие газового двигателестроения – один из стратегических ответов на глобальный климатический вызов // Беларусь сегодня. – Режим доступа: <https://www.sb.by/articles/tekhno-gii-zhmut-na-gaz.html> (дата обращения: 26.07.2024 г.)
2. Генкин, К. И. Газовые двигатели. «Машиностроение». – 1977. – 192 с.
3. С бензина – на газ // Центральное диспетчерское управление топливно-энергетического комплекса. – Режим доступа: https://www.cduru/tek_russia/articles/3/1194/ (дата обращения: 26.07.2024 г.)
4. Дубовкин, Н. Ф. Справочник по углеводородным

топливам и их продуктам сгорания. М. Государственное энергетическое издательство, 1962. – 288 с.

5. ЗИЛ 138а характеристики двигателя. – Режим доступа: <https://avtika.ru/zil-138-a-harakteristiki-dvigatelya/> (дата обращения: 31.05.2024 г.)

6. Lada Largus CNG дополнение к руководству по эксплуатации автомобиля и его модификаций // АВТОВАЗ 04.06.2019. – Режим доступа: https://www.major-lada.ru/files/resources/pdf/lar-gus_universal/lada_largus_cng_re_04_06_2019.pdf (дата обращения: 31.05.2024 г.)

7. Шишков, В. А. Непосредственный впрыск газового топлива в камеру сгорания ДВС с искровым зажиганием // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 6. – С. 51–57.

8. Tanmay, Kar1, Zhenbiao Zhou1, Michael Brear1, Yi Yang1 Comparative Study of Directly Injected, Spark Ignition Engine Performance and Emissions with Natural Gas, Gasoline and Charge Dilution, Australia, 2021. – pp 47.

9. Stefania Zanforlin, Alberto Boretti, Numerical analysis of methane direct injection in a single-cylinder 250 cm3 spark ignition engine, Italy, 2015. – pp 883–896.

УДК 629.113.001

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-85-91

П. А. Киселёв, А. И. Федотов, О. С. Яньков, С. Н. Кривцов

СПОСОБ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ АВТОМОБИЛЯ С ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

Иркутский национальный исследовательский технический университет

pavel.kiselev.97.97@mail.ru, fai.abs@yandex.ru, yos913005@mail.ru, krivcov_sergei@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Павел Алексеевич Киселев, pavel.kiselev.97.97@mail.ru

Авторами статьи приводится анализ способов математического описания внешних скоростных характеристик двигателя внутреннего сгорания, по результатам которого отмечено, что практически во всех работах используется аппроксимация известных экспериментальных данных. Однако, не всегда есть возможность получить эти данные для двигателя определенной марки автомобиля. В ходе исследования, в качестве альтернативного инструмента при моделировании процесса функционирования двигателя внутреннего сгорания, было разработано его упрощенное математическое описание, основанное на уравнении С. Р. Лейдермана. Предлагаемое авторами статьи описание, позволяет выполнять расчет частичных характеристик двигателя по известным параметрам: максимальному крутящему моменту и величине управляющего воздействия, который определяется коэффициентом управления силовой установкой и частотой вращения коленчатого вала двигателя. Результатом расчета являются частичные скоростные характеристики на примере двигателя «1NZ-FXE» автомобиля «Toyota Prius NHW20» в зависимости от параметра управления. Полученные результаты планируется использовать при моделировании процессов функционирования двигателя внутреннего сгорания в составе гибридной силовой установки.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, динамические процессы, колесное транспортное средство, гибридная силовая установка, частичная скоростная характеристика, крутящий момент, математическое моделирование

P. A. Kiselyov, A. I. Fedotov, O. S. Yankov, S. N. Krivtsov

METHOD OF MATHEMATICAL DESCRIBING THE SPEED CHARACTERISTICS OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE OF A CAR WITH A HYBRID POWER PLANT

Irkutsk National Research Technical University

The authors of the article provide an analysis of methods for mathematically describing the external speed characteristics of an internal combustion engine, according to the results of which it is noted that, in almost all works, an approximation of known experimental data is used. However, it is not always possible to obtain this data for an engine of a certain car brand. In the course of the study, as an alternative tool for modeling the process of functioning of an internal combustion engine, a simplified mathematical description based on the S.R. Leiderman equation was

developed. The description proposed by the authors of the article allows the calculation of partial engine characteristics according to known parameters: the maximum torque and the magnitude of the control action, which is determined by the control coefficient of the power plant and the engine crankshaft rotation frequency. The result of the calculation is partial speed characteristics based on the example of the «1NZ-FXE» engine of the «Toyota Prius NHW20» car, depending on the control parameter. The results obtained are planned to be used in modeling the processes of functioning of an internal combustion engine as part of a hybrid power plant.

Keywords: internal combustion engine, dynamic processes, wheeled vehicle, hybrid power plant, partial speed characteristic, torque, mathematical modeling

Актуальность использования двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в автомобилестроении, несмотря на рост интереса к альтернативным источникам энергии, продолжает оставаться на высоком уровне. В настоящее время активно развиваются гибридные силовые установки, гармонично сочетающие в себе ДВС и электродвигатель. Такие системы обеспечивают плавный переход к более экологичным видам транспорта. Мировой рынок гибридных автомобилей оценивается в 231,77 млрд. долларов и ожидается, что к 2029 году он достигнет 478,33 млрд. долларов при среднегодовом темпе роста 12,83 % [1].

В настоящее время существует множество схем автомобилей с гибридными силовыми установками, классифицирующихся по конструктивным особенностям. [2; 3]. В данной работе рассмотрен наиболее популярный последовательно-параллельный гибридный силовой привод автомобиля «Toyota Prius NHW20» с двигателем внутреннего сгорания «1NZ-FXE» объемом 1497 см³ и мощностью 57 кВт [4]. В последовательно-параллельной гибридной силовой установке ДВС выполняет несколько важных функций:

1) является основным источником крутящего момента;

2) выполняет подзарядку тяговой высоковольтной батареи;

3) участвует в поддержании энергоснабжения систем автомобиля.

Очевидно, что в условиях эксплуатации автомобилей с гибридными силовыми установками нуждаются в диагностике, техническом обслуживании и ремонте. Поэтому проведение исследований, направленных на разработку методик диагностирования таких автомобилей, является важной научной задачей. Актуальной остается разработка математического описания характеристик двигателя внутреннего сгорания этих автомобилей для моделирования динамических процессов испытаний, диагностики и контроля технического состояния их силовых установок.

Разработка математических описаний процесса функционирования ДВС посвящено множество трудов [5; 6; 7; 8]. В статье Н. С. Соломатина, А. Г. Заморина, Е. М. Зотова [5], которая посвящена аппроксимации частичных скоростных характеристик ДВС, приводится анализ методик для определения и описания внешней скоростной характеристики двигателя. Кроме того, предлагается способ расчета реализованного крутящего момента на коленчатом валу двигателя на основе метода многомерной интерполяции, Н·м:

$$J_2(M_e) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\left(\frac{\partial^2 M_e}{\partial \omega_e^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 M_e}{\partial \omega_e \partial \beta} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 M_e}{\partial \beta^2} \right)^2 \right] d\omega_e d\beta \rightarrow \min : \quad (1)$$

где $J_2(M_e)$ – функционал гладкости (определяемый полной свободной энергией пластинки), Н·м; M_e – крутящий момент на коленчатом валу, Н·м; ω_e – угловая скорость коленчатого вала ДВС, рад⁻¹; β – уровень подачи топлива, проходящей через массив точек, описывающий поверхность в координатах (T_e , ω_e , β), %.

Таким образом, математическое описание зависимости крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала ДВС $M_e = f(n_e)$ представлено в виде сплайн-поверхности модели упругой пластинки бесконечной протяженности, как представлено на рис. 1.

В программной среде «Универсальный механизм» [6] предложено задавать скоростные характеристики ДВС двумя способами.

Первый способ заключается в поточечном задании характеристики с использованием сплайновой интерполяции кривых на основе известных данных. Данная характеристика представлена на рис. 2.

Второй способ математического описания заключается в использовании эмпирико-аналитической зависимости, основанной на внешней скоростной и тормозной характеристиках ДВС [6].

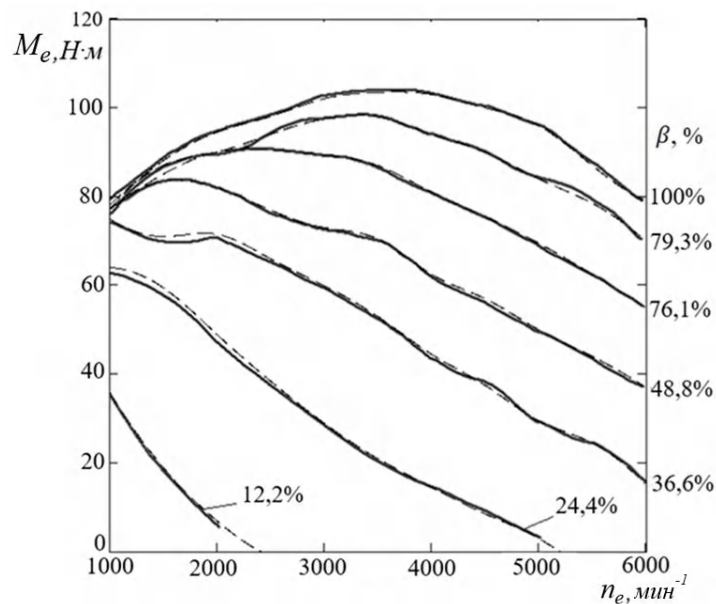


Рис. 1. Частичные скоростные характеристики ДВС в зависимости от уровня подачи топлива [5]

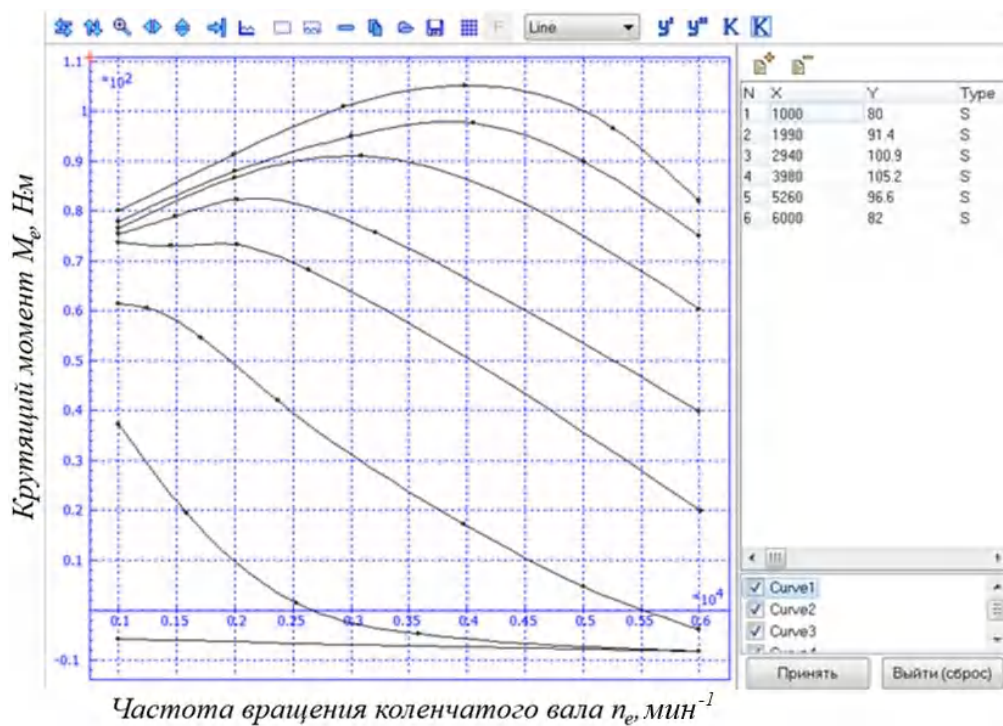


Рис. 2. Диаграмма поточечного задания характеристик в программной среде «Универсальный механизм» [6]

Величина крутящего момента M_e ДВС рассчитывается в зависимости от частоты враще-

ния коленчатого вала n_e и управляющего параметра β :

$$M_e(n_e, \beta) = \frac{M_e(n_e, \beta_i)(\beta_{i-1} - \beta) + M_e(n_e, \beta_{i-1})(\beta - \beta_i)}{\beta_{i-1} - \beta_i}, \beta \in [\beta_i, \beta_{i-1}] \rightarrow \min; \quad (2)$$

где M_e – крутящий момент на коленчатом валу ДВС, Н·м; n_e – частота вращения коленча-

того вала ДВС, мин⁻¹; β – управляющий параметр ДВС.

Тормозная характеристика ДВС определяется моментом внутреннего сопротивления M_f , возникающим вследствие механических потерь. Она вычисляется при $\beta = 0\%$ и рассчитывается с учетом среднего давления механических потерь:

$$M_f = \frac{1000 \cdot V_h}{\pi \cdot m_{str}} \cdot p_{f_{мех}}; \quad (3)$$

где m_{str} – число цилиндров ДВС; V_h – объем двигателя, л; $p_{f_{мех}}$ – среднее давление механических потерь, МПа.

Среднее давление механических потерь определяется в виде функции $p_{f_{мех}} = f(n_e)$:

$$p_{f_{мех}} = p_0 + p_1 \frac{l_{str}}{30} n_e, \quad (4)$$

где p_0 , p_1 – параметры функции; l_{str} – ход поршня, м; n_e – частота вращения коленчатого вала ДВС, мин^{-1} .

Зависимости крутящего момента ДВС от частоты вращения его коленчатого вала, полученные по формулам (2)...(4), приведены на рис. 3.

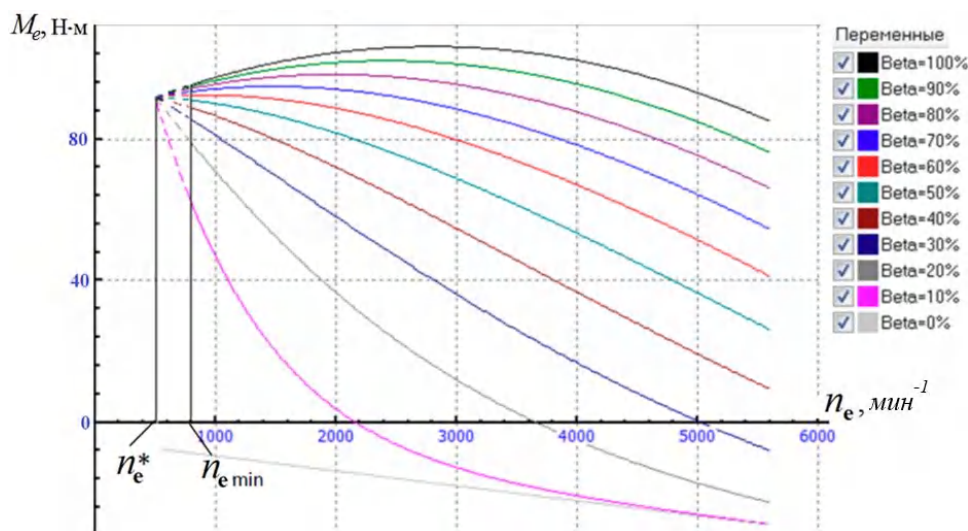


Рис. 3. Диаграмма рассчитанных значений скоростных характеристик бензинового ДВС [6]

В статье Е. А. Сериковой и С. А. Серикова представлены результаты применения искусственных нейронных сетей для построения математической модели двигателя внутреннего сгорания. В работе [7] математическая модель создана путем аппроксимации скоростных характеристик ДВС.

Практически во всех работах, посвященных описанию частичных скоростных характеристик ДВС, используется аппроксимация известных экспериментальных данных. К сожалению, не всегда есть возможность получить такие данные. Поэтому в качестве альтернативного инструмента при моделировании работы ДВС в составе гибридной силовой установки был разработан упрощенный способ математического описания скоростных характеристик, основанный на уравнении С. Р. Лейдермана.

При разработке математической модели гибридной силовой установки с ДВС «1NZ-FXE» в программной среде «Универсальный механизм» была создана ее трехмерная модель, учитывающая механические передачи между

компонентами, а также их геометрические и инерционные характеристики. Внешний вид трехмерной модели представлен на рис. 4. Опи-

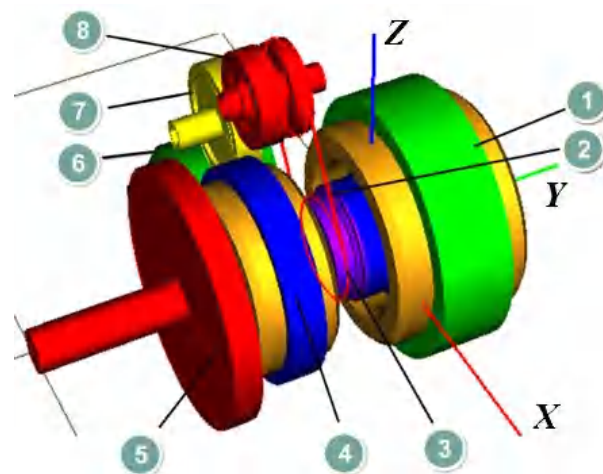


Рис. 4. Трехмерная модель гибридной силовой установки в среде «Универсальный механизм»:

1 – тяговый электродвигатель 50 кВт; 2 – цепная передача; 3 – планетарная передача; 4 – электродвигатель-генератор 18 кВт; 5 – коленчатый вал и маховик ДВС; 6 – главная пара; 7, 8 – промежуточные шестерни

сание принципа функционирования такой гибридной силовой установки, распределение мощности между ее компонентами, приведено в работах [2; 3; 9; 10], а также в руководстве по эксплуатации [4].

Уравнение динамики коленчатого вала ДВС запишем для рассматриваемой модели в виде

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{M_e}{J_e}; \quad (5)$$

где α – угол поворота коленчатого вала, рад; M_e – момент, развиваемый на коленчатом валу ДВС, Н·м; J_e – момент инерции коленчатого вала, кг/м².

Крутящий момент, развиваемый ДВС при предельном значении управляющего параметра $\beta = 1$ (рис. 5), описывается в соответствии с полиномом С. Р. Лейдермана:

$$M_{e(\beta=1)} = M_{e(\max)} \cdot \left(a + b \cdot \left(\frac{n_e}{n_{eM}} \right) - c \cdot \left(\frac{n_e}{n_{eM}} \right)^2 \right), \quad (6)$$

где $M_{e(\max)}$ – максимальный крутящий момент

на коленчатом валу ДВС, Н·м; a, b, c – константы полинома; n_e – текущая частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹; n_{eM} – частота вращения коленчатого вала ДВС при максимальном моменте, мин⁻¹.

Расчет крутящего момента на коленчатом валу ДВС при управляющем параметре $\beta = 0$ производится с учетом следующих условий:

- если ДВС не работает ($\beta = 0$), то в этом случае момент $M_{e(\beta=0)}$ будет равен моменту внутреннего сопротивления M_f , определяемому по формуле (3).

- если ДВС работает, но при этом управляющий параметр $\beta = 0$, то крутящий момент предлагается определять следующим образом:

$$M_{e(\beta=0)} = e(M_{e(\max)} - M_f) + M_f, \quad (7)$$

где $M_{e(\max)}$ – максимальный реализованный момент, Н·м; M_f – момент сопротивления, Н·м; e – функция, характеризующая изменение крутящего момента $M_{e(\beta=0)}$.

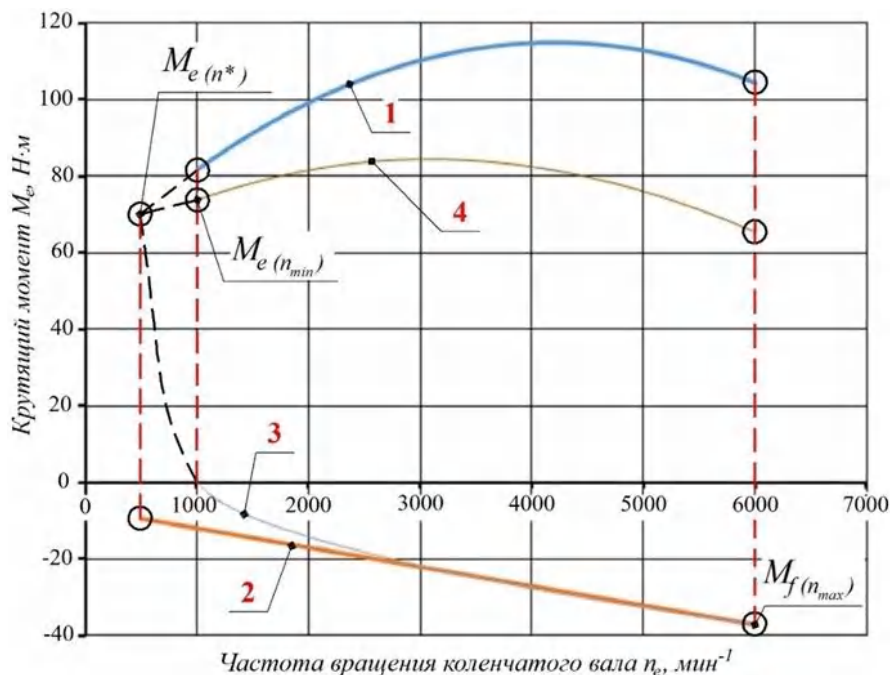


Рис. 5. Внешняя скоростная характеристика ДВС:

1 – момент $M_{e\beta=1}$, развиваемый ДВС при $\beta = 1$; 2 – тормозной момент при $\beta = 0$;
3 – момент, развиваемый ДВС при $\beta = 0$; 4 – момент M_e , развиваемый при $\beta = 0,7$

Расчет частичных скоростных характеристик крутящего момента на коленчатом валу ДВС в пределах изменения управляющего параметра β от 0 до 1 выполняли с помощью формулы (8), выражая значение момента как функцию нескольких переменных $M_e = f(n_e; \beta; d; e)$. Такое

решение позволяет описывать внешнюю скоростную и тормозную характеристики ДВС по моменту:

$$M_e = M_{e(\beta=1)} \cdot \beta^d + M_{e(\beta=0)} \cdot (1 - \beta^e), \quad (8)$$

где $M_{e(\beta=1)}$ – момент, развиваемый ДВС при $\beta = 1$, Н·м; $M_{e(\beta=0)}$ – момент ДВС при $\beta = 0$,

Н·м; d – функция, характеризующая изменение крутящего момента $M_{e(\beta=1)}$; e – функция, характеризующая изменение крутящего момента $M_{e(\beta=0)}$; β – параметр управления.

Функцию d , характеризующую изменение крутящего момента $M_{e(\beta=1)}$, рассчитывали как:

$$d = (1 - \Delta n_e)^{K_2} + K_4 \cdot \Delta n_e^{K_3}, \quad (9)$$

где K_2 – коэффициент корректировки распределения кривых крутящего момента; K_3 – коэффициент корректировки наклона кривых крутящего момента в области минимальной частоты вращения коленчатого вала; K_4 – коэффициент корректировки распределения точек кривых крутящего момента в области максимальной частоты вращения коленчатого вала; Δn_e – относительная частота вращения коленчатого вала.

Относительную частоту вращения коленчатого вала ДВС вычисляли по формуле:

$$\Delta n_e = \frac{n_e - n_e^*}{n_{\max} - n_e^*}, \quad (10)$$

где n_e – текущая частота вращения коленчатого вала; n_e^* – частота вращения коленчатого вала, для которой расчет скоростных характеристик в области низких частот пересекается в одной точке; $n_{e\max}$ – максимальная частота вращения коленчатого вала.

Функцию e , характеризующую изменение крутящего момента M_e , рассчитывали как:

$$e = \frac{(1 - \Delta n_e^{K_1}) + (1 - \Delta n_e)^{K_5}}{2}, \quad (11)$$

где K_1 – коэффициент корректировки распределения точек кривых крутящего момента в области минимальной частоты вращения коленчатого вала ДВС; K_5 – коэффициент корректировки наклона кривых крутящего момента в области максимальной частоты вращения коленчатого вала.

В таблице приведены основные значения параметров частичных характеристик крутящего момента, полученные при моделировании ДВС «1 NZ-FXE» гибридного автомобиля «Toyota Prius NHW20».

**Основные параметры двигателя внутреннего сгорания «1 NZ-FXE»
автомобиля Toyota Prius NHW20**

Параметры	Обозначения	Значения	Ед. изм.
Максимальный момент ДВС	M_e	115	Нм
Частота вращения колен. вала при макс. моменте	n_{em}	4200	мин ⁻¹
Объем двигателя внутреннего сгорания	V_H	1,496	л
Число тактов двигателя внутреннего сгорания	i_T	4	–
Параметр функции $P_{f_{мер}} = f(n_e)$	p_0	0,06	МПа
Параметр функции $P_{f_{мер}} = f(n_e)$	p_1	0,015	МПа · с/м
Ход поршня	l_{str}	0,0847	м
Коэффициент корректировки	K_1	0,43	–
Коэффициент корректировки	K_2	50	–
Коэффициент корректировки	K_3	0,5	–
Коэффициент корректировки	K_4	0,9	–
Коэффициент корректировки	K_5	31,311	–

В процессе моделирования получен график зависимости крутящего момента M_e от частоты вращения коленчатого вала n_e ДВС при варьировании коэффициента управления β , который представлен на рис. 6.

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. Разработано упрощенное математическое описание, позволяющее выполнять расчет частичных скоростных характеристик ДВС при помощи формулы С. Р. Лейдермана.

2. Полученные результаты применимы для моделирования процессов функционирования автомобилей с гибридной силовой установкой, а также автомобилей с ДВС.

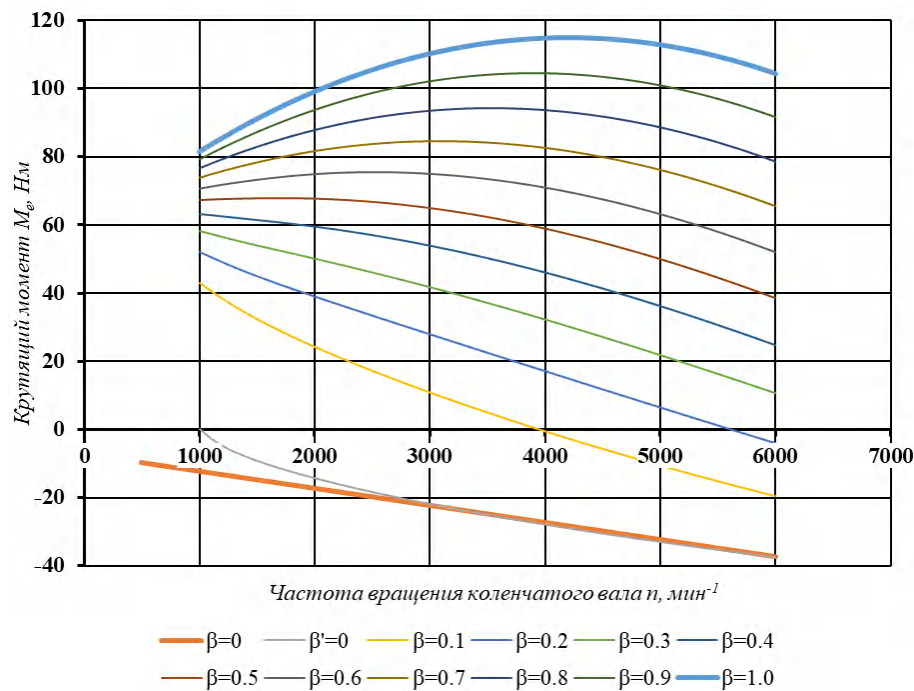


Рис. 6. Частичные скоростные характеристики ДВС 1NZ-FXE в зависимости от параметра управления β

В дальнейшем планируется выполнение проверки адекватности математической модели процесса функционирования автомобиля с гибридной силовой установкой с применением разработанного математического описания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализ размера и доли рынка гибридных автомобилей – тенденции роста и прогнозы (2024–2029 гг.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/hybrid-vehicle-market>. (дата обращения 09.09.2024 г.).
2. Федотов, А. И., Яньков О. С., Киселёв П. А., Ухватов Д. О. / О диагностике автомобильных гибридных силовых установок на стендах с беговыми барабанами / *International Journal of Advanced Studies*. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 42–61. – DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-1-42-61. – EDN OUDNVJ.
3. Яньков, О. С. Колесные транспортные средства с электрическим и гибридным приводом: учеб. пособие / О. С. Яньков. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2022. – 246 с.
4. Руководство по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту автомобиля Toyota Prius NHW20 [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://vnx.su/content/avto/toyota/prius-xw20.html>. (дата обращения 05.09.2024 г.).
5. Соломатин, Н. С. Аппроксимация частичных скоростных характеристик двигателя внутреннего сгорания / Н. С. Соломатин, А. Г. Заморин, Е. М. Зотов // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2009. – Т. 3. – № 1. – С. 68–71. doi: 10.17816/2074-0530-69897.
6. Руководство пользователя «Универсальный механизм: Моделирование трансмиссии» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/24_um_blockeditor.pdf. (дата обращения: 09.09.2024 г.).
7. Серикова, Е. А. Нейросетевая аппроксимация характеристик двигателя внутреннего сгорания / Е. А. Серикова, С. А. Сериков // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. – 2016. – № 4(252). – С. 70–79. – DOI 10.5862/JCSTCS.252.6. – EDN XUUCMD.
8. Сидоров, В. Н. Расчет внешней скоростной характеристики двигателя внутреннего сгорания / В. Н. Сидоров, О. А. Царев, С. А. Голубина // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 1–1. – С. 250. – EDN VIDWRX.
9. Киселёв, П. А. Обоснование динамических тестовых режимов функционирования транспортного средства с гибридной силовой установкой / П. А. Киселёв, А. И. Федотов, О. С. Яньков, Н. В. Лобов // *Грузовик*. – 2024. – № 7. – С. 27–37. – DOI 10.36652/1684-1298-2024-7-27-37. – EDN DMQTJQ.
10. Киселёв, П. А. Математическое описание процессов функционирования электродвигателя-генератора автомобиля с гибридной силовой установкой / П. А. Киселёв, А. И. Федотов, О. С. Яньков // *International Journal of Advanced Studies*. – 2023. – Т. 13, № 2. – С. 130–149. – DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-2-130-149. – EDN XWLUIQ.

УДК 629.33-82:85

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-92-96

*Р. А. Лапенков¹, А. М. Щербин¹, М. П. Малиновский^{1,2}***ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИВодОВ
ПНЕВМАТИЧЕСКОГО И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТИПА
НА АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ**¹ ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Москва, Россия² Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ), Москва, Россия

roman.lapenkov@nami.ru, alexey.scherbin@nami.ru, m.malinovskiy@nami.ru

Автор, ответственный за переписку: Михаил Павлович Малиновский, m.malinovskiy@nami.ru

Пневматический и гидравлический приводы уже более ста лет используются в конструкции автомобильного транспорта, например, в рулевом управлении, тормозной системе, подвеске, в системах, обслуживающих моторную установку (питания, охлаждения, смазки), а также для привода различного дополнительного оборудования. Однако серийное производство электромобилей и массовое внедрение электробусов в качестве городского транспорта привели к необходимости пересмотра традиционной концепции применения энергоносителей в различных системах управления. Авторы статьи провели анализ различных систем автомобилях с позиции перехода от пневматического и гидравлического привода к электромеханическому.

Ключевые слова: электромобиль, электробус, электромеханический привод, рулевое управление, тормозная система, активная подвеска

*R. A. Lapenkov¹, A. M. Shcherbin¹, M. P. Malinovsky^{1,2}***PROSPECTS FOR USING PNEUMATIC AND HYDRAULIC
TYPE DRIVES IN AUTOMOBILE TRANSPORT**¹ Federal State Unitary Enterprise «Central Scientific Research Automobile
and Automotive Engines Institute» (FSUE «NAMI»), Moscow, Russia² Moscow automobile and road construction state
technical university (MADI), Moscow, Russia

Pneumatic and hydraulic drives have been used in the design of motor vehicles for over a hundred years, for example, in steering, braking systems, suspension, in systems servicing the engine installation (power, cooling, lubrication), as well as for driving various additional equipment. However, serial production of electric vehicles and the mass introduction of electric buses as urban transport have led to the need to revise the traditional concept of using energy carriers in various control systems. The authors of the article analyzed various systems in cars from the position of the transition from pneumatic and hydraulic drives to electromechanical ones.

Keywords: electric vehicle, electric bus, electromechanical drive, steering, braking system, active suspension

Проведя краткий исторический экскурс в область использования гидравлики и пневматики на автомобиле, можно установить следующее.

Первый гидравлический тормозной привод в 1908 г. запатентовал инженер Эрнест Уолтер Уэйт (GB190800241A) из Бристоля, Англия, и представил его на Лондонском автосалоне 1909 г. Через год его брат, Уильям Герберт Уэйт, усовершенствовал конструкцию (GB190921122A). Основанная ими компания «Weight Patent Automobile Brake Ltd.» некоторое время устанавливала гидравлическую тормозную систему на бельгийское шасси «Metallurgique», первый образец которого был показан на Лондонском автосалоне в ноябре 1910 г.

Американский инженер Малколм Локхид (1886–1958), более известный как авиаконструктор, в период с 1917 по 1936 гг. получил 70 патентов в отношении конструкции гидравлической тормозной системы (US1249143A, US1288944A, CA192303A и т. д.). Фред Дюзенберг использовал гидравлические тормоза «Lockheed Corporation» на своих гоночных автомобилях еще в 1914 г., а первой серийной моделью стала «Duesenberg Model A» в 1921 г. [1].

Американский инженер Фрэнсис Райт Дэвис после окончания Гарвардского университета в 1910 г. работал испытателем 5-тонных грузовиков «Pierce-Arrow», затем стал главным инженером и получил опыт по работе с гидравликой. В 1925 г. он установил на «Pierce-Arrow

Roadster» первый гидравлический усилитель рулевого управления [2], а в период с 1932 по 1959 г. получил 16 патентов, касающихся его конструкции (US1846089A, GB371816A, US1874248A и т. д.).

Первый гидравлический амортизатор запатентовал французский инженер Морис Худай в 1909 г. (GB190906139A, US933076A). Внутри цилиндрического корпуса, заполненного маслом, на оси вращалось колесо с четырьмя лопатками, в которых имелись калиброванные отверстия (позже – с клапанами), создававшие сопротивление потоку жидкости при повороте оси. Подобная конструкция применялась на автомобилях «Ford» вплоть до конца 1940-х гг., а из отечественных автомобилей – на «ГАЗ-А».

В 1910 г. фирмы «Knorr-Bremse» (Германия) и «WABCO» (США), производившие тормоза для железнодорожного транспорта, практически синхронно разработали первые пневматические тормоза для грузовых автомобилей [3]. На большегрузных автомобилях, оснащенных такими тормозами, в 1930-х гг. устанавливали пневматический усилитель руля, однако его массовому внедрению мешали такие недостатки, как релейный принцип действия и отсутствие следящего действия [4]. Первый патент на пневматическую подвеску также относится к 1904 г. (GB190322400A).

Таким образом, гидравлический и пневматический приводы применяются на автомобиле уже более века. Основной причиной их внедрения на автомобиле являлись постоянный прирост мощности, скорости и грузоподъемности, так что механический привод, хотя и будучи простым по конструкции, перестал справляться с поставленными задачами, особенно когда использовалась мускульная сила водителя.

Однако в настоящее время наблюдается другая тенденция – отказ от пневматического и гидравлического привода в пользу электрического. Начался данный процесс достаточно давно и по мере развития электротехники набирал обороты. Например, появление компактных электромоторов позволило использовать их в качестве приводов вспомогательного оборудования (стеклоподъемники, стеклоомыватели, сидения с массажем и регулировкой положения и многое другое).

За последние 20 лет эта тенденция получила новый виток развития, связанный с активной электрификацией автомобильного транспорта [5]. До недавнего времени основным источником энергии на автомобиле был двигатель

внутреннего сгорания (ДВС), с коленчатого вала которого производился отбор механической энергии для преобразования в гидравлическую, пневматическую и электрическую энергию. У современного электромобиля взамен ДВС используется аккумуляторная батарея [6], вследствие чего усложняется процесс преобразования энергии для получения источника пневматической или гидравлической энергии. Логичным шагом становится применение единого электрического источника энергии для всех систем автомобиля, что приводит к снижению снаряженной массы и уменьшению потерь на преобразование энергии. Проведенные в НАМИ исследования показали, что отказ от дополнительных устройств преобразования энергии, таких как электрический компрессор [7–8] и электрическая насосная станция [9], положительно сказывается на стоимости систем и автомобиля в целом, хотя на данный момент электрические исполнительные механизмы пока оказываются дороже, чем гидравлические и пневматические (например, гидроцилиндры).

Рассмотрим подробнее некоторые системы автомобиля.

Рулевое управление. Гидропривод используется в качестве гидроусилителя руля с целью снижения требуемого усилия водителя для поворота управляемых колес автомобиля. Начиная с конца прошлого века, замена гидравлического усилителя на электрогидравлический или электромеханический усилитель ведется на автомобилях традиционной конструкции с ДВС, и в настоящий момент можно констатировать, что на легковых автомобилях электромеханический усилитель руля почти полностью вытеснил другие его типы [10].

На грузовых автомобилях дело обстоит несколько иначе. Дело в том, что с ростом мощности и момента сопротивления повороту значительно проявляются недостатки электропривода: электрическое исполнительное устройство оказывается больше по массе и габаритам, чем гидравлическое. Данный фактор, а также потребность в достаточно мощном источнике электрической энергии, затормозили распространение электроусилителей руля на грузовом автотранспорте. Впрочем, работы в данном направлении активно ведутся, в том числе в отечественной промышленности [11–12], и в ближайшее время ожидается активное их внедрение в производство.

Тормозная система. На текущий момент гарантированного технического решения с при-

менением электрического привода в тормозной системе нет, но есть огромное количество предложений. Десятки фирм с мировым именем занимаются разработкой электромеханических тормозов: «Bosch», «Haldex», «Siemens», «Mando» и др. При проведении научных исследований в НАМИ только за последние 10 лет было обнаружено более 200 международных патентов в данной области. Первым опытным образцам уже более 20 лет.

Основным «тормозом» серийного применения электромеханических тормозов является законодательный аспект. В связи с тем, что тормозная система напрямую влияет на безопасную эксплуатацию автомобилей, нормативная база, регламентирующая их применение и сертификацию, отличается некоторой инертностью и консервативностью, за десятки лет отработанная под специфику применения тормозов с гидравлическим и пневматическим приводом. В Правилах ООН № 13 лишь в самых последних редакциях начали появляться разделы, касающиеся электропневматического привода [13], прежде всего, для прицепного звена автопоезда.

В подтверждение стоит отметить, что электропривод тормозов уже нашел серийное применение в авиации (на последних моделях фирмы «Boeing») [14] и на железнодорожном транспорте [15]. Ряд фирм, например, шведская «Haldex», даже официально перенесли свои разработки в Китай, где законодательная база несколько мягче, чем в Европе, чтобы ускорить их внедрение.

Система поддрессирования. Многие крупнейшие автомобильные производители во всем мире ведут большое количество научно-исследовательских работ по внедрению электроприводов в конструкцию подвески. Цели этих работ разнообразны: повышение управляемости и устойчивости; повышение энергоэффективности; снижение массы и т. д.

С технической точки зрения исследования можно разделить на три направления:

1. Применение электромагнитных устройств в качестве упругого элемента. В данном случае, как правило, применяются линейные магниты с дополнительными устройствами для изменения магнитного поля, позволяющего изменять жесткость подвески. Получившаяся электромагнитная пружина обладает чрезвычайно полезным свойством мгновенной реакции на управляющее воздействие. Никаким

другим способом добиться такой скорости невозможно: гидравлика и пневматика имеют задержки, измеряемые десятками долями секундами [16], что для быстрого изменения мгновенной жесткости неприемлемо. Данное направление имеет очень хорошие перспективы применения. Проведенные опыты доказали возможность реализации и повышение характеристик автомобиля. Однако до серийного внедрения еще далеко: электромагнитная рессора обладает большими габаритами, высокой стоимостью и сложностью.

2. Электромеханические амортизаторы, основанные на применении линейных или вращательных электродвигателей. Основными преимуществами данного типа амортизаторов являются высокая гибкость электромеханических приводов с точки зрения адаптации их характеристик к условиям эксплуатации, меньшая чувствительность к воздействию окружающей среды, в отличие от гидравлических приводов, в которых вязкость рабочей жидкости зависит от температуры. Серьезным преимуществом является также экономия энергии, которую они могут обеспечить, вплоть до рекуперации вырабатываемой электрической энергии обратно в аккумуляторные батареи [17].

3. Разработки, направленные на компенсацию недостатков гидравлических амортизаторов, например, за счет применения специальной магнито-реологической жидкости [18], вязкость которой изменяется под действием магнитного поля.

Безусловно, в настоящий момент говорить о полном отказе от гидравлических и пневматических приводов в автомобильной технике еще рано, хотя по ряду систем такой переход можно считать состоявшимся. При проведении настоящих исследований серьезных работ по развитию гидро- и пневмопривода обнаружено не было, и, вероятнее всего, применяться они будут на достигнутом техническом уровне без серьезного дальнейшего развития.

Серийное производство электромобилей и массовое внедрение городских электробусов [19] придали новый импульс развитию электропривода, что связано с двумя факторами: с одной стороны, появился мощный источник электрической энергии, который способен обеспечить работу всех систем. Однако с другой стороны, емкость батарей не бесконечна [20], в связи с чем необходимо продолжать снижать потери и повышать их энергоэффек-

тивность [21], и с этой точки зрения любое лишнее преобразование энергии только наносит вред.

В целом, судя по интенсивности проводимых исследований мировыми автопроизводителями, прослеживается их желание полностью отказаться от пневмо- и гидропривода. Ряд подобных работ проводится и в отечественной промышленности.

Следует отметить, что желание автопроизводителей технически обосновано. При построении систем, начиная от источника энергии и заканчивая исполнительным устройством, любые преобразования, такие как электрические компрессор и насосная станция, оказываются лишними. В то же время необходимо установить, насколько данный переход обоснован технически по другим параметрам и какие нюансы упускаются. Пневматический и гидравлический привод прошли столетний путь развития на автомобиле, проведена огромная работа по устранению ошибок. В итоге технический облик систем пришел к относительно единообразию, на разных автомобилях наблюдаются аналогичные технические решения и архитектура построения, что, в свою очередь, отражено и в нормативной базе. С какими проблемами придется столкнуться при переходе на электромеханический привод, пока можно только догадываться, ведь по ряду систем его применение находится лишь в начале своего развития. Однако высокий технический уровень и интенсивность текущих разработок, несомненно, позволит в ближайшие 10 лет увидеть на серийных автомобилях новый тип электрической тормозной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бандура, Н. А. Эволюция систем безопасности автомобиля / Н. А. Бандура, В. В. Булычев // Автомобили, транспортные системы и процессы: настоящее, прошлое и будущее: сборник статей 4-й Международной научно-технической конференции, Курск, 20 мая 2022 года / отв. ред. Е.В. Агеев. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 20–22. – EDN NOBLYK.
2. Олещицкий, С. В. Усилители рулевого управления / С. В. Олещицкий, О. Ю. Закурдаева // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых-2018: сборник научных статей 7-й Международной молодежной научной конференции: в 4 т., Курск, 13–14 ноября 2018 года. Том 4. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2018. – С. 143–145. – EDN YTRNQD.
3. Малиновский, М. П. Эволюция систем управления АТС / М. П. Малиновский // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2014. – № 4(39). – С. 22–31. – EDN TAEVTL.
4. Малиновский, М. П. Системы управления колесных машин: учебное пособие / М. П. Малиновский. – М.: МАДИ, 2018. – 100 с. – EDN XOKVNJ.
5. Зленко, М. А. Электричество, водород или е-топливо? / М. А. Зленко, А. С. Теренченко // Труды НАМИ. – 2023. – № 1(292). – С. 56–81. – EDN WDCDVC.
6. Результаты разработки и исследовательских испытаний тяговой аккумуляторной батареи электромобиля / К. М. Сидоров, А. Г. Грищенко, В. Н. Козловский, С. А. Васин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 12. – С. 361–366. – EDN SWTDWJ.
7. Аболтин, Э. В. Современные направления развития систем наддува автомобильных двигателей / Э. В. Аболтин, В. К. Ванин // Труды НАМИ. – 2013. – № 253. – С. 70–84. – EDN REOMON.
8. Меркулов, В. И. Применение электрокомпрессоров в системах кондиционирования воздуха вертолетов / В. И. Меркулов, И. В. Тищенко, С. А. Абалакин // Известия МГТУ МАМИ. – 2019. – № 2(40). – С. 59–66. – EDN SLUION.
9. Сильвестров, Э. Е. К нахождению критических скоростей ротора электронасоса / Э. Е. Сильвестров, В. В. Кореновский // Известия МГТУ МАМИ. – 2010. – № 1(9). – С. 60–66. – EDN LBECKL.
10. Кутепов, П. А. Тенденции и перспективы развития усилителя руля / П. А. Кутепов, Р. А. Малеев // Известия МГТУ МАМИ. – 2013. – Т. 1, № 2(16). – С. 97–101. – EDN RXTIFR.
11. Доманов, В. И. Исследование системы управления электромеханическим усилителем руля / В. И. Доманов, А. В. Доманов // Электротехника. – 2010. – № 8. – С. 46–50. – EDN MSNSXP.
12. Электроусилитель рулевого управления колесного транспортного средства для горных лесов / В. А. Каляшов, В. А. Макуев, С. И. Ревяко, И. В. Григорьев, В. А. Бурмистров // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2022. – № 11. – С. 8–15. – EDN QXGLOA.
13. Малиновский, М. П. Оценка эффективности электропневматического тормозного привода автопоезда с применением итерационного метода / М. П. Малиновский, Е. С. Смолко // Автомобильная промышленность. – 2020. – № 7. – С. 27–32. – EDN GYFGSC.
14. Байков, С. В. Перспективы развития и автоматизации систем торможения колес современных самолетов / С. В. Байков // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2011. – № 1(312). – С. 35–42. – EDN QYVRWT.
15. Земсков, А. В. Типы тормозной системы пассажирских вагонов / А. В. Земсков, М. П. Козлов // Наука. – 2024. – № 6–2. – С. 286–292. – EDN XJBZJD.
16. Malinovsky, M. P. Experimental study of an articulated vehicle performing a lane changing maneuver / M. P. Malinovsky // Science Journal of Transportation. – 2022. – No. S(12). – P. 188–197. – EDN HCRNXG.
17. Стыров, А. Е. Подход к использованию рекуперации энергии в электромеханической активной подвеске транспортного средства / А. Е. Стыров // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 2(80). – С. 106–115. – EDN UIPXCV.
18. Влияние температуры магнитоэологической жидкости на демпфирование вибровозмущений гидравлическими опорами / Б. А. Гордеев, А. И. Ермолаев, С. Н. Охул

ков, А. С. Плехов, Д. Ю. Титов // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102, № 3. – С. 192–201. – EDN TFRWIK.

19. Феофанов, С. А. Электробусы и зарядная инфраструктура в условиях мегаполисов / С. А. Феофанов, Е. М. Лайко, Л. С. Феофанова // Автомобильная промышленность. – 2019. – № 2. – С. 31–35. – EDN YUZJIK.

20. Сидоров, К. М. К вопросу исследования влияния работы климатической установки на запас хода электро-

мобиля / К. М. Сидоров, В. Н. Козловский, Д. И. Панюков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 11. – С. 410–412. – EDN FYQZBH.

21. Жердев, П. И. Способы увеличения пробега и анализ силовых установок электрифицированных транспортных средств / П. И. Жердев, К. Е. Карпукhin // Труды НАМИ. – 2024. – № 3(298). – С. 92–100. – EDN NRDXZZ.

УДК 629.331:629.06

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-96-100

Г. В. Бойко¹, А. П. Федин¹, И. В. Лесковец², М. Л. Петренко²

ЗАВИСИМОСТЬ ТОРМОЗНОГО МОМЕНТА ОТ ВРЕМЕНИ ПРИ ЭКСТРЕННОМ ТОРМОЖЕНИИ АВТОМОБИЛЯ

¹Волгоградский государственный технический университет

²Белорусско-российский университет

boyko@vstu.ru, falexe2005@yandex.ru, leskovets1966@mail.ru, ghost4511@mail.ru

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

В настоящее время актуальной и важной задачей является развитие автоматизированных систем управления различными агрегатами и системами автомобиля. Одной из таких систем является антиблокировочная система торможения автомобиля (АБС), которая обеспечивает безопасность движения в режиме торможения. Для исследования и оптимизации работы антиблокировочной работы целесообразно использовать методы математического и комплексного моделирования. Протекание процесса торможения зависит от величины тормозного момента, который приложен к колесу, поэтому одной из наиболее значимых зависимостей в такой математической модели является зависимость тормозного момента от времени процесса. В данной статье выполнен обзор и определены возможные варианты зависимостей величины тормозного момента от времени процесса торможения для легкового автомобиля.

Ключевые слова: моделирование движения автомобиля, антиблокировочная система торможения, давление в тормозном приводе, тормозной момент

G. V. Boyko¹, A. P. Fedin¹, I. V. Leskovets², M. L. Petrenko²

DEPENDENCE OF THE BRAKING TORQUE ON TIME DURING EMERGENCY BRAKING OF A CAR

¹Volgograd State Technical University

²Belarusian-Russian University

Currently, an urgent and important task is the development of automated control systems for various units and systems of the car. One of these systems is the antilock braking system of the car (ABS), which ensures traffic safety in braking mode. In order to research and optimize operation of the antilock braking systems, it is advisable to use methods of mathematical and complex modelling. The course of the braking process depends on the value of braking torque that is applied to the wheel, therefore one of the most significant dependencies in such a mathematical model is the dependence of the braking torque on the time of the process. This article provides an overview and identifies possible options for the dependence of the braking torque value on the time of the braking process for a passenger car.

Keywords: automobile motion simulation, antilock braking system, brake actuator pressure, brake torque

Для математического моделирования движения автомобиля при экстренном торможении, в том числе оборудованного антиблокировочной системой (АБС), приходится задаваться скоростью нарастания тормозного момента в начальной фазе торможения. Эта величина связана со скоростью нарастания давления

в тормозной системе, которая, в свою очередь, зависит не только от конструктивных особенностей тормозной системы, но и от динамики воздействия водителя на педаль тормоза. В связи с изложенным представляет интерес обобщение экспериментальных данных о динамике нарастания давления в тормозной системе ав-

томобилей при их экстренном торможении. Такие данные приводятся в ряде работ российских и зарубежных исследователей [1; 2; 3].

На рис. 1 представлены зависимости дав-

ления от времени, приведенные в работе Ahmed M. El-Garhy и др. [1]. Зависимости получены при испытаниях легкового автомобиля с АБС.

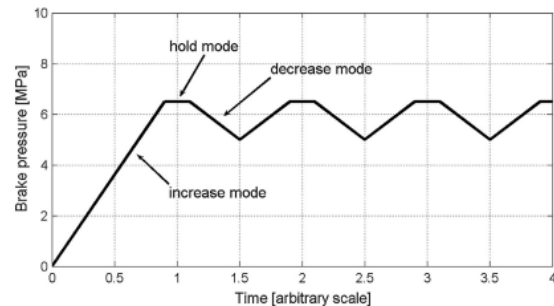
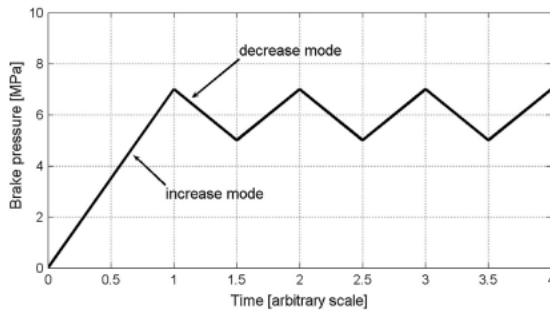


Рис. 1. Зависимость давления в тормозном приводе от времени процесса торможения

Из представленных на рис. 1 зависимостей следует, что зависимость давления в тормозной системе от времени на начальном этапе экстренного торможения является линейной. В данном конкретном случае она имеет вид:

$$p = 7 \cdot t,$$

где p — давление в тормозном приводе, МПа, t — время процесса торможения, с. Темп нарастания давления, как следует из приведенной формулы, равен 7 МПа/с.

Максимальное давление в тормозном приводе в рассматриваемых опытах составило 7 МПа.

В другой серии опытов, рассмотренных в той же работе, темп нарастания давления в тормозной системе был равен 10 МПа/с.

В работе Dr. Biju V. и др. [2] значение темпа нарастания давления в тормозной системе, не оборудованной АБС, составило 4,3 МПа/с, а в системе с АБС — 3,8 МПа/с. Экспериментально полученные зависимости давления в тормозной системе от времени, приведенные в этой работе, представлены на рис. 2. Как видно из графиков на рис. 2, максимальное давление в тормозном приводе достигается через 2,5 с после начала процесса торможения и равно 8 МПа.

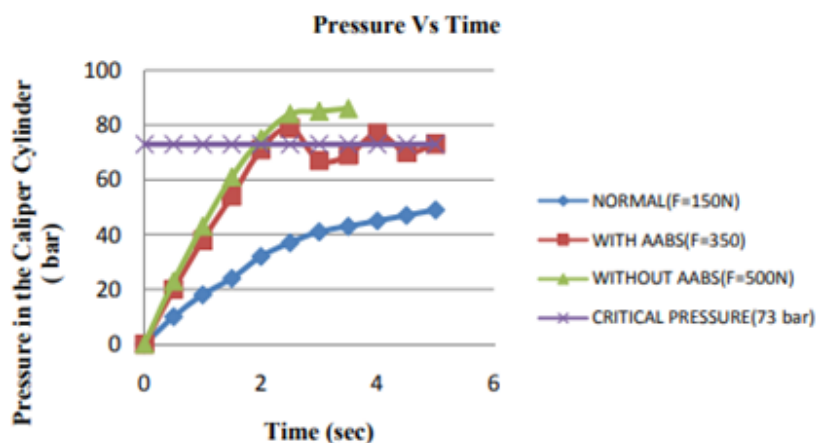


Рис. 2. Зависимость давления в тормозном приводе от времени процесса торможения

В монографии В. Г. Дыгало и А. А. Ревина [3] приведены данные экспериментов, выполненных на виртуально-физическом стенде-тренажере в ВолгГТУ. Согласно этим данным, темп нарастания давления в тормозной системе с АБС может быть принят равным 10,4 МПа/с. Максимальное давление в тормозном приводе

в этих опытах составляло 9 МПа и достигалось примерно через 1 с после начала процесса торможения.

Авторами настоящей статьи из Белорусско-Российского университета были проведены собственные эксперименты по определению темпа нарастания давления и максималь-

ного давления в тормозном приводе легкового автомобиля. Эксперименты проведены на полигоне Белорусско-Российского университета (г. Могилев). Измерения были выполнены на автомобиле «Daewoo Matiz». Манометр для измерения давления был подключен через пе-

реходник к тормозному приводу правого переднего колеса (рис. 3). Воздействие на педаль тормоза производилось максимально резко и сильно. Измерения давления были проведены как с вакуумным усилителем в тормозной системе, так и без него.



а



б

Рис. 3. Оборудование автомобиля для экспериментального определения максимального давления и темпа нарастания давления в тормозном приводе:

а – экспериментальный автомобиль; б – место установки манометра

Полученная в результате выполненных экспериментов осредненная зависимость давления в тормозной системе от времени при экстренном торможении автомобиля приведена на рис. 4.

Из представленных на рис. 4 данных следует, что темп нарастания давления в тормозной системе равен 4,5 МПа/с. Максимальное давле-

ние в тормозном приводе составляет 9,5 МПа и достигается через 2 с после начала процесса торможения.

Приведенные выше данные различных исследователей о значениях темпа нарастания давления и максимального давления в тормозных системах легковых автомобилей при экстренном торможении обобщены в табл. 1.

Зависимость давления в тормозном приводе от времени процесса торможения

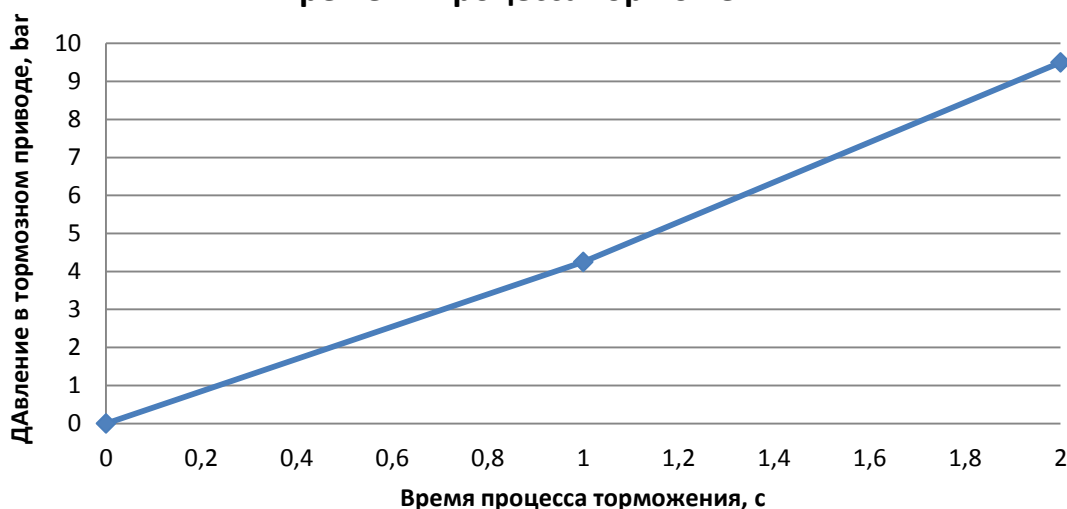


Рис. 4. Зависимость давления в тормозном приводе от времени процесса торможения

Таблица 1

Характеристики давления в тормозном приводе при экстренном торможении

Источник	Темп нарастания давления, МПа/с	Максимальное давление, МПа
Источник [1]	7; 10	10
Источник [2]	3,8	8
Источник [3]	10,4	9
Эксперименты авторов	4,25	9,5

Из представленных в табл. 1 данных можно сделать вывод, что при моделировании экстренного торможения автомобиля с АБС темп нарастания давления в начальной фазе торможения можно принимать в интервале значений от 4 до 10 МПа/с, а максимальное давление равным 9 МПа.

Задавая темп нарастания давления и максимальное давление в тормозной системе, можно определить соответствующие значения для тормозного момента.

Величина тормозного момента, развиваемого однодисковым тормозным механизмом, связана с величиной прижимающей силы F_s следующей формулой [4]:

$$M_T = 2 \cdot \mu \cdot F_s \cdot r_s, \quad (1)$$

где r_s – средний радиус приложения сил трения (рис. 6), м; μ – коэффициент трения между тормозным диском и тормозной накладкой; F_s – нормальная сила, с которой тормозная колодка

воздействует на тормозной диск при торможении, Н.

Радиус r_s может быть примерно определен как:

$$r_s = 0,5 \cdot (R + r), \quad (2)$$

где R – наружный радиус тормозной накладки, м; r – внутренний радиус тормозной накладки, м.

Величина нормальной силы, с которой тормозная колодка воздействует на тормозной диск при торможении, зависит от давления в тормозном приводе и может быть определена по формуле:

$$F_s = p \cdot \frac{\pi \cdot D_{ц}^2}{4}, \quad (3)$$

где p – давление в тормозном приводе, МПа; $D_{ц}$ – диаметр колесного тормозного цилиндра, м.

Величину коэффициента трения для тормозных колодок можно определить по справочным данным табл. 2 [4]:

Таблица 2

Коэффициенты трения для тормозных накладок

Тип материала	Коэффициент трения μ
Каучуковая основа	0,44...0,56
Комбинированная основа	0,42...0,50
Все материалы при предварительных расчетах	0,30...0,35

Для большинства тормозных колодок, которые получили широкое распространение в настоящее время, можно, по нашему мнению, использовать усредненное значение коэффициента трения, равное 0,45.

Расчет тормозного момента можно проиллюстрировать, используя параметры тормозного механизма автомобиля «KIA RIO». Для этого механизма прямыми измерениями получены следующие значения $D_{ц} = 0,038$ м, $R = 0,105$ м; $r = 0,065$ м.

Тогда $r_s = 0,085$ м,

$$F_s = p \cdot \pi \cdot D_{ц}^2 / 4 = p \cdot 1,134 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$$

$$\text{и } M_T = 2 \cdot \mu \cdot F_s \cdot r_s = 2 \cdot 0,45 \cdot p \cdot 1,134 \cdot 10^{-3} = p \cdot 8,672 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Подставляя в последнее выражение полученную ранее зависимость давления в тормозном приводе от времени процесса торможения, получим:

$$M_T = (3,8 \dots 10,4) \cdot t \cdot 8,672 \cdot 10^{-5} =$$

$$= (320 \dots 900) \cdot t \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальное значение тормозного момента, соответствующее давлению 9 МПа, равно 780 Н·м.

Таким образом, при моделировании экстренного торможения автомобиля «KIA RIO» расчет изменения тормозного момента в начальной фазе торможения ведем, задаваясь темпом нарастания этого момента в интервале значений от 320 до 900 Н·м/с, и завершаем расчет начальной фазы при достижении тормозным моментом значения 780 Н·м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ELECTRICAL ENGINEERING Fuzzy Life-Extending Control of Anti-Lock Braking System Ahmed M. El-Garhy, Gamal A. El-Sheikh, Mohamed H. El-Saify Ain Shams Engineering Journal Volume 4, Issue 4, December 2013, Pages 735-751.

2. Design and Testing of Analog Antilock Braking System (AABS) Dr. Biju B., Abhishek P. A., Arshaque M., Don C. P., Salmanul Fariz T. T./ International Journal of Engineering and Technology (IJET) Vol 10 No 4 Aug-Sep 2018 DOI: 10.21817/ijet/2018/v10i4/181004201.

3. Дыгало, В. Г. Виртуально-физическая технология лабораторных испытаний систем активной безопасности автотранспортных средств: монография / В. Г. Дыгало, А. А. Ревин. – М.: Машиностроение, 2012. – 388 с.; ил.

4. Беляев, В. М. Проектирование тормозных систем автомобиля в 2-х частях. Часть I. Тормозная динамика автомобилей. Тормозные механизмы / В. М. Беляев, В. Г. Иванов, Л. А. Молибошко // Учебно-методическое пособие по курсовому и дипломному проектированию для студентов специальности Т04.06 «Автомобили». Белорусская государственная политехническая академия. – Минск, 2000.

Ответственный за выпуск: редактор РИО
А. Н. Сергеева

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

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

Учредитель:

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

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

Темплан 2024 г. (научные издания). Поз. № 20ж. Дата выхода в свет 17.12.2024 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,62. Уч.-изд. л. 11,28.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 565.

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

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