

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 2 (31)
2020



16+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Волг 90
лет
ТТУ



Издается
с января 2004 г.

ISSN 2500-0586

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

Редакционная коллегия:

И. И. Артюхов – д.т.н., проф., СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
Е. В. Балакина – д.т.н., проф., ВолгГТУ
А. В. Баранов – д.ф.м.н., проф.,
РГУ нефти и газа, г. Москва
А. Б. Голованчиков – д.т.н., проф., ВолгГТУ
А. Е. Городецкий – д.т.н., проф., ИПМаш
РАН, г. Санкт-Петербург
А. П. Дармания – д.т.н., проф. ВГАУ,
г. Волгоград
А. М. Иванов – д.т.н., проф.,
МГТУ (МАДИ), г. Москва
А. В. Келлер – д.т.н., проф. НАМИ, г. Москва
В. В. Коротаев – д.т.н., проф., ИТМО,
г. Санкт-Петербург
О. Г. Котиев – д.т.н., проф., МВТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. А. Львов – д.т.н., проф., СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
Мертен Клеменс – д.т.н., проф.,
университет г. Штутгарт, Германия
В. А. Марков – д.т.н., проф., МВТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. Е. Новиков – д.т.н., проф., ВолгГТУ
Б. В. Скворцов – д.т.н., проф., СГАУ
им. академика С. П. Королева, г. Самара
Е. А. Федянов – д.т.н., проф., ВолгГТУ
В. Т. Фомичев – д.т.н., проф., ВолгГТУ
А. Н. Шилин – д.т.н., проф., ВолгГТУ

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

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

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

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

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

№ 2 (31)
Июнь
2020

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

Адрес редакции:
РФ, 400005, Волгоград, пр. В.И. Ленина, 28
Гл. редактор: телефон: – +7 (8442) 23-00-76
e-mail: rector@vstu.ru

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

Официальный сайт Учредителя: www.vstu.ru

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

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

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

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

Статьи печатаются бесплатно



Published since
January 2004 г.

ISSN 2500-0586

Editor-in-chief

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

Editorial Board:

I. I. Artuchov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU, Saratov
E. V. Balakina – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. V. Baranov – D. Sc. (Physical and Math.),
Prof., Gubkin University, Moscow
A. B. Golovanchikov – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. E. Gorodetskij – D. Sc. (Engineering),
Prof., IPME, St. Petersburg
A. P. Darmanyan – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSAU, Volgograd
A. M. Ivanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
MADI, Moscow
A. V. Keller – D. Sc. (Engineering), Prof.,
NAMI, Moscow
V. V. Korotaev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
ITMO University, St. Petersburg
O. G. Kotiev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU, Saratov
M. Clemens – D. Sc. (Engineering), Prof.,
University of Stuttgart, Germany
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. E. Novikov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
B. V. Skvortsov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
Samara University, Samara
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
B. T. Fomichev – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. N. Shilin – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd

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

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

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», 2020

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° (ФЧ77-64543, registration date: 22 January 2016

№ 2 (31)
June
2020

FOUNDER:

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

Periodicity: four times per year

Editorial office address:

Russia, 400005, Volgograd, Lenin avenue, 28. Editor-In-Chief:
tel.: +7 (8442) 23-00-76 e-mail: rector @vstu.ru

Executive Secretary: +7 (8442) 24-84-31 e-mail:
pahp@vstu.ru

Official website: www.vstu.ru

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

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

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

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

The articles are published for free.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аввакумов В. Е. 43
Ахмедова О. О. 10
Беленков П. Г. 32
Блохина М. И. 6
Бобров П. М. 29
Бойко Г. В. 36
Бондаренко Н. Е. 24
Гусев В. Г. 50
Дементьев С. С. 6
Джелассем Б. Б. 39

Дикарев П. В. 15
Зенина Е. Г. 20, 24
Кузнецова Н. С. 36
Макартичан С. В. 39
Нефедьев А. И. 46
Самофалов И. В. 46
Сницарук Д. Г. 29, 32
Торгашин Д. С. 20
Шилин А. А. 10, 15, 32, 36

AUTHOR INDEX

Akhmedova O. O. 10
Avvakumov V. E. 43
Belenkov P. G. 32
Blokhina M. I. 6
Bobrov P. M. 29
Bondarenko N. E. 24
Boyko G. V. 36
Dementiev C. C. 6
Dikarev P. V. 15
Gusev V. G. 50

Jelassem B. B. 39
Kuznetsova N. S. 36
Makartichyan S. V. 39
Nefediev A. I. 46, 50
Samofalov I. V. 46
Shilin A. A. 10, 15, 32, 36
Snitsaruk D. G. 29, 32
Torgashin D. S. 20
Zenina E. G. 20, 24

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Дементьев С. С., Блохина М. И.</i> Диагностика воздушных линий электропередачи с применением системы интеллектуальной импульсной рефлектометрии.....	6
<i>Шилин А. Н., Ахмедова О. О.</i> Экспериментальное исследование влияния внешних погодных условий на сопротивление проводов воздушной линии электропередачи при определении параметров срабатывания релейной защиты.....	10
<i>Дикарев П. В., Шилин А. А.</i> Цифровое моделирование трехфазной линии распределенной электрической сети с помощью сигнальных графов.....	15
<i>Торгашин Д. С., Зенина Е. Г.</i> Алгоритм работы системы учета расхода электрической и тепловой энергии.....	20
<i>Бондаренко Н. Е., Зенина Е. Г.</i> Анализ дефектов гидроагрегата и разработка алгоритма моделирования движения ротора гидроагрегата.....	24
<i>Сницарук Д. Г., Бобров П. М.</i> Цифровая оптико-электронная система для контроля диаметров обечаек.....	29
<i>Шилин А. Н., Сницарук Д. Г., Беленков П. Г.</i> Лабораторный стенд для испытания материалов на горючесть.....	32
<i>Шилин А. Н., Бойко Г. В., Кузнецова Н. С.</i> Сравнительный анализ средств диагностирования технического состояния тормозных колодок автомобиля.....	36
<i>Макартичан С. В., Джелассем Б. Б.</i> Устройство для измерения уровня горючих жидкостей в емкостях.....	39
<i>Аввакумов В. Е.</i> Повышение чувствительности датчика холла при использования импульсного тока возбуждения.....	43
<i>Самофалов И. В., Нефедьев А. И.</i> Интеллектуальная система контроля психоэмоционального состояния водителя автотранспортного средства.....	46
<i>Гусев В. Г., Нефедьев А. И.</i> Современные устройства для тестирования импульсных блоков питания.....	50
К сведению авторов.....	55

CONTENTS

<i>Dementiev C. C., Blokhina M. I.</i> DIAGNOSTICS OF ELECTRIC TRANSMISSION AIR LINES USING THE INTELLECTUAL PULSE REFLECTOMETRY SYSTEM.....	6
<i>Shilin A. N., Akhmedova O. O.</i> EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL WEATHER CONDITIONS ON THE RESISTANCE OF ELECTRIC TRANSMISSION WIRES WHEN DETERMINING THE RELAY PROTECTION OPERATION PARAMETERS.....	10
<i>Dikarev P. V., Shilin A. A.</i> DIGITAL SIMULATION OF A THREE-PHASE LINE OF A DISTRIBUTED ELECTRIC NETWORK USING SIGNAL GRAPHS.....	15
<i>Torgashin D. S., Zenina E. G.</i> ELECTRIC AND HEAT ENERGY CONSUMPTION SYSTEM OPERATION ALGORITHM.....	20
<i>Bondarenko N. E., Zenina E. G.</i> ANALYSIS OF HYDRO-UNIT DEFECTS AND DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR MODELING THE MOTOR ROTOR MOTOR HYDRO-UNIT.....	24
<i>Shilin A. N., Snitsaruk D. G., Bobrov P. M.</i> DIGITAL OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEM FOR CONTROL OF DIAMETERS OF SHELLS.....	29
<i>Shilin A. N., Snitsaruk D. G., Belenkov P. G.</i> LABORATORY STAND FOR FLAMMABILITY TEST.....	32
<i>Shilin A. N., Boyko G. V., Kuznetsova N. S.</i> COMPARATIVE ANALYSIS OF MEANS OF DIAGNOSTIC OF TECHNICAL CONDITION OF CAR BRAKE PADS.....	36
<i>Makartichyan S. V., Jelassem B. B.</i> DEVICE FOR MEASURING THE LEVEL OF FLAMMABLE LIQUIDS IN VESSELS.....	39
<i>Avvakumov V. E.</i> INCREASING SENSITIVITY OF THE HALL SENSOR WHEN USING THE PULSE EXCITATION CURRENT.....	43
<i>Samofalov I. V., Nefedyev A. I.</i> INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF PSYCHO-EMOTIONAL STATE OF A DRIVER OF A VEHICLE.....	46
<i>Gusev V. G., Nefedyev A. I.</i> MODERN DEVICES FOR TESTING PULSE POWER SUPPLIES.....	50

УДК 621.315.17:[621.317.757:004.89]

С. С. Дементьев, М. И. Блохина

**ДИАГНОСТИКА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: c165tc34@yandex.ru

В статье обосновывается необходимость мониторинга воздушных линий электропередачи. Доказывается актуальность внедрения информационно-измерительной системы для автоматизированной диагностики воздушных линий. На основе анализа существующих систем и методик аналогичного назначения делается вывод о перспективности усовершенствования методики импульсной рефлектометрии. Это необходимо ввиду наличия погрешности из-за влияния внешних условий эксплуатации линий. Для коррекции этой погрешности предлагается использовать нейрокомпьютер. Нейрокомпьютер обучается нахождению отношения скорости распространения импульсного сигнала по проводу или грозотросу линии к аналогичному рассчитанному значению. В качестве входных параметров, которыми оперирует нейрокомпьютер, выступают метеорологические данные. Эти данные собираются на всем протяжении трассы линии. Размещаемые на линии метеодатчики получают питание путем отбора мощности, генерируемой на грозотросе за счет наведения напряжения от высоковольтных проводов. Полученные в ходе функционирования нейрокомпьютера данные используются для коррекции соответствующих значений при зондировании линейных проводов. Значительные колебания показаний нейрокомпьютера при использовании различных наборов ранее полученных весов синаптических связей свидетельствует об ухудшении состояния линии.

Ключевые слова: интеллектуальные электрические сети, воздушные линии электропередачи, диагностика гололедообразования на проводах, определение мест повреждений линий электропередачи, локационное зондирование линий электропередачи, искусственные нейронные сети, многослойные перцептроны.

S. S. Dementyev, M. I. Blokhina

**DIAGNOSTICS OF OVERHEAD POWER LINES
USING THE INTELLECTUAL PULSE REFLECTOMETRY SYSTEM**

Volgograd State Technical University

The article describes the need for monitoring overhead power lines. The relevance of implementing an information-measuring system for automated diagnostics of overhead lines is proved. The conclusion about the prospects of improving the methods of pulse reflectometry is based on an analysis of existing systems and methods for a similar purpose. This is necessary due to the presence of an error due to the influence of external operating conditions of the lines. A neurocomputer is used to correct this error. The neurocomputer is trained to find the ratio of the propagation speed of a pulse signal through a wire or lightning protection cable to a similar calculated value. The input parameters used by the neurocomputer are meteorological data. This data is collected throughout the line. The weather sensors placed on the line receive power by taking the power generated on the lightning protection cable by inducing voltage from the high-voltage wires. The data obtained during the functioning of the neurocomputer are used to correct the corresponding values when sensing linear wires. Significant fluctuations in the readings of the neurocomputer when using various sets of previously obtained synaptic link weights indicates a deterioration in the condition of the line.

Keywords: smart grid, overhead power lines, diagnostics of ice formation on wires, determination of places of damage to power transmission lines, pulse sensing of power lines, artificial neural networks, multilayer perceptrons.

Одной из наиболее насущных проблем, стоящих в настоящее время перед энергетиками всех стран, остается высокая аварийность воздушных линий электропередачи (ВЛЭП). Низкая надежность ВЛЭП по сравнению с остальными элементами электрической сети, что наглядно демонстрируют приведенные на рис. 1 показатели, обусловлена рядом объективных факторов, среди которых следует отметить, в первую очередь, исключительную уязвимость конструкции самой воздушной линии перед внешним воздействием, будь то гололедообразование на проводах, давление ветра, нагрев солнечной радиацией и т. д. Часть из всего перечисленного может привести к немедленной аварии, например, обрыву провода под воздействием критической массы гололедных образований или же падению опоры при наличии сильных порывов ветра. Тем не менее даже при отсутствии явных повреждений совокупность перечисленных выше факторов приводит к ухудшению технического состояния линии и увеличению риска последующих неисправно-

стей ввиду накопления остаточных деформаций в материале проводов и опор, их ускоренному физическому износу, о чем упоминается, в частности, в [3].

При этом даже на сегодняшний день задача автоматизированной диагностики воздушных линий электропередачи остается нерешенной, несмотря на безусловную актуальность данной проблемы, о чем говорилось выше, особенно в контексте общей модернизации электрических сетей в русле технологии Smart Grid (дословно «интеллектуальной сети»). Так, в ряде предыдущих публикаций [4, 7] уже отмечались многие недостатки существующих информационно-измерительных систем (ИС), реализующих топографические и дистанционные способы определения мест повреждений (ОМП) на ВЛЭП, различные методики контроля гололедообразования, мониторинга перегрузок по току и общего состояния линии (например, с подвесом эквивалентного «тестового» образца провода [9], путем синхронных измерений мгновенных значений тока и напряжения по концам ВЛЭП [10] и т. д.).

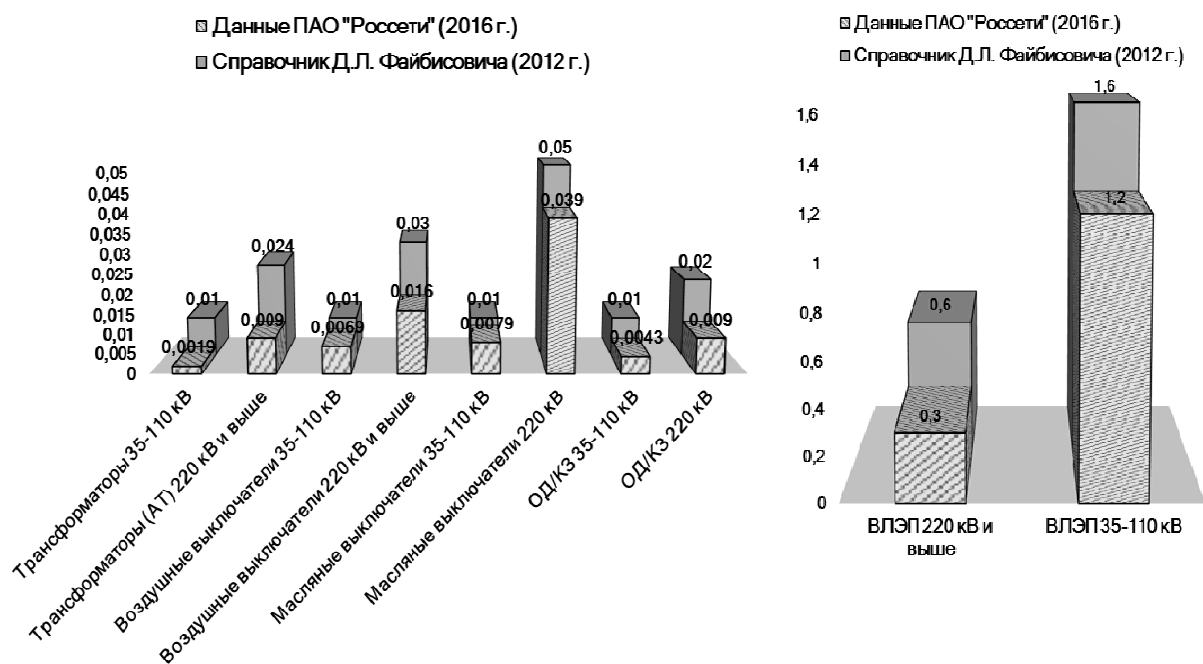


Рис. 1. Статистика отказов элементов электрической сети по причине неисправности (количество отказов в год на 100 км ВЛЭП или единицу оборудования)

Следует подчеркнуть, что большинство из перечисленных ИИС являются узко специализированными, т. е. устанавливаемое по проекту системы оборудование зачастую имеет единственное предназначение – так, в частности, тензоизмерители в составе V-образной изолирующей подвески по патенту [8] используются

лишь для «взвешивания» оледенелых проводов в период гололедообразования, все остальное время оставаясь незадействованными. В связи с этим можно прийти к выводу о том, что одним из наиболее перспективных путей построения многофункциональной измерительной системы для диагностики ВЛЭП является совершенст-

зование локационного метода, подразумевающего применение импульсных рефлектометров.

Важным недостатком данного метода является то, что, как отмечается в [11], скорость распространения импульса в линии зависит не только от конструкции линии и материалов провода и изоляции, но от ряда климатических факторов. Если влияние конструкции и материалов учитывается и корректируется при испытании на конкретном участке линии, то зависимость параметров линии и соответственно коэффициента укорочения от климатических факторов в известных устройствах не учитывается – при этом, несмотря на явное указание об этом, в [11] предлагается использовать ряд функциональных зависимостей, определяющих связь между погонными параметрами линии и такими величинами, как температура воздуха, электрическая проводимость земли, влажность воздуха. Такой подход имеет ряд недостатков:

1. Указываемые в [11] уравнения носят приблизительный характер, кроме того, не для каждого климатического параметра они известны. Например, отсутствуют аналитические выраже-

ния для описания зависимости электрических параметров линии от влажности воздуха или давления окружающей среды, а описание влияния рельефа местности на емкостную составляющую проводимости ВЛЭП является крайне сложным [5]. Данные выражения не могут быть получены и потому в [11] не приводятся.

2. В [11] отсутствует упоминание о распределенном характере измерений климатических параметров вдоль трассы линии, в то время как измерение данных величин в какой-либо одной точке на линии не может являться репрезентативным по причине явного изменения метеорологической обстановки, а также состава грунта, не говоря о невозможности учета рельефа местности на всем протяжении линии.

С учетом всего перечисленного выглядит логичным отказ от попыток поиска аналитического описания взаимосвязи разнообразных параметров среды с условиями распространения электрического импульса в пользу аппроксимации данной функции при помощи искусственной нейронной сети (ИНС) прямого распространения, изображенной на рис. 2.

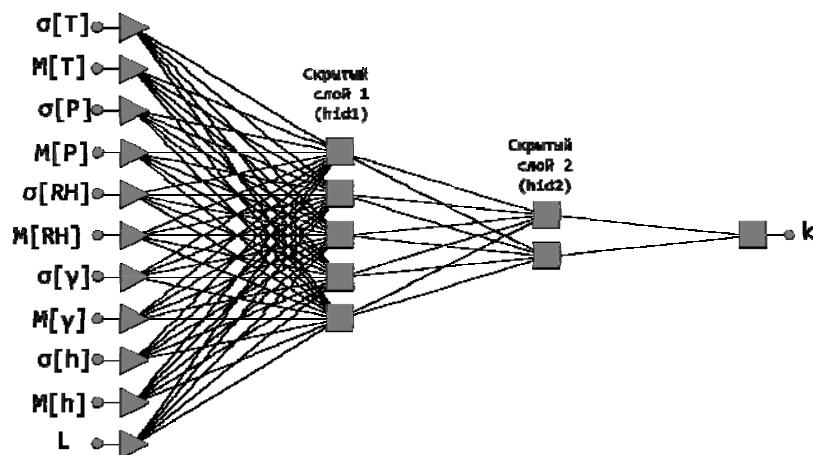


Рис. 2. Нейронная сеть, аппроксимирующая функцию влияния внешней среды на процесс распространения зондирующего импульса

Здесь входной вектор включает в себя среднеквадратическое отклонение и математическое ожидание таких величин, как температура провода T , атмосферное давление P , влажность воздуха RH , удельная электропроводность грунта γ , габарит провода до земли h (вычисленный исходя из данных о рельефе местности и температурной деформации провода на участках линии), а также расстояние L до неоднородности волнового сопротивления, отразившей зондирующий импульс. Выходным параметром, характеризующим влияние упомяну-

тых факторов, является коэффициент k , представляющий собой отношение значения скорости распространения импульса, зафиксированной при непосредственно в процессе рефлектометрии $v_{изм}$, к вычисленному значению $v_{теор}$, определяемому как [1]

$$v_{теор} = \frac{\omega}{\beta},$$

где ω – угловая частота, Гц; β – коэффициент фазы длинной линии, рассчитываемой с использованием параметров схемы замещения

линии без учета каких-либо внешних факторов воздействия.

Таким образом, предлагаемая система интеллектуальной импульсной рефлектометрии с коррекцией погрешности, вызванной влиянием внешней среды, имеет следующее устройство (рис. 3). Оценка воздействия климатических факторов может осуществляться путем зондирования высокочастотными импульсами грозозащитного троса 1, разземленного на всем протяжении ВЛЭП и имеющего искусственные неоднородности волнового сопротивления, размещаемые на заданном удалении друг от друга. В качестве этих неоднородностей могут выступать места подключения к тросу устройств отбора мощности, генерируемой на тросе посредством емкостного наведения ЭДС (порядка 6–6,6 кВ при напряжении ВЛЭП 110–115 кВ [2]) от фазных проводов; данные устройства необходимы для питания метеодатчиков. В режиме зондирования грозозащитного троса, генератор

импульсов 3 подключается к тросу посредством переключателя режимов измерений 4 конденсатора связи 5, рассчитанного на напряжение 6 кВ, а также устройство защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) 7. При подаче импульсов на фазный провод 2 посредством переключателя 4 коммутируется конденсатор связи 6, рассчитанный на напряжение электропередачи, например, 110 кВ. На заданных опорах размещаются УЗИП 7, однофазный трансформатор 6/0,22 кВ 8, питающий метеодатчики 9, а также прочие измерители 10 (например, видеорегистраторы провисания [6]) и приемопередатчик данных 11. Передающиеся от модуля 11 к модулю по радиоканалу на нелицензируемой частоте 2,4 ГГц пакеты данных 12 аккумулируются блоком сбора информации 13 на конечной подстанции. Получаемая информация используется анализатором отраженных импульсов 14, совмещенным с нейрокомпьютером 14.

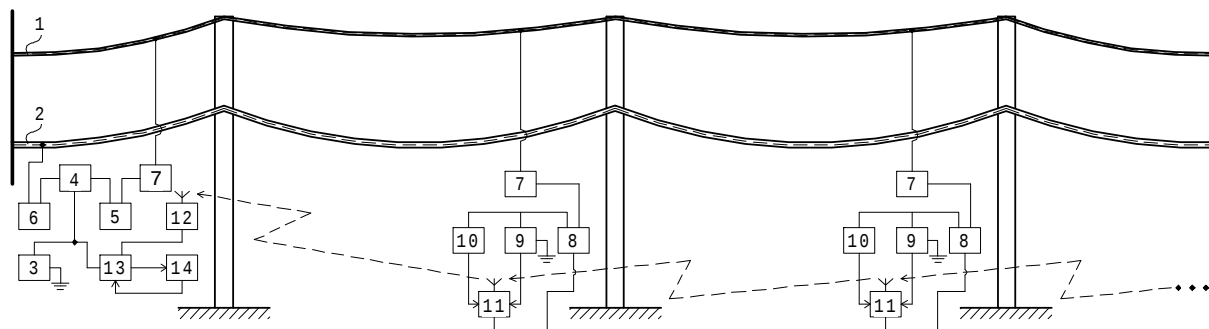


Рис. 3. Структурная схема системы интеллектуальной импульсной рефлектометрии

Формирование обучающей выборки для нейрокомпьютера (см. рис. 2) происходит посредством анализа прохождения импульсов, отраженных поочередно от n отстоящих на известном расстоянии x друг от друга неоднородностей грозотроса (путем сравнения измеренного и рассчитанного значений скорости распространения импульса $k = v_{\text{изм}} / v_{\text{теор}}$), а также соотношения полученных коэффициентов k с сопутствующими условиями (T ; P ; RH ; γ ; h ; $L = i \cdot x$, где $i = \overline{1, n}$). Таким образом, путем подбора весов синаптических связей нейронная сеть «обучается» количественной оценке трудно формализуемого влияния текущих внешних условий на процесс распространения зондирующего импульса. Следовательно, данные, сгенерированные нейрокомпьютером, могут использоваться для коррекции результатов импульсной рефлектометрии при зондировании уже фазного провода в целях ОМП.

Немаловажным является и то, что, выполняя обучение нейронной сети на основе данных периодических зондирований фазных проводов, можно судить об изменении технического состояния линии. Это достигается посредством сравнения между собой величин коэффициентов, сгенерированных нейронной сетью при одних и тех же входных значениях, но с использованием весов синаптических связей, зарегистрированных при обучении сети в предыдущие промежутки времени. Колебания величин коэффициентов, характеризующих влияние окружающей среды, что выражается в увеличении информационной энтропии, однозначным образом указывает на ухудшение состояния воздушной линии.

Резюмируя все вышесказанное, можно прийти к выводу о широких перспективах применения метода импульсной рефлектометрии в «умной» электроэнергетике для целого спек-

тра насущных задач, будь то поиск места аварии на ВЛЭП, контроль гололедообразования на проводах или количественной оценки общего состояния воздушной линии с целью принятия оперативного решения об ее реконструкции или ремонте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Юрайт, 2016. – 701 с.
2. Булашевич, Д. Н. Емкостный отбор мощности от линий электропередачи / Д. Н. Булашевич, В. Д. Юренков. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1959. – 136 с.
3. Кесельман, Л. М. Основы механики воздушных линий электропередачи / Л. М. Кесельман. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 352 с.
4. Шилин, А. Н. Диагностика коротких замыканий на воздушных линиях электропередачи с применением искусственной нейронной сети / А. Н. Шилин, С. С. Дементьев // Электротехнические комплексы и системы: материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 24 октября 2018 г.) / редкол.: Ф. Р. Исмагилов (отв. ред.) [и др.] ; ФГБОУ ВО «Уфимский гос. авиационный технический ун-т». – Уфа, 2018. – С. 252–255.
5. Шилин, А. Н. Моделирование сопротивления воздушных линий электропередачи / А. Н. Шилин, С. С. Дементьев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – Т. 14, № 3. – С. 5–11.
6. Шилин, А. Н. Designing Video Measuring Device for Monitoring Ice Deposits on Overhead Power Lines / А. Н. Шилин, С. С. Дементьев // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 90, Issue 5. – P. 407–411.
7. Шилин, А. Н. Smart Tower of Overhead Power Lines [Электронный ресурс] / А. Н. Шилин, А. А. Шилин, С. С. Дементьев // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (Sochi, Russia, 25–29 March, 2019) / South Ural State University (national research university), IEEE Industry Applications Society, IEEE Power Electronics Society [et al.]. – [Publisher: IEEE], 2019. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742991.
8. Пат. 2273932 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16, Н 04 В 3/54. Устройство телеизмерения гололедной, ветровой и гололедно-ветровой нагрузок на провод промежуточного пролета воздушной линии электропередачи с индикацией относительного направления ветра / Башкевич В. Я., Гапоненков М. П., Аверьянов С. В., Золотарев В. И., Угаров Г. Г. – 2006.
9. Пат. 2534753 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 5/04. Способ косвенного контроля температуры провода воздушных линий электропередачи / Мустафин Р. Г.; ФГБОУ ВПО «КГЭУ». – 2014.
10. Пат. 2542597 Российская Федерация, МПК G 01 R 27/16. Способ контроля качества проводов воздушной линии электропередачи / Мустафин Р. Г.; ФГБОУ ВПО «КГЭУ». – 2015.
11. Пат. 2712771 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/11 Интеллектуальное устройство для измерения расстояния до места повреждения линий электропередачи / Шилин А. Н., Шилин А. А., Кузнецова Н. С., Авдеюк Д. Н.; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2020.

УДК 621.311

А. Н. Шилин¹, О. О. Ахмедова²

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

¹ Волгоградский государственный технический университет

² Камышинский технологический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета

e-mail: eltech@vstu.ru¹; Ahmedova-olga@mail.ru²

В статье приведен анализ экспериментальных данных влияния внешних факторов, таких как температура воздуха, влажность на сопротивление грунта и провода воздушной линии электропередач. Параметры воздушных линий электропередачи используются алгоритмами многих устройств релейной защиты и автоматики, правильное их определение необходимо для обеспечения корректного функционирования систем релейной защиты и автоматики. Результаты анализа могут быть использованы при проектировании систем релейной защиты.

Ключевые слова: линии электропередачи, активное сопротивление, релейная защита и автоматика.

A. N. Shilin¹, O. O. Akhmedova²

EXPERIMENTAL STUDY OF INFLUENCE EXTERNAL WEATHER
RESISTANCE TERMS ELECTRIC TRANSMISSION WIRES WHEN DETERMINING
THE RELAY PROTECTION OPERATION PARAMETERS

¹ Volgograd State Technical University

² Kamyshinsky Institute of Technology (branch)
of Volgograd State Technical University

The analysis of experimental data of influence of external factors, such as air temperature, humidity on resistance of soil and a wire of an overhead power transmission line is provided in article. Parameters of overhead power transmission lines are used by algorithms of many relay protection devices and automatics, their correct determination is necessary to ensure correct functioning of re-relay protection systems and automatics. The results of the analysis can be used in the design of relay protection systems.

Keywords: power transmission lines, active resistance, relay protection and automation.

Устройства РЗА обладают не только функциями защит, но и дополнительными, такими как определение места повреждения, запись осциллограмм аварийных ситуаций, контроль параметров сети и т. д., заложенными производителями, в отличие от предшественников микропроцессорные терминалы обладают высокой точностью в установке параметров защиты. Но не смотря на это устройство РЗ до сих пор, могут срабатывать «ложно», либо «излишне» или же «не сработать». Причина такого поведения микропроцессорных терминалов заключается в неучете внешних факторов, воздействующих на ВЛЭП, в связи с чем при определенных условиях погрешность может превышать нормируемое 5 %-ное значение, рассчитанное лишь для нормальных погодных

условий. Произведем исследование влияния внешних погодных условий на продольные параметры воздушной линии электропередачи.

Экспериментальное определение зависимостей сопротивления грунта от влажности и температуры

Для экспериментального исследования влияния влажности и температуры грунта на его сопротивления была разработана лабораторная установка на базе прибора М 416 и прибора измеряющего влажность грунта.

Измерение сопротивления заземления прибором М-416 основано на компенсационном методе с применением вспомогательного заземлителя и потенциального электрода (зонда).

Для проведения исследований, использовалась установка, представленная на рис. 1.

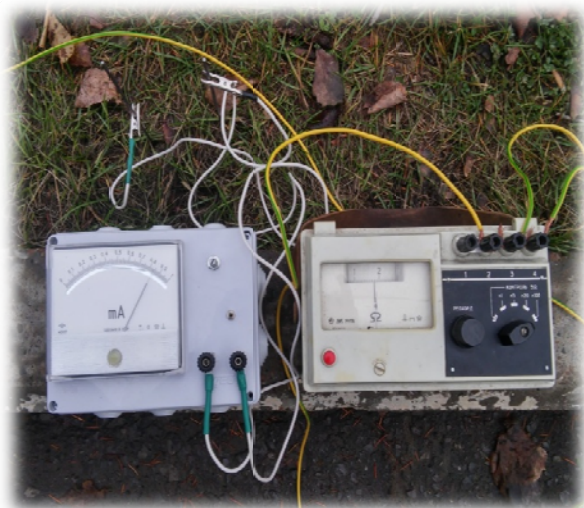


Рис. 1. Лабораторная установка, измерения сопротивления от влажности грунта

Из анализа экспериментальных данных прослеживается четкая зависимость между сопротивлением грунта и влажностью почвы,

на основании которых были построены следующие зависимости (рис. 2).

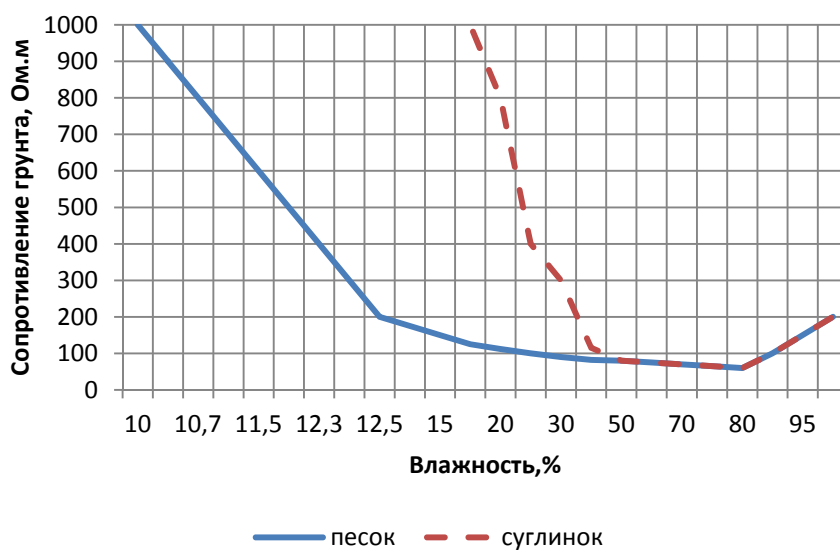


Рис. 2. Изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от содержания в нем влаги

Любые виды грунтов в абсолютно сухом состоянии имеют большое удельное сопротивление, так как сухие соли, безводные кислоты, твердые основания практически не проводят электрический ток. При увлажнении грунта из-за растворения солей в воде, кислот и оснований, а также из-за проводимости воды удельное сопротивление грунта уменьшится на несколько порядков. Т. е. проводимость грунта обусловлена почвенным раствором, являющимся электролитом и обладающим ионной проводимостью, следовательно, чем больше в грунте влаги и растворимых веществ, тем меньше его сопротивление. На основании эксперименталь-

ных данных, резкое снижение удельного сопротивления грунта происходит при влажности 15–20 % для песка и 20–30 % для суглинка. Дальнейшее увеличение влажности грунта (независимо от его вида) практически не влияет на его сопротивление, но при достижении увлажненности более 70–80 % снизится концентрация растворимых в воде веществ и соответственно сопротивление немного увеличится.

Анализ зависимости величины сопротивления грунта от температуры представлен на рис. 3, эксперимент проводился в диапазоне температур грунта от -15 до $+15$ °С.

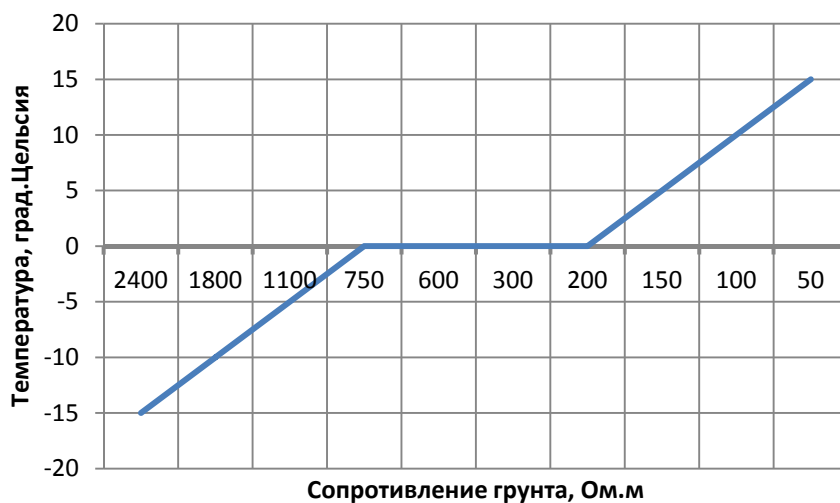


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления грунта (суглинок) от температуры

Из экспериментальных данных следует, что с увеличением температуры удельное сопротивление грунта уменьшается, так как возрастает концентрация ионов в растворе. Данный процесс прослеживается до момента начала испарения влаги, затем сопротивление грунта резко возрастет. Стремительный нагрев грунта до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит при прохождении тока короткого замыкания. Высушивание грунта за счет быстрого испарения влаги приводит к резкому увеличению сопротивления в верхнем слое почвы толщиной около 50–60 см, следова-

тельно, необходимо рассматривать сопротивление грунта как многослойного. Анализ слоистой структуры грунта был экспериментально исследован при различных погодных условиях и экспериментальные данные представлены на рис. 4, для исследования сопротивления на глубине от 0,5 до 3 метров использовался изолированный электрод по всей поверхности, за исключением 10 см на конце электрода, для произведения измерений сопротивления грунта на требуемой глубине без распределения по всей площади погруженного в грунт электрода.

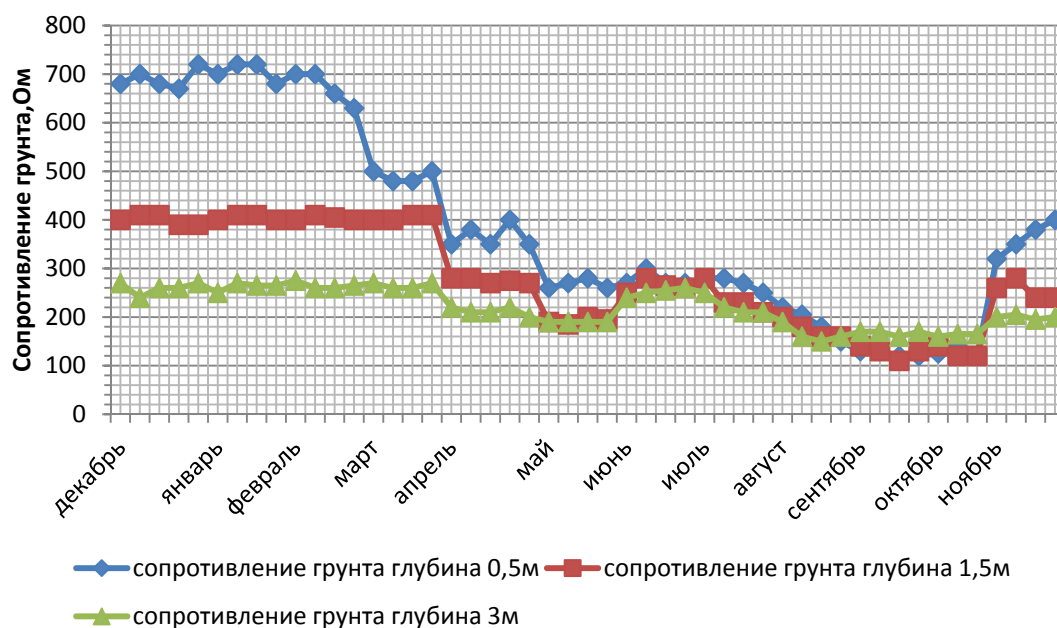


Рис. 4. Изменение удельного сопротивления грунта по месяцам

Уменьшение удельного сопротивления прослеживалось осенью и весной, так как в эти периоды происходит таяние снега и обильные дожди, которые увеличивают содержание влаги в почве, а в зимний и летний периоды сопротивление грунта возрастает из-за вымерзания либо испарения влаги. Из анализа экспериментальных данных следует, что наибольшему влиянию сезонных колебаний подвержены верхние слои грунта, более глубокие слои обладают более стабильным сопротивлением.

При замерзании влаги в грунте (при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже) удельное сопротивление льда выше чем сопротивление воды из-за содержания в воде солей. Поэтому образовавшийся в грунте лед в виде тонких прослоек не проводит ток, и препятствует его прохождению по грунту, тем самым, уменьшая проводящее сечение и удлинняя путь тока. Дальнейшее по-

нижение температуры также приводит к увеличению сопротивления грунта, но с меньшей интенсивностью.

Анализ полученных данных подтвердил зависимость изменения сопротивления грунта от сезонных колебаний температуры и влажности окружающей среды.

Определение зависимости сопротивления провода от изменения температуры окружающей среды

Для определения зависимости сопротивления провода от изменения температуры окружающей среды была разработана установка, представлена на рис. 5.

В эксперименте был применен провод АС120, подключенный к понижающему трансформатору, к первичной обмотки которого были подключены ЛАТР и стабилизатор напряжения. С помощью которых обеспечивался

стабильный ток 100А во вторичной обмотке трансформатора. Провод помещался в клима-

тическую камеру, в которой моделировалось изменение температуры окружающей среды.



Рис. 5. Климатическая экспериментальная камера

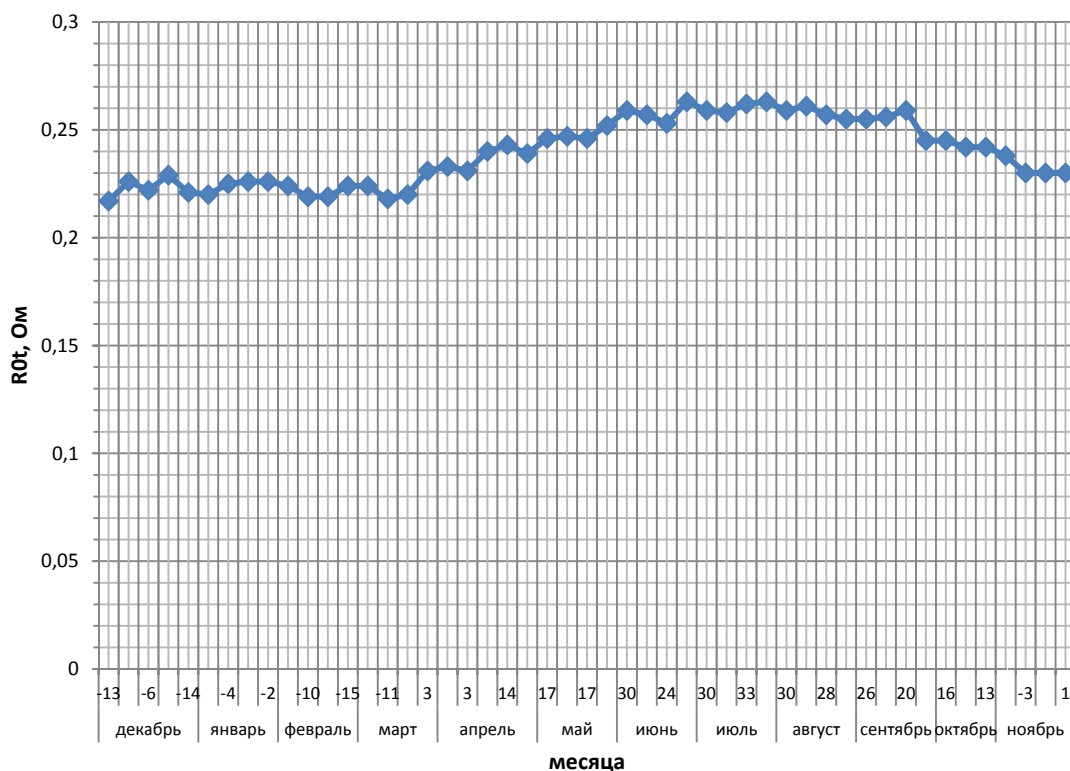


Рис. 6. Изменение активного сопротивления провода от температуры окружающей среды

Повышение температуры провода на 10 °С приводит к увеличению сопротивления провода на 4 %.

Проведенные экспериментальные исследования по выявлению зависимости сопротивления грунта и проводов ВЛЭП от внешних факторов окружающей среды подтвердили работоспособность управляющей системы релейной защиты с автоматической корректировкой установки срабатывания.

Выводы: Из результатов исследования следует, что информация об удельной проводимости земли, полученная с помощью справочников, значительно отличается от реальной проводимости и поэтому для повышения достоверности срабатывания релейной защиты измерительные преобразователи необходимо устанавливать на разных участках линии, почвы которых отличаются. Также установлена зависимость изменения активного сопротивления

провода от изменения температуры окружающей среды, следовательно, необходимо на линии контролировать температуру ВЛЭП для корректного выставления уставки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров, Г. Н. Параметры воздушных линий компактной конструкции / Г. Н. Александров, Г. А. Евдокунин, Г. В. Подпоркин // *Электричество*. – 1982. – № 4. – С. 10–17.
2. Ахмедова, О. О. Достоверность срабатывания релейной защиты в энергетике / О. О. Ахмедова, А. Н. Шилин // *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. ИНФО–2016* : сб. тр. XIII междунар. науч.-практ. конф. (г. Сочи, 1–10 окт. 2016 г.) / редкол.: С. У. Увайсов (гл. ред.), И. А. Иванов (отв. ред.) [и др.] / Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского [и др.]. – Москва, 2016. – С. 175–176.
3. Ахмедова, О. О. Исследование влияния условий ок-

ружающей среды на параметры воздушных линий электропередачи для корректировки уставок систем релейной защиты в реальном времени / О. О. Ахмедова, А. Н. Шилин // *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт*. – 2017. – № 2 (19). – С. 32–36.

4. Бессолицын, А. В. Анализ методов расчета сопротивления взаимоиндукции между проводами воздушных линий / А. В. Бессолицын, В. А. Попов // *Вятский научный сборник*. – 2008. – Киров. – С. 16–21.

5. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Ростов-н/Д.: Феникс; Красноярск : Издательские проекты, 2006. – 720 с.

6. Гольштейн, В. Г. Математическое моделирование продольных токов смещения и поверхностного эффекта в многослойной земле и проводах линий электропередачи / В. Г. Гольштейн, Н. В. Сайдова, А. К. Танаев // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки*. – 2004. – Вып. 30. – С. 170–177.

УДК 621.311

П. В. Дикарев, А. А. Шилин

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛЬНЫХ ГРАФОВ

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: dikarev.pavel@mail.ru

В настоящее время при внедрении интеллектуальных электрических сетей, одной из главных проблем является низкая достоверность устройств релейной защиты при аварийных режимах. Это обусловлено тем, что на ток короткого замыкания, а, следовательно, и на уставку влияет большое число внешних факторов, таких как влажность земли и атмосферы, температура внешней среды, состояние почвы, рельеф местности и т. д. Однако помимо факторов внешней среды, в трехфазной линии электропередачи существуют еще внутренние параметры линии, которые оказывают влияние на ток короткого замыкания. Это такие параметры, как взаимная индуктивность и электрическая емкость между фазами линии, электрическая емкость и проводимость между фазой и землей, а также индуктивность фазы.

В статье приведена математическая модель для расчета переходных процессов в линиях с распределенными параметрами. Рассмотрено влияние емкости и индуктивной составляющих трехфазной линии электропередачи на ток короткого замыкания одной фазы этой же линии. При разработке модели использована теория сигнальных графов. Полученная модель сравнительно просто решается численным методом и может быть использована при разработке интеллектуальной системы релейной защиты распределенных электрических сетей.

Ключевые слова: переходные процессы, линии с распределенными параметрами, теория сигнальных графов, аварийные режимы линий электропередачи, преобразование Лапласа.

P. V. Dikarev, A. A. Shilin

DIGITAL MODELING OF THE THREE-PHASE LINES OF THE DISTRIBUTED ELECTRIC NETWORK USING SIGNAL GRAPHS Volgograd State Technical University

Currently, with the introduction of intelligent electrical networks, one of the main problems is the low reliability of relay protection devices in emergency conditions. This is due to the fact that a large number of external factors, such as the humidity of the earth and atmosphere, the temperature of the environment, the state of the soil, the terrain, etc., affect the short circuit current, and, consequently, the setpoint. However, in addition to environmental factors, in a three-phase power line there are also internal line parameters that affect the short-circuit current. These are parameters such as mutual inductance and electric capacitance between the phases of the line, electric capacitance and conductivity between phase and earth, and phase inductance.

The article presents a mathematical model for calculating transients in lines with distributed parameters. The influence of capacitive and inductive components of a three-phase power line on the short circuit current of one phase of the same line is considered. When developing the model, the theory of signal graphs was used. The resulting model is relatively easy to solve numerically and can be used to develop an intelligent relay protection system for distributed electrical networks.

Keywords: transients, lines with distributed parameters, theory of signal graphs, emergency modes of power lines, Laplace transform.

Введение

Аппарат сигнальных графов широко используется при моделировании в различных областях техники, а именно в электроэнергетике, на транспорте, в телекоммуникациях и т. д. Основным преимуществом этого аппарата является то, что с его помощью можно выявлять причинно-следственные связи между различными физическими величинами. В отличие от алгебраических преобразований, разработанный метод позволяет значительно упростить эту операцию, причем определять причинно-следственные связи между двумя величинами при большом их количестве и преобразовывать структуру графа к более простой схеме [4].

Эта задача актуальна для исследования причинно-следственных связей в линии электропередачи, и особенно при анализе аварийных режимов. Аварийные режимы могут происходить в одном проводе (например, обрыв провода), в двух или трех проводах (например, короткое замыкание), поэтому с помощью сигнальных графов можно определить отдельный вклад каждой составляющей на общий характер переходного процесса при аварии. Кроме того, эта модель может быть использована при разработке методов идентификации аварийных режимов по характеру переходного процесса [4].

Необходимо отметить, что принцип действия большинства средств определения мест повреждения линий основаны на физических процессах, протекающих в линиях с распре-

ленными параметрами. При оценке методических погрешностей, вносимых изменениями различных параметров, обусловленных внешними климатическими условиями, необходимо уравнение, связывающее параметры с функцией напряжения и тока в конце линии. Для этого нужны уравнения в форме передаточных функций, с помощью которых можно смоделировать все возможные аварийные режимы.

Однако метод сигнальных графов применим для объектов, описываемых линейными алгебраическими уравнениями. Поэтому чтобы использовать теорию графов в моделировании динамических процессов, описываемых дифференциальными уравнениями, необходимо использовать операторный метод, основанный на преобразовании Лапласа. В этом случае граф называется диаграммой состояния, а в его передачах имеются операторы. Линии с распределенными параметрами описываются уравнениями в частных производных, то есть учитываются временные и пространственные функции, поэтому в данном случае необходимо использовать двойное преобразование Лапласа, а именно по времени и расстоянию [1].

Построение сигнального графа трехфазной линии

Описанную выше методику моделирования рассмотрим на примере трехфазной воздушной линии электропередачи [2], изображенной на рис. 1.

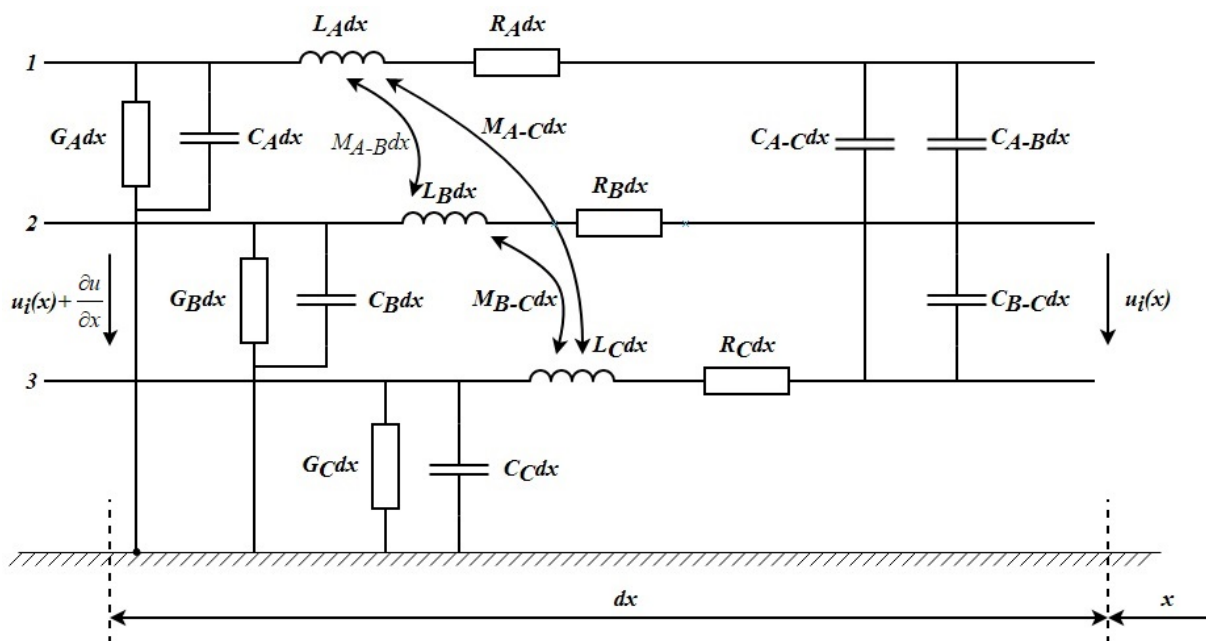


Рис. 1. Схема трехфазной воздушной линии электропередачи

Данную линию можно представить в виде системы уравнений в частных производных первого порядка по длине линии x и времени t [2]:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_A}{\partial x} + L \frac{\partial i_A}{\partial t} + Ri_A + M \frac{\partial i_B}{\partial t} + M \frac{\partial i_C}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial i_A}{\partial x} + C_3 \frac{\partial u_A}{\partial t} + Gu_A + C_\Phi \frac{\partial u_B}{\partial t} + C_\Phi \frac{\partial u_C}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial u_B}{\partial x} + L \frac{\partial i_B}{\partial t} + Ri_B + M \frac{\partial i_A}{\partial t} + M \frac{\partial i_C}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial i_B}{\partial x} + C_3 \frac{\partial u_B}{\partial t} + Gu_B + C_\Phi \frac{\partial u_A}{\partial t} + C_\Phi \frac{\partial u_C}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial u_C}{\partial x} + L \frac{\partial i_C}{\partial t} + Ri_C + M \frac{\partial i_A}{\partial t} + M \frac{\partial i_B}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial i_C}{\partial x} + C_3 \frac{\partial u_C}{\partial t} + Gu_C + C_\Phi \frac{\partial u_A}{\partial t} + C_\Phi \frac{\partial u_B}{\partial t} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где u_A, u_B, u_C – напряжение фазы A, B и C соответственно, В; i_A, i_B, i_C – сила тока фазы A, B и C соответственно, А; $L = L_A = L_B = L_C$ – собственная индуктивность фазы, Гн; $R = R_A = R_B = R_C$ – продольное активное сопротивление фазы, Ом; $G = G_A = G_B = G_C$ – поперечная активная проводимость утечки изоляции фазы на землю, 1/Ом; $C_3 = C_A = C_B = C_C$ – поперечная емкость между фазой и землей, Ф; $C_\Phi = C_{A-B} = C_{B-C} = C_{C-A}$ – поперечная емкость между фазами, Ф; $M = M_{A-B} = M_{B-C} = M_{C-A}$ – взаимная индуктивность между фазами, Гн;

В результате применения преобразования Лапласа по временной переменной – t получена система уравнений в операторной форме:

$$\begin{cases} \frac{dU_A(x, p)}{dx} + LpI_A(x, p) + RI_A(x, p) + MpI_B(x, p) + MpI_C(x, p) = 0, \\ \frac{dI_A(x, p)}{dx} + C_3pU_A(x, p) + GU_A(x, p) + C_\Phi pU_B(x, p) + C_\Phi pU_C(x, p) = 0, \\ \frac{dU_B(x, p)}{dx} + LpI_B(x, p) + RI_B(x, p) + MpI_A(x, p) + MpI_C(x, p) = 0, \\ \frac{dI_B(x, p)}{dx} + C_3pU_B(x, p) + GU_B(x, p) + C_\Phi pU_A(x, p) + C_\Phi pU_C(x, p) = 0, \\ \frac{dU_C(x, p)}{dx} + LpI_C(x, p) + RI_C(x, p) + MpI_A(x, p) + MpI_B(x, p) = 0, \\ \frac{dI_C(x, p)}{dx} + C_3pU_C(x, p) + GU_C(x, p) + C_\Phi pU_A(x, p) + C_\Phi pU_B(x, p) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Это система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, которая может быть решена с применением преобразования Лапласа по пространственной переменной – x , при условии, что изображения начальных значений $U(0, p)$ и $I(0, p)$ можно рассматривать как изображения известных величин. Это означает, что их оригиналы $u(0, t)$ и $i(0, t)$, т. е. напряжение и ток, в начале линии заданы. В математических преобразованиях введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty u^{-sx} U(x, p) dx &= U(s, p), \\ \int_0^\infty u^{-sx} I(x, p) dx &= I(s, p). \end{aligned} \quad (3)$$

С помощью преобразования Лапласа по x системы уравнений (3) получена система алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} sU_A(s, p) - U_A(0, p) + (Lp + R)I_A(s, p) + I_B(s, p)Mp + I_C(s, p)Mp = 0, \\ sI_A(s, p) - I_A(0, p) + (C_3p + G)U_A(s, p) + U_B(s, p)C_\Phi p + U_C(s, p)C_\Phi p = 0, \\ sU_B(s, p) - U_B(0, p) + (Lp + R)I_B(s, p) + I_A(s, p)Mp + I_C(s, p)Mp = 0, \\ sI_B(s, p) - I_B(0, p) + (C_3p + G)U_B(s, p) + U_A(s, p)C_\Phi p + U_C(s, p)C_\Phi p = 0, \\ sU_C(s, p) - U_C(0, p) + (Lp + R)I_C(s, p) + I_A(s, p)Mp + I_B(s, p)Mp = 0, \\ sI_C(s, p) - I_C(0, p) + (C_3p + G)U_C(s, p) + U_A(s, p)C_\Phi p + U_B(s, p)C_\Phi p = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Для решения системы уравнений (4) используем аппарат сигнальных графов, а для удобства построения сигнального графа, пре-

образуем систему уравнений (4) в более удобную форму:

$$\begin{cases} U_A(s, p) = \frac{1}{s}(U_A(0, p) - I_A(s, p)(Lp + R) - I_B(s, p)Mp - I_C(s, p)Mp), \\ I_A(s, p) = \frac{1}{s}(I_A(0, p) - U_A(s, p)(C_3p + G) - U_B(s, p)C_\phi p - U_C(s, p)C_\phi p), \\ U_B(s, p) = \frac{1}{s}(U_B(0, p) - I_A(s, p)Mp - I_B(s, p)(Lp + R) - I_C(s, p)Mp), \\ I_B(s, p) = \frac{1}{s}(I_B(0, p) - U_A(s, p)C_\phi p - U_B(s, p)(C_3p + G) - U_C(s, p)C_\phi p), \\ U_C(s, p) = \frac{1}{s}(U_C(0, p) - I_A(s, p)Mp - I_B(s, p)Mp - I_C(s, p)(Lp + R)), \\ I_C(s, p) = \frac{1}{s}(I_C(0, p) - U_A(s, p)C_\phi p - U_B(s, p)C_\phi p - U_C(s, p)(C_3p + G)). \end{cases} \quad (5)$$

Уравнениям (5) соответствует сигнальный граф, представленный на рис. 2.

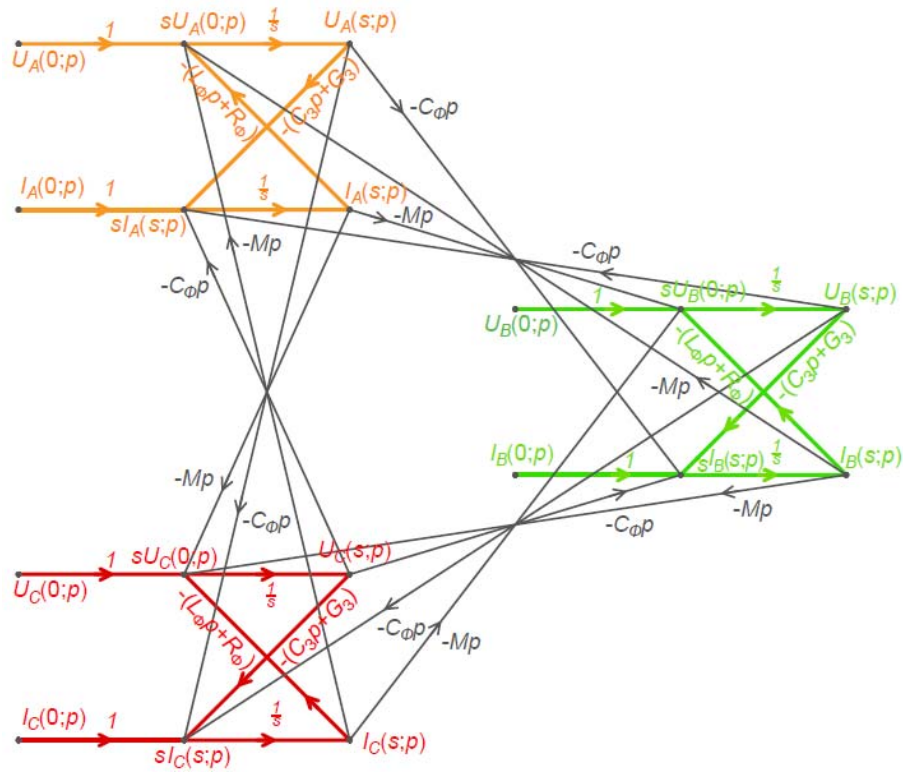


Рис. 2. Сигнальный граф трехфазной воздушной линии

Для искомого графа контуры обратной связи L определяются следующими уравне-

ниями. $U_A(0;p)$

Контур обратной связи фаз A, B, C :

$$L_\phi = L_A = L_B = L_C = -\frac{1}{s}(C_3p + G) \cdot \left(-\frac{1}{s}(Lp + R)\right) = \frac{(C_3p + G)(Lp + R)}{s^2} \quad (6)$$

Контур обратной связи между фазами:

$$L_{M\phi} = L_{AB1} = L_{BC1} = L_{CA1} = -\frac{1}{s} \cdot C_\phi p \cdot \left(-\frac{1}{s} \cdot Mp\right) = \frac{MC_\phi p^2}{s^2} \quad (7)$$

Для определения причинно-следственных связей между переменными графа – передаточной функции используем правило Мезона [3], которое выражается формулой передачи графа от узла i к узлу k :

$$W_{ik} = \frac{[(P_1 + P_2 + \dots + P_n)(1 - L_1)(1 - L_2) \dots (1 - L_n)]^*}{[(1 - L_1)(1 - L_2) \dots (1 - L_n)]^*}, \quad (8)$$

где $P_1, P_2, \dots, P_n$ – передачи всех возможных путей от узла i к узлу k ; $L_1, L_2, \dots, L_n$ – передачи

всех контуров, содержащихся в графе; * – звездочки в выражении означают операции, при которых из выражения следует исключить такие произведения, в которых содержатся хотя бы один путь и контур или два контура, касающиеся друг друга.

С помощью правила (18) могут быть определены передачи ветвей между входными и выходными переменными, а искомым граф преобразован к двум графам с более простой структурой (рис. 3).

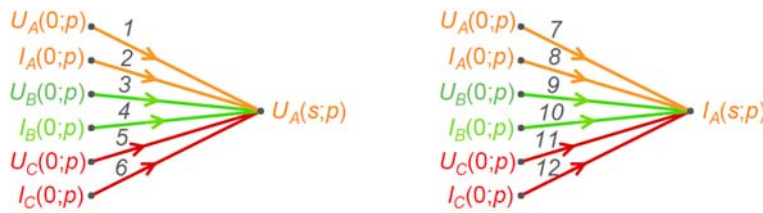


Рис. 3. Преобразованный сигнальный граф трехфазной воздушной линии

Далее определим передачи ветвей графов, которые являются передаточными функциями в исходном графе

Для удобства выделим контур L_{ABC} – общий для всех передач между переменными и соответственно определяется уравнением:

$$L_{ABC} = [(1 - L_{AA}) \cdot (1 - L_{BB}) \cdot (1 - L_{CC}) \cdot (1 - L_{AB}) \cdot (1 - L_{BC}) \cdot (1 - L_{CA})]^*. \quad (9)$$

* – звездочки в выражении означают операции, при которых из выражения следует исключить такие произведения, в которых содержатся хотя бы один путь и контур или два контура, касающиеся друг друга.

Раскроем скобки:

$$\begin{aligned} L_{ABC} = & 1 + L_A \cdot L_B - L_B \cdot L_C - L_{AB} - L_{CA} - L_{BC} - L_A + \\ & + L_A \cdot L_C + L_B \cdot L_C + L_A \cdot L_{BC} + L_B \cdot L_{CA} + L_C \cdot L_{AB} + \\ & + L_{AB} \cdot L_{CA} + L_{AB} \cdot L_{BC} + L_{CA} \cdot L_{BC} - L_A \cdot L_B \cdot L_C \end{aligned} \quad (10)$$

Так как

$$L_\Phi = L_A = L_B = L_C, L_{M\Phi} = L_{AB} = L_{BC} = L_{CA}, \text{ то:}$$

$$L_{ABC} = 1 + 3L_{M\Phi} + 3L_\Phi L_{M\Phi} \quad (11)$$

Подставив выражения (6–9) в (13), получим:

$$\begin{aligned} L_{ABC} = & 1 + \frac{(C_3 p + G)(Lp + R)}{s^2} + 3 \frac{MC_\Phi p^2}{s^2} + 3 \frac{(C_3 p + G)(Lp + R) MC_\Phi p^2}{s^2} = \\ = & 1 + \frac{(C_3 p + G)(Lp + R) + 3MC_\Phi p^2}{s^2} + 3 \frac{(C_3 p + G)(Lp + R) MC_\Phi p^2}{s^4} \end{aligned} \quad (12)$$

Передача пути между переменными $U_A(0,p) - U_A(s,p)$ (ветвь 1):

$$P_1 = 1 \cdot \frac{1}{s}. \quad (13)$$

Передаточная функция W_1 :

$$\begin{aligned} W_1 = & \frac{[P_1 \cdot L_{ABC}]^*}{L_{ABC}} = \frac{P_1 \cdot (1 - L_\Phi)(1 - L_\Phi)(1 - L_{M\Phi})(1 - L_{M\Phi})}{1 + 3L_{M\Phi} + 3L_\Phi L_{M\Phi}} = \\ = & \frac{P_1 \cdot (1 + 2L_\Phi L_{M\Phi})}{1 + 3L_{M\Phi} + 3L_\Phi L_{M\Phi}} \end{aligned} \quad (14)$$

Подставив выражения (6–9, 15) в (16), получим:

$$W_1 = \frac{\frac{1}{s} \cdot (1 + 2 \frac{(C_3 p + G)(Lp + R) MC_\Phi p^2}{s^2})}{1 + \frac{(C_3 p + G)(Lp + R) + 3MC_\Phi p^2}{s^2} + 3 \frac{(C_3 p + G)(Lp + R) MC_\Phi p^2}{s^4}} \quad (15)$$

Упростим:

$$W_1 = \frac{s^4 + 2(C_3 p + G)(Lp + R)MC_\phi p^2}{s^5 + s^3(C_3 p + G)(Lp + R) + 3MC_\phi p^2 + 3s(C_3 p + G)(Lp + R)MC_\phi p^2}$$

Введем переменные $A = (C_3 p + G)(Lp + R)$ и $B = MC_\phi p^2$, тогда:

$$W_1 = \frac{s^4 + 2AB}{s^5 + s^3 A + 3B + 3sAB} \quad (16)$$

Заключение

Полученные выражения для передаточных функций отдельно по напряжению и току в отличие от более общих передаточных функций [2], позволяют моделировать все аварийные режимы в сетях, поскольку при аварийных режимах часто изменяются две переменные (ток и напряжение). Использование теории сигнальных графов в моделировании переходных процессов в линии позволяет разрабатывать модели с учетом влияния различных факторов.

Для составления полной математической модели необходимо решить выражение 16 с помощью обратного преобразования Лапласа, однако сложность заключается в том, что в существующих таблицах преобразования Лапласа [1] нет похожих выражений, которые можно использовать для нахождения решения. Тем не менее, существуют еще другие способы реше-

ния данного выражения, которые сравнительно просто реализуется на компьютере, а использование аппарата z-преобразований поможет упростить переход от изображения к оригиналу функции

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Деч, Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования: пер. с нем. / Г. Деч. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1971. – 288 с.
2. Каганов, З. Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы / З. Г. Каганов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
3. Шилин, А. Н. Анализ электрических цепей в установившихся режимах: учебное пособие / А. Н. Шилин, Е. Г. Зенина, О. А. Крутякова. – Волгоград, 2006. – 84 с.
4. Шилин, А. Н. Цифровое моделирование линий с распределенными параметрами с помощью сигнальных графов / А. Н. Шилин, И. Ю. Рыбкина // Электрика. – 2013. – № 5. – С. 29–32.

УДК 621.317.18

Д. С. Торгашин, Е. Г. Зенина

АЛГОРИТМ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УЧЕТА РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Московский энергетический институт (филиал), г. Волжский

e-mail: bd34@yandex.ru

Рассмотрены и составлены логические алгоритмы схем для счетчика. Задан лимит потребления пользователей. Создан интерфейс для программы отслеживаемой на удаленной дистанции.

Ключевые слова: контроль потребления ресурсов; точечные потери; поиск потерь; ликвидация потерь.

D. S. Torgashin, E. G. Zenina

ALGORITHM OF SYSTEM OPERATION FOR ACCOUNTING OF ELECTRIC AND HEAT ENERGY CONSUMPTION

Moscow Power Engineering Institute (branch), Volzhsky

Logical algorithms of schemes for the counter are considered and compiled. The user consumption limit is set. Created an interface for a program tracked at a remote distance.

Keywords: control of resource consumption; point losses; search for losses; elimination of losses.

Введение

Потери электроэнергии являются важнейшим показателем эффективности передачи и распределения электроэнергии, где большая

часть потерь происходит на стадии потребителя. Если выявить и снизить уровень потерь у потребителя, то повысится энергоэффективность и КПД потребителей электроэнергии.

**Алгоритм работы системы
для учета расхода
электрической и тепловой энергии**

Алгоритм работы автоматизированной системы контроля и учета потребляемых ресурсов приведен на рис. 1.

Проектируемая автоматизированная система предназначена для введения учета за потребляемыми энергоресурсами, сбора и обработки этих данных, а также при соответствующей возможности и необходимости – для автоматизированной передачи этих данных в организации, предоставляющие ресурсы. При этом также требуется постоянный контроль за отдельно взятыми узлами данной системы.

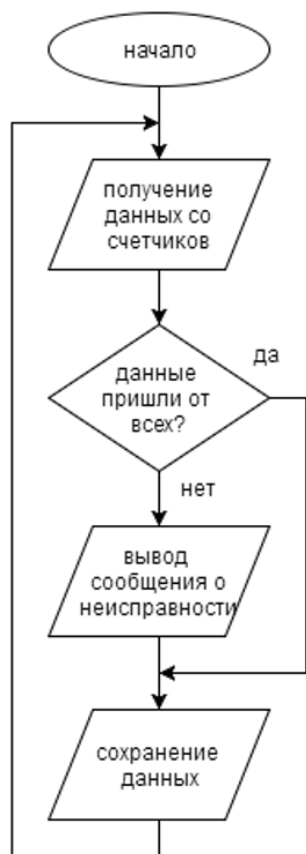


Рис. 1. Алгоритм работы в штатном режиме получения данных систем

В этом режиме работы счетчики присылают данные своих показаний на АРМ. Система проверяет значения показаний счетчиков. В том

случае, если значение потребления ресурса, полученное от счетчика, оказывается меньше, чем предыдущее значение потребления, полученное оператором и сохраненным в базу данных, появляется сигнализация ошибки на графическом интерфейсе оператора.

Если же новое значение потребления является значением большим, чем предыдущее, система просто переходит к следующему шагу работы – к обработке и сохранению данных в базе данных. При этом сохраняются основные информационные показатели: дата и время, идентификатор счетчика, от которого получено данное значение, и само значение показания. Затем система переходит на прием следующих данных. Алгоритм работы системы при наличии ограничения на потребление ресурсов за учетный определенный промежуток времени приведен на рис. 2. Для реализации лимитного оповещения оператора требуется учитывать несколько параметров:

- 1) последнее показание основного счетчика предприятия по данному виду потребляемого ресурса;
- 2) показание основного счетчика предприятия, занесенное в базу данных на начало учетного периода, на который распространяется лимит потребления ресурса;
- 3) само значение лимита на данный период времени.

Система вычисляет потребление ресурса за учетный период путем нахождения разницы показаний на конец (последнее значение показания расхода, полученное от основного счетчика) и на начало учетного периода. При сравнении значения разницы и лимита система делает вывод о состоянии потребления данного вида ресурса:

- перерасход – если потребление ресурса за определенный период превысил значение лимита, выделенное на это время;
- норма расхода – если значения расхода и лимита равны за период;
- лимит не достигнут – если потребление за период оказался ниже предполагаемого значения на этот период.

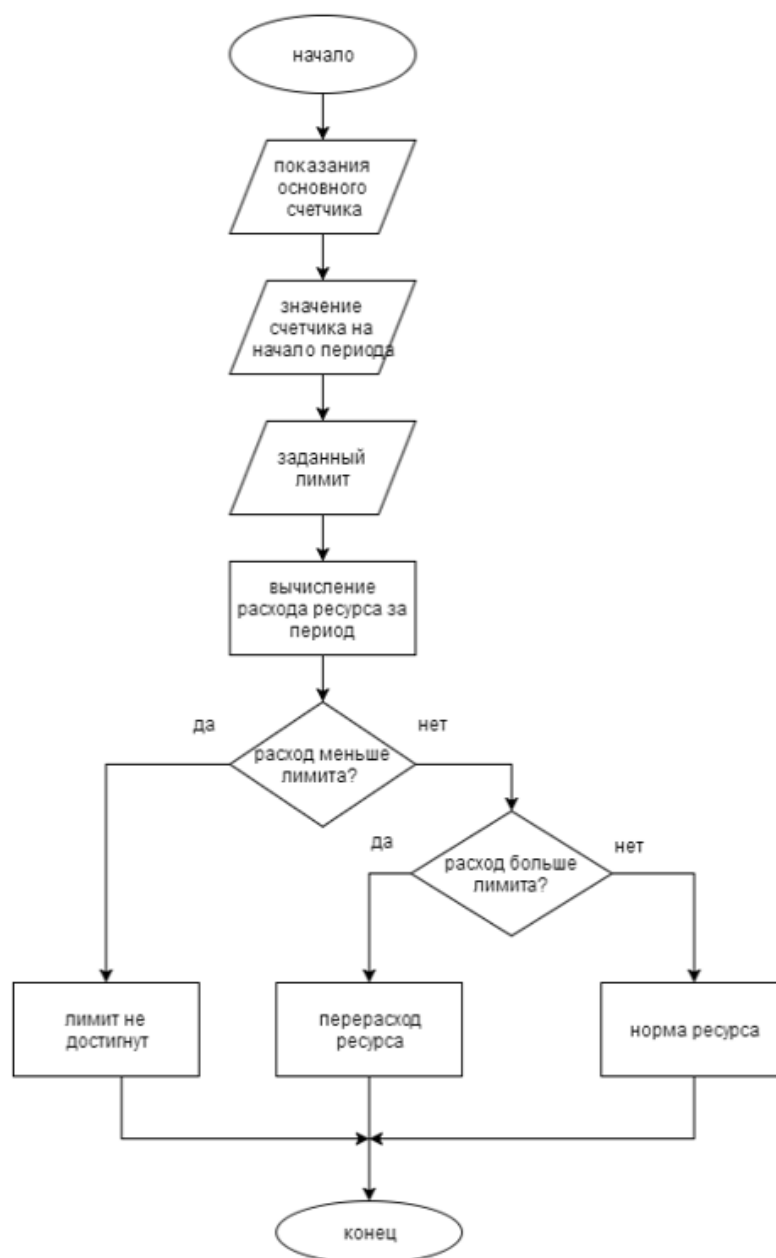


Рис. 2. Алгоритм работы системы при наличии ограничения потребления ресурсов за учетный период

Разработаем управляющую программу для выполнения алгоритмов работы системы при наличии ограничения на потребление ресурсов за учетный период (рис. 1) и проверки системы на наличие утечки ресурсов (рис. 2).

Реализуем алгоритм в виде FBD-диаграммы. Реализация алгоритма работы системы (рис. 3).

Для реализации управляющего алгоритма, изображенного на рис. 1, необходим ввод в разрабатываемую программу трех значений:

znach_o – в значение этой переменной передается последнее значение показания счетчика общего расхода потребляемого ресурса

предприятием;

znach_nachalo – данная переменная предназначена для ввода показания общего расхода ресурса на начало учетного периода (на начало отсчета лимита);

znach_lim – переменная для ввода значения параметра ограничения (лимита потребления ресурса предприятием за период).

Выходы данной программы lim_ne_dostignut, pererashod и norma передают свое значение на графический интерфейс АРМа для индикации соответствующего состоянию расхода потребляемого ресурса в зависимости от установленного лимита.

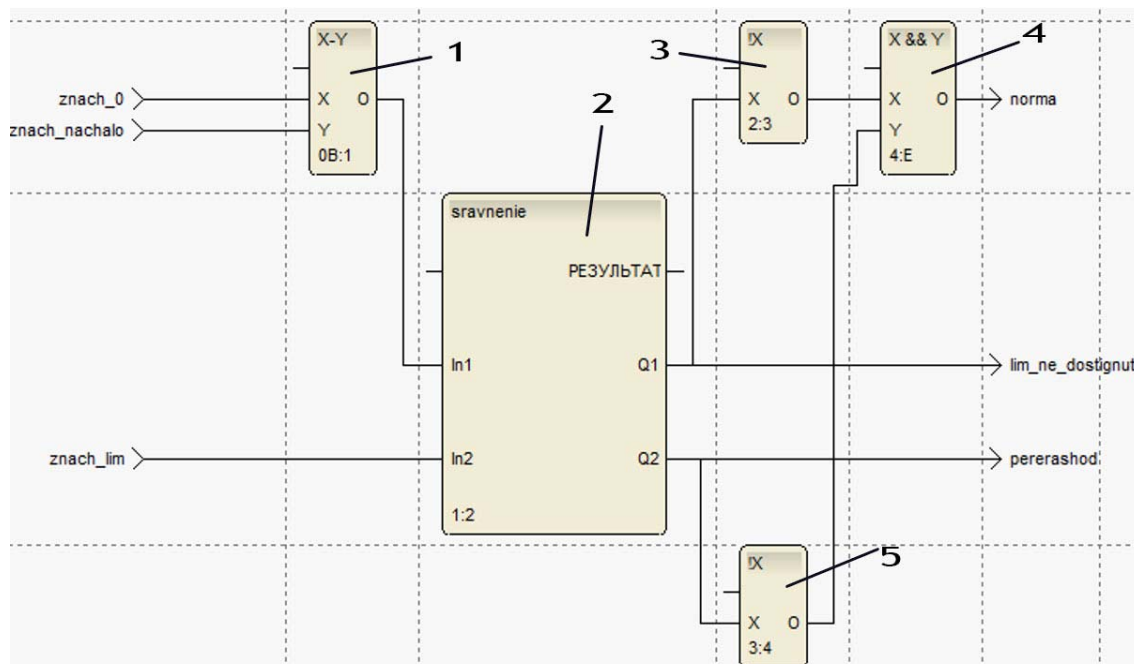


Рис. 3. Реализация алгоритма работы системы при наличии ограничения на потребление ресурсов:

- 1 – блок, рассчитывающий разницу между расходом общего и начального показания учета счетчика;
 2 – блок, реализующий алгоритм сравнения показаний счетчиков за предыдущие месяцы; 3, 5 – блок логической инверсии;
 4 – блок логического умножения

При реализации программы по алгоритму проверки системы на наличие утечки ресурсов в виде FBD-программы (рис. 2). Входными данными являются показания дополнительных счетчиков, а также показание основного счетчика расхода ресурса. Данная программа рабо-

тает для системы, которая состоит из основного счетчика – znach_0; и 3 дополнительных: znach_1 – показание счетчика № 1; znach_2 – показание счетчика № 2; znach_3 – показание счетчика № 3.

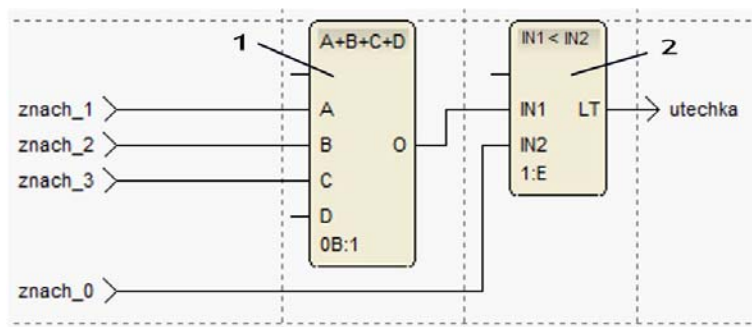


Рис. 4. Программная реализация информирования оператора об утечке ресурсов:

- 1 – блок, рассчитывающий сумму общих показаний предприятия; 2 – блок, реализующий сравнение двух значений, если IN1 больше IN2 то приходит информация о том, что возможна утечка электроэнергии

Переменная utechka является выходным параметром блоков (рис. 4) утечки на графическом интерфейсе оператора и сигнализирует оператору, что обнаружена утечка в сети в оп-

ределенном участке сети (рис. 5). После чего проверяют данный участок сети с потерями и находят утечку энергии, которая может являться хищением или неисправностью сети.



Рис. 5. Графический интерфейс пользователя системы:

1 – кнопка «проверка счетчиков»; 2 – кнопка «проверка на утечку»; 3 – кнопка «проверка лимита»

При воздействии на кнопку «проверка счетчиков» происходит проверка получаемых данных со счетчиков. Нажатие на графический элемент «проверка на утечку» запускает программу проверки на утечку ресурсов из системы снабжения внутри предприятия. В случае обнаружения программой факта утечки потребляемого ресурса загорается красная панель с надписью «Внимание. УТЕЧКА РЕСУРСА!!!». Воздействие на элемент «проверка лимита» осуществляется проверка состояния расхода ресурса по отношению к лимиту, заданному в поле ниже.

В нижней части панели проверки лимита находятся индикаторы, сигнализирующие оператору о состоянии потребления ресурса, которые дают знать о состоянии счетчиков потребителя: «Лимит не достигнут», «Норма», а также «ПЕРЕРАСХОД РЕСУРСА!».

Данную систему можно применять и для тепловых сетей.

Таким образом, применение данного алгоритма позволит выявить потери электрической и тепловой энергии на уровне хищения потребителем. Данный алгоритм позволит провести анализ данных от потребителя и выявить потери на определенном участке, произвести проверку для поиска точной утечки и ликвидировать проблему.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балдин, М. Н. Основное оборудование электрических сетей [Электронный ресурс]: справочник / М. Н. Балдин, И. Г. Карапетян – Электрон. текстовые данные. – М.: ЭНАС, 2014. – 208 с.
2. Правила устройства электроустановок [Текст] / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 648 с.

УДК 621.311

Н. Е. Бондаренко, Е. Г. Зенина

АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ГИДРОАГРЕГАТА И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ РОТОРА ГИДРОАГРЕГАТА

Московский энергетический институт (филиал), г. Волжский

e-mail: bondarenkonatali1999@mail.ru

Разработка новых методов вибродиагностики гидроагрегата остается актуальной и в настоящее время. Методы, применяемые на электростанциях, не позволяют в полной мере оценить влияние дефектов на агрегат, а также своевременно обнаружить новые дефекты. В данной работе рассмотрены и проанализированы основные виды дефектов гидроагрегата. На основе этого представлена функциональная модель для контроля вибрации. Описан числовой метод расчета биений вала при наличии различных дефектов и значений целевой функции.

Ключевые слова: вибродиагностика; дефекты гидроагрегата; биения вала; математическая модель; функциональная модель.

N. E. Bondarenko, E. G. Zenina

ANALYSIS OF HYDRO-UNIT DEFECTS AND DEVELOPMENT OF HYDRO-UNIT ROTOR MOTION SIMULATION ALGORITHM

Moscow Power Engineering Institute (branch), Volzhsky

The development of new methods of vibration diagnostics of a hydraulic unit remains relevant at the present time. The methods used in power plants do not allow to fully assess the effect of defects on the unit, as well as timely detect new defects. In this paper, the main types of defects of a hydraulic unit are considered and analyzed. Based on this, a functional model for vibration control is presented. A numerical method for calculating the shaft beat in the presence of various defects and values of the objective function is described.

Keywords: vibration diagnostics; hydraulic unit defects; beating of the shaft; mathematical model; functional model.

Введение

В единой энергосистеме ГЭС выполняют очень важную функцию регулятора частоты и напряжения. Также из-за относительной легкости регулирования, в сравнении с другими видами электростанций, ГЭС исполняет роль аварийного и эксплуатационного резерва. Именно поэтому необходимо обеспечивать высокий уровень надежности основного оборудования ГЭС, в особенности гидроагрегатов. Несмотря на все способы обеспечения надежности агрегата, вероятность образования и развития дефектов достаточно велика. В настоящее время также продолжают различные исследования в области диагностики гидроагрегатов. В основном все методы диагностики основаны на

наблюдениях в процессе работы или при осмотрах и испытаниях. Но главной проблемой в этой сфере остается отсутствие преждевременного выявления дефектов на стадии развития. Это возможно только благодаря теоретическим моделям процессов в гидроагрегате, которые бы позволяли оценивать его состояние. Выявление дефектов на ранней стадии развития очень важно и их устранение может обеспечить: повышение надежности и КПД, снижение затрат на ремонты, сокращение времени простоя, продление срока службы.

Гидроагрегат подвергается множеству воздействий, из-за чего разнообразность дефектов очень велика. Основные дефекты представлены в таблице [1].

Основные дефекты гидроагрегатов

№	Дефекты ротора генератора	
	Название дефекта	Причина возникновения
1	Механический дисбаланс ротора	Неуравновешенные массы на роторе
2	Электромагнитный дисбаланс ротора	Асимметрия вращающегося магнитного поля ротора, межвитковые замыкания в обмотке возбуждения
3	Несовпадение электрических осей ротора и статора	Разность в высотном положении средних линий
4	Волна обода ротора	Ослабление прессовки обода, натяга обода
Дефекты турбины		
1	Механический дисбаланс рабочего колеса	Неуравновешенные массы
2	Гидравлический дисбаланс рабочего колеса	Нарушение симметрии распределения давления
3	Отклонение рабочего колеса от осевого положения	Отсутствие симметрии рабочего колеса, увеличенное динамическое усилие
4	Рассогласование углов установки лопастей турбины	Неправильная установка лопастей, увеличенное давление на поверхность лопасти

Для выявления дефектов было разработано множество методов вибрационной диагностики, которые можно выделить в две большие группы:

1. По данным измерений вибрации непод-

вижных частей гидроагрегата. Благодаря данному методу можно выявить такие дефекты, как механические дисбалансы, витковые замыкания в обмотке ротора, несимметрия в схеме обмоток, ослабление креплений обмоток и т. д.

2. По данным измерений биений вала. Данный метод позволяет выявить: увеличенные зазоры между валом и сегментами подшипников, нарушения линии вала, витковое замыкание в роторе, двойное замыкание на землю в роторе, искажения формы ротора.

Второй метод продолжает активно развиваться. Анализ показывает, что в теоретической модели процессов гидроагрегата можно учесть

биения вала. Данных о влиянии различных дефектов на значения биения вала недостаточно, так как проведение опытов и измерений на реальном работающем гидроагрегате невозможно. Именно поэтому актуальным вопросом остается разработка методики моделирования биений вала, основанной на движении ротора агрегата. Данная модель изображена на рис. 1.

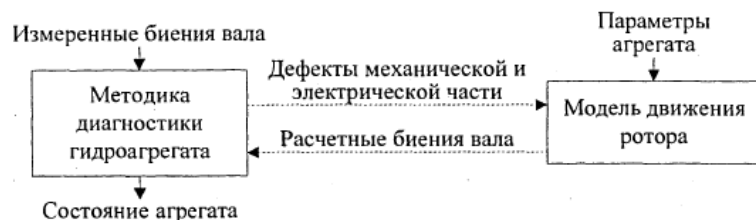


Рис. 1. Выявление дефектов по результатам измерения биений вала

Система диагностирования по данным контроля вибрации представлена в виде функциональной модели на рис. 2. Ее основа похожа на структурную схему простейшей системы регулирования.

Для вывода математической модели удобно использовать неподвижную прямоугольную систему координат $OXYZ$ (рис. 3).

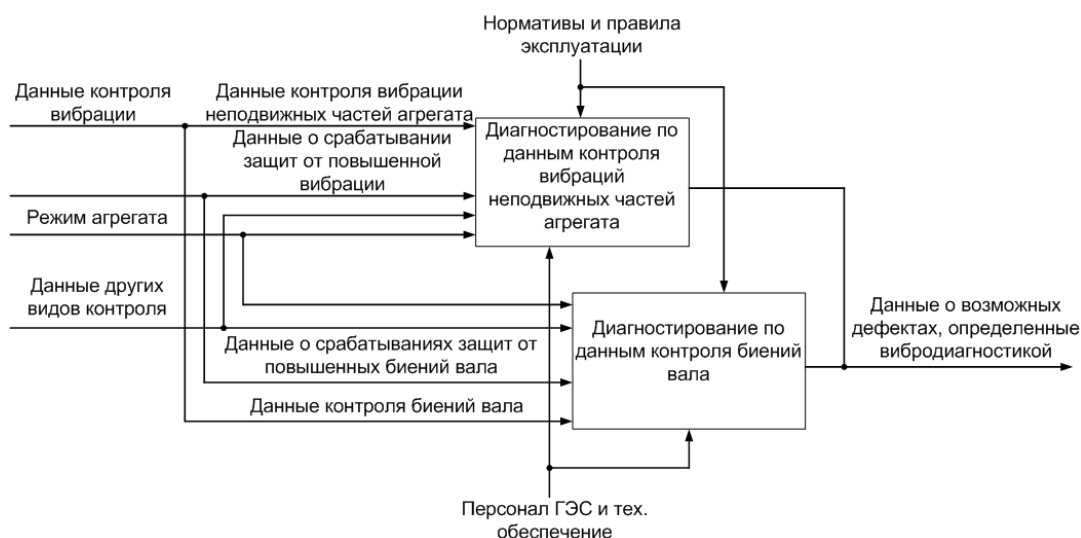


Рис. 2. Диагностирование по данным контроля вибраций

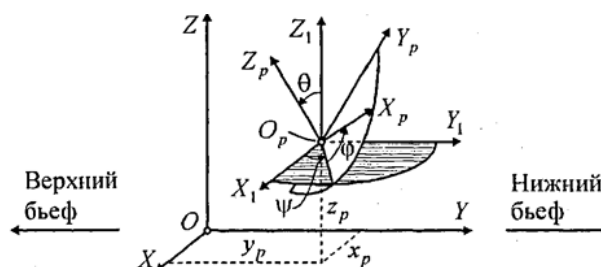


Рис. 3. Системы координат для описания положения ротора

Уравнения вращения твердого тела вокруг центра масс удобно записывать в системе координат, жестко связанной с ротором $O_p X_p Y_p Z_p$. Для преобразований координат из системы $OXYZ$ в $O_p X_p Y_p Z_p$ и обратно введем дополнительную систему координат $O_p X_l Y_l Z_l$, оси которой параллельны соответствующим осям системы $OXYZ$, а начало координат совпадает с центром масс ротора. Для координат произвольной точки (x, y, z) в системе $OXYZ$ и ее координат (x_l, y_l, z_l) в системе $O_p X_l Y_l Z_l$ справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} x = x_l + x_p \\ y = y_l + y_p, \\ z = z_l + z_p \end{cases} \quad (1)$$

где x_p, y_p, z_p – координаты центра масс ротора в системе $OXYZ$.

Для перехода из $O_p X_l Y_l Z_l$ в $O_p X_p Y_p Z_p$ справедливо выражение:

$$(x_2, y_2, z_2) = (x_1, y_1, z_1) * R_{\psi}^{-1} * R_{\theta}^{-1} * R_{\varphi}^{-1}, \quad (2)$$

где (x_2, y_2, z_2) – вектор координат в системе $O_p X_p Y_p Z_p$, $R_{\psi}^{-1} * R_{\theta}^{-1} * R_{\varphi}^{-1}$ – матрицы поворота:

$$R_{\varphi}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$R_{\theta}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix},$$

$$R_{\psi}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

В системе $OXYZ$ движение центра масс ротора можно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = \frac{F_x}{m} \\ \frac{dv_y}{dt} = \frac{F_y}{m}, \\ \frac{dv_z}{dt} = \frac{F_z}{m} \end{cases} \quad (3)$$

где v_x, v_y, v_z – проекции скорости центра масс ротора на оси OX, OY, OZ , м/с; t – время, с; F_x, F_y, F_z – проекции результирующей силы, действующей на ротор, на оси OX, OY, OZ , Н; m – масса ротора, кг.

Вращение ротора относительно центра масс можно описать с помощью динамических уравнений Эйлера [2]:

$$\begin{cases} I_{xp} * \frac{d\omega_{xp}}{dt} + (I_{zp} - I_{yp}) * \omega_{yp} * \omega_{zp} = M_{xp} \\ I_{yp} * \frac{d\omega_{yp}}{dt} + (I_{xp} - I_{zp}) * \omega_{zp} * \omega_{xp} = M_{yp}, \\ I_{zp} * \frac{d\omega_{zp}}{dt} + (I_{yp} - I_{xp}) * \omega_{xp} * \omega_{yp} = M_{zp} \end{cases} \quad (4)$$

где I_{xp}, I_{yp}, I_{zp} – моменты инерции ротора относительно осей $O_p X_p, O_p Y_p, O_p Z_p$, кг*м²; t – время, с; $\omega_{xp}, \omega_{yp}, \omega_{zp}$ – проекции угловой скорости ротора на оси $O_p X_p, O_p Y_p, O_p Z_p$, 1/с; M_{xp}, M_{yp}, M_{zp} – главные моменты внешних сил относительно осей $O_p X_p, O_p Y_p, O_p Z_p$, Н*м.

Для того чтобы совместно решить системы уравнений (3) и (4), необходимо привести их к единой системе координат, что возможно сделать благодаря кинематическим уравнениям Эйлера [2]:

$$\begin{cases} \omega_{xp} = \psi * \sin \theta * \sin \varphi + \theta * \cos \varphi \\ \omega_{yp} = \psi * \sin \theta * \cos \varphi - \theta * \sin \varphi \\ \omega_{zp} = \psi * \cos \theta + \varphi \end{cases} \quad (5)$$

Для численного решения уравнений движения ротора в системе координат $OXYZ$ необходимо:

1. Вычисление угловых скоростей по (5);
2. Вычисление сил, действующих на ротор;
3. Вычисление результирующей силы, действующей на центр масс в $OXYZ$. Преобразование координат точки приложения и вектора силы из системы $O_p X_p Y_p Z_p$ в $OXYZ$ производится по формулам (1) и (2);
4. Определение ускорений центра масс ротора по (3);
5. Вычисление результирующего момента сил относительно центра масс ротора в системе координат $O_p X_p Y_p Z_p$;
6. Вычисление угловых ускорений $\omega'_{xp}, \omega'_{yp}, \omega'_{zp}$ по выражению, получаемому из (4):

$$\begin{cases} \omega'_{xp} = \frac{M_{xp} - (I_{zp} - I_{yp}) * \omega_{yp} * \omega_{zp}}{I_{xp}} \\ \omega'_{yp} = \frac{M_{yp} - (I_{xp} - I_{zp}) * \omega_{zp} * \omega_{xp}}{I_{yp}} \\ \omega'_{zp} = \frac{M_{zp} - (I_{yp} - I_{xp}) * \omega_{xp} * \omega_{yp}}{I_{zp}} \end{cases}$$

Диагностика гидроагрегата по результатам измерения биений вала является задачей, обратной расчету биений при известном наборе дефектов. Если ввести функцию $F(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$, которая принимает конечные значения при любых значениях аргументов, то задача диагностики сводится к определению экстремума функции, а именно максимума этой функции для оптимизации [3]. Тогда любое решение этой функции состоит из следующих элементов:

- амплитуда синусоидальной выпуклости зеркального диска подпятника ($A_{вып}$) и угол

максимума выпуклости в горизонтальной плоскости относительно оси $O_p Y_p$ ($\alpha_{в\psi}$);

- уклон оси вала турбины относительно оси вала генератора (R) и угол плоскости уклона в горизонтальной плоскости относительно $O_p Y_p$ (α_R);

- смещение оси вала турбины относительно оси вала генератора в фланцевом соединении ($D_{фл}$) и угол между $O_p Y_p$ и направлением смещения ($\alpha_{фл}$);

- неуравновешенная масса на роторе генератора (M_1) и на рабочем колесе турбины (M_2) и угол в горизонтальной плоскости относительно оси $O_p Y_p$ (α_{M1}), (α_{M2});

- величина неподвижной относительно статора силы тяжести, действующей на ротор генератора (F_{C1}) и на рабочее колесо турбины (F_{C2}), и ее угол в горизонтальной плоскости относительно оси OX (α_{C1}), (α_{C2});

- величина неподвижной относительно ротора силы тяжести, действующей на ротор генератора (F_{P1}) и на рабочее колесо турбины (F_{P2}), и ее угол в горизонтальной плоскости относительно оси $O_p Y_p$ (α_{P1}), (α_{P2});

- величина смещения трех соседних сегментов подпятника ($D_{подп}$) и номер центрального смещенного сегмента ($N_{подп}$), для двухрядного подпятника рассматривается как смещение трех соответствующих сегментов в каждом ряду;

- величина смещения трех соседних сегментов верхнего генераторного подшипника ($D_{вгп}$) и номер центрального смещенного сегмента ($N_{вгп}$);

- величина смещения трех соседних сегментов нижнего генераторного подшипника ($D_{нгп}$) и номер центрального смещенного сегмента ($N_{нгп}$).

В итоге решение представляет собой вектор, состоящий из 24 параметров:

$$\begin{aligned} \xi &= (\xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3 \ \dots \ \xi_{24}), \\ \xi_1 &= A_{вмп}, \quad \xi_2 = \alpha_{вмп}, \quad \xi_3 = R, \quad \xi_4 = \alpha_R, \quad \xi_5 = D_{фл}, \\ \xi_6 &= \alpha_{фл}, \quad \xi_7 = M_1, \quad \xi_8 = \alpha_{M1}, \quad \xi_9 = M_2, \quad \xi_{10} = \alpha_{M2}, \\ \xi_{11} &= F_{C1}, \quad \xi_{12} = \alpha_{C1}, \quad \xi_{13} = F_{C2}, \quad \xi_{14} = \alpha_{C2}, \quad \xi_{15} = F_{P1}, \\ \xi_{16} &= \alpha_{P1}, \quad \xi_{17} = F_{P2}, \quad \xi_{18} = \alpha_{P2}, \quad \xi_{19} = D_{подп}, \quad \xi_{20} = N_{подп}, \\ \xi_{21} &= D_{вгп}, \quad \xi_{22} = N_{вгп}, \quad \xi_{23} = D_{нгп}, \quad \xi_{24} = N_{нгп}. \end{aligned}$$

Рис. 4. Вектор решения функции $F(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$

Таким образом, предложена методика моделирования движения ротора гидроагрегата, которая основана на рассмотрении ротора как незакрепленного твердого тела, а также произведено математическое описание задачи определения дефектов гидроагрегата как задачи оптимизации. На основании этого разработан метод расчета значений целевой функции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев, Б. А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов / Б. А. Алексеев. – М.: Издательство НЦ «ЭНАС», 1998. – 144 с.
2. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики: учебник. В 2-х т. / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – М.: Наука, 1985. – 735 с.
3. Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов / Под ред. В. А. Веникова: учеб. пособие для электроэнерг. вузов. – М.: Высшая школа, 1973. – 320 с.

УДК 681.518.5

*Д. Г. Сницарук, П. М. Бобров***ЦИФРОВАЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИАМЕТРОВ ОБЕЧАЕК****Волгоградский государственный технический университет**

email: norzes@mail.ru

В данной статье рассмотрена цифровая оптико-электронная система для контроля диаметров обечаек, позволяющая производить мониторинг и управление техническим процессом формообразования крупногабаритных обечаек. Разработанная система включает в себя цифровую камеру, задающее устройство с цифровым управлением и управляющую электронно-вычислительную машину. Для данной системы было разработано специализированное прикладное программное обеспечение, позволяющее полностью автоматизировать процесс измерения и вносить поправки на основе температуры и температурного коэффициента расширения стали. В данной статье описаны основные узлы системы.

Ключевые слова: обечайка, труба, контроль диаметра, оптико-электронная система, оболочка вращения, анализ растровых изображений.

*D. G. Snitsaruk, P. M. Bobrov***DIGITAL OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEM FOR CONTROL
OF DIAMETERS OF SHELLS****Volgograd State Technical University**

This article devoted a digital optical-electronic system for controlling the diameters of shells, which allows monitoring and control of the technical process of forming large-sized shells. The developed system includes a digital camera, a driver with digital control and a control computer. A specialized application software has been developed for this system, which allows to fully automate the measurement process and make measured based on the temperature and temperature coefficient of deformation of steel.

Keywords: shell, pipe, speed control, optoelectronic system, shell rotation, raster image analysis.

Введение

В различных отраслях промышленности, выпускающих крупногабаритные изделия – нефтегазовое и энергетическое оборудование, аэрокосмическую технику, подводные лодки, строительные конструкции основной базовой деталью является обечайка [1]. Наиболее актуальной проблемой в этих отраслях промышленности является качество выпускаемой продукции, которая в большой степени зависит от технологической точности изготовления обечаек. Необходимо отметить, что отклонения обечаек от правильной цилиндрической формы оказывают отрицательное влияние на трудоемкость сборочных и монтажных операций [2].

Обечайка представляет собой цилиндрическую оболочку вращения, которая изготавливается методом гибки из листового материала на валковых листогибочных машинах.

Основной задачей при формообразовании на листогибочной машине, является повышение точности формы обечаек, а именно соответствие номинальному диаметру.

Для контроля диаметра в процессе формообразования детали используются оптические

устройства на базе теодолита [3]. При этом контроль размера обечаек осуществляется человеком и не учитывается линейное температурное расширение стали. Данные факторы приводят к большому проценту брака и последующими повторными технологическими операциями формообразования.

Для решения данной проблемы была разработана цифровая оптико-электронная система для контроля диаметров обечаек, позволяющая в автоматическом режиме производить контроль диаметров обечаек, учитывая температуру детали и коэффициент температурного расширения стали.

Разработанная система

Основной алгоритм работы системы заключается в предварительном выставлении измерительного преобразователя (камеры) на номинальный диаметр при помощи задающего устройства, после чего происходит процесс формообразования. Система контролирует два основных параметра – отклонение текущего диаметра детали от номинального и температуру. Исходя из температуры, коэффициента линейного расширения стали и текущего отклоне-

ния от номинального диаметра определяется диаметр детали после остывания. В тот момент, когда диаметр детали после остывания совпадет с номинальным с необходимой точностью – процесс формообразования останавливается. Предложенная система состоит из нескольких основных узлов.

Блок измерения, включающий в себя цифровую камеру и пирометра. Цифровая камера является основным измерительным преобразователем, именно с ее помощью производится контроль диаметра. Пирометр является вспомогательным измерительным прибором, с его помощью вводится поправка на температурное расширение стали.

Задающее устройство представляет собой поворотное устройство, на которое устанавливается камера и пирометр. Задающее устройство позволяет при помощи линейного перемещения по передаче винт-гайка установить камеру таким образом, чтобы центр ее изображения по вертикали совпадал с номинальным диаметром детали. Перемещение при этом осуществляется поворотом винта при помощи шагового двигателя.

Конструкция задающего устройства напрямую зависит от выбранной оптической схемы системы (рис. 1). Задача заключается в том, чтобы изменение y было аналитически связано с R и не зависело от других переменных параметров.

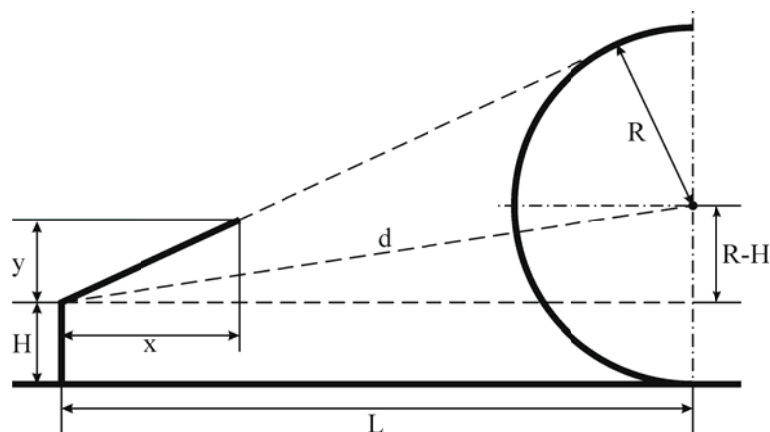


Рис. 1. Оптическая схема системы

Для данной оптической схемы искомое выражение примет вид (1).

$$y = x * \tan \left(a \sin \left(\frac{R}{d} \right) + a \sin \left(\frac{R-H}{d} \right) \right), \quad (1)$$

где $d = \sqrt{H^2 - R^2 + L^2}$, мм.

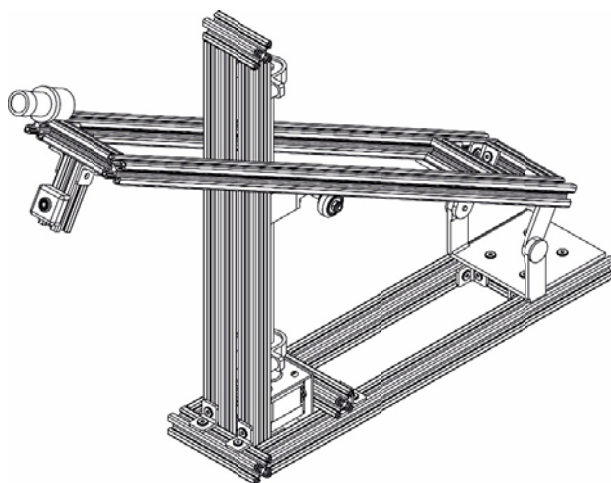


Рис. 2. Задающее устройство

Для данной оптической схемы был проведен метрологический анализ [4], показавший возможность ее использования в данной системе. Исходя из оптической схемы была предложена следующая реализация задающего устройства (рис. 2).

Управляющая подсистема, включающая в себя микроконтроллер и управляющую ЭВМ (УЭВМ). Микроконтроллер необходим для управления шаговыми двигателями при помощи драйверов, а также для снятия показаний с цифрового пирометра. УЭВМ же осуществляет управлением всем измерительным процессом, обмениваясь данными с микроконтроллером, а также анализом изображения, поступающего с цифровой камеры. Для выполнения данной задачи было разработано прикладное программное обеспечение. Рассмотрим более подробно процесс анализа изображения.

Анализ изображения заключается в определении значения текущей вертикальной координаты края обечайки и соответствующей ей зна-

чения вертикальной координаты края обечайки после остывания (температурной поправки).

Для поиска текущей вертикальной координаты края обечайки оптимальным вариантом является преобразование Хафа для линий [5]. Оно позволяет быстро определить координаты точек начала и конца линий, при этом нас интересуют вертикальные координаты, и мы высчитываем среднее арифметическое между ними. Реализация алгоритма преобразования Хафа уже существует в библиотеке *OpenCV*.

Для определения значения температурной поправки необходимо знать масштаб (количество пикселей изображения в одном миллиметре объекта), температуру детали и марку стали. Температурная поправка определяется выражением (2).

$$\Delta D_{\Theta} = D \cdot \alpha \cdot \Delta \Theta \quad (2)$$

где ΔD_{Θ} – отклонение метки, мм; D – номинальный диаметр детали, мм; α – коэффициент линейного температурного расширения, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; $\Delta \Theta$ – разность температур между текущей температурой, регистрируемой пирометром и температурой после остывания, $^{\circ}\text{C}$.

Масштаб определяется выражением (3). В [6] авторами был проведен метрологический

анализ погрешностей при измерениях с помощью цифровых камер, показавший соответствие отраслевому стандарту.

$$K = \frac{d \cdot \sqrt{H^2 + L^2}}{N \cdot f} \quad (3)$$

где K – масштаб (число пикселей в 1 мм изображения); d – горизонтальный размер матрицы камеры, мм; H – расстояние от оси вращения камеры до основания, мм; L – расстояние от оси вращения камеры до объекта измерения, мм; N – число пикселей изображения по горизонтали; f – фокусное расстояние объектива камеры.

Коэффициент линейного температурного расширения находится в справочниках по сталям, промежуточные значения можно найти при помощи линейной аппроксимации.

Для реализации указанного выше функционала было разработано прикладное программное обеспечение с графическим интерфейсом на языке Python 3, использующее библиотеку *OpenCV* для работы с изображениями (рис. 3).

Связь между УЭВМ и микроконтроллером осуществляется через UART, камера подключается напрямую к УЭВМ и видеопоток регистрируется средствами *OpenCV*.

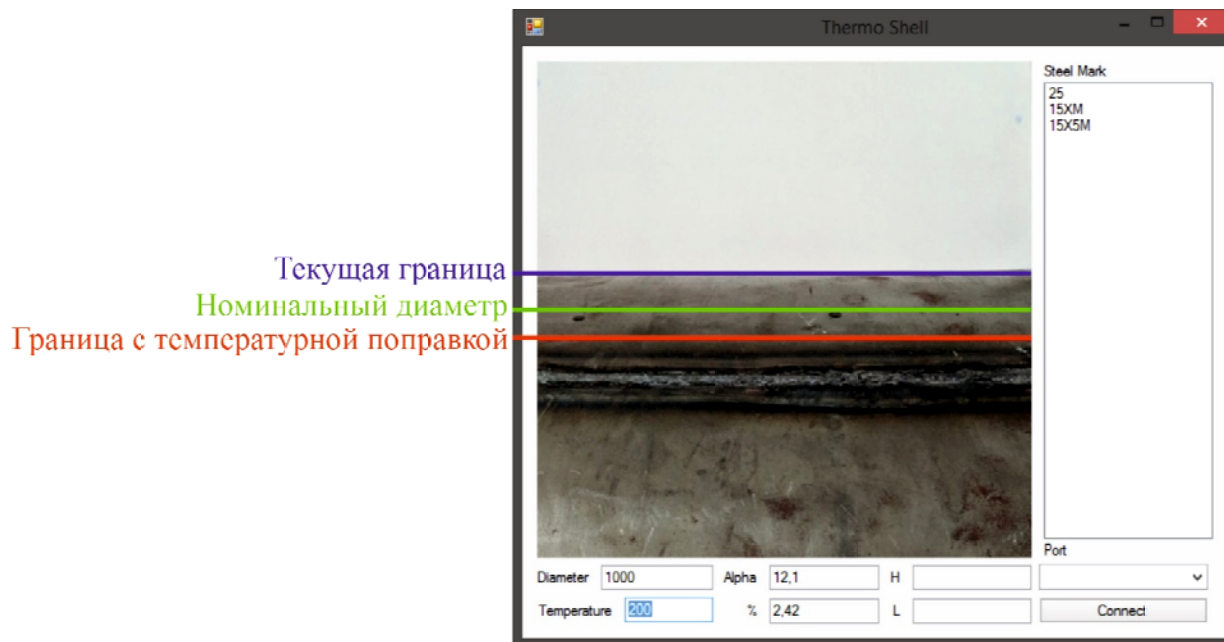


Рис. 3. Снимок экрана прикладного приложения

Заключение

Внедрение разработанной системы позволит автоматизировать процесс формообразования крупногабаритных обечаек и увеличить точность их изготовления, что позволит зна-

чительно снизить процент брака и повторного формообразования. Метрологический анализ системы показал соответствие ее точности отраслевому стандарту [7]. Реализованное программное обеспечение позволит оператору сле-

дить за процессом формообразования в режиме реального времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берлинер, Ю. И. Технология химического и нефтяного аппаратостроения / Ю. И. Берлинер, Ю. А. Балашов. – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.
2. Шилин, А. Н. Metrological Analysis of an Optoelectronic Monitoring System for Profilograms of Shells of Rotation / А. Н. Шилин, Д. Г. Сницарук // Measurement Techniques. – 2018. – Vol. 61, Issue 9, December. – С. Р. 897–902.
3. Шилин, А. Н. Оптико-электронный прибор контроля оболочек вращения с улучшенными метрологическими характеристиками / А. Н. Шилин, Д. Г. Сницарук // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2017. – № 9. – С. 14–19.
4. Шилин, А. Н. Метрологический анализ устройства позиционирования оптико-электронного прибора контроля крупногабаритных оболочек вращения / А. Н. Шилин, Д. Г. Сницарук // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2017. – № 5. – С. 39–45.
5. Дегтярева, А. Преобразование Хафа (Hough transform) / А. Дегтярева, В. Вежнев // компьютерная графика и мультимедиа. – 2003. – Выпуск. – 2003. – № 1. – С. 2.
6. Шилин, А. Н. Система технического зрения робота для контроля геометрических параметров обечаек / А. Н. Шилин, Д. Г. Сницарук // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2019. – № 8. – С. 36–43 + 1-я стр. обложки.
7. ГОСТ Р 52630–2006. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2007. – 110 с.

УДК620.1.051

А. Н. Шилин, Д. Г. Сницарук, П. Г. Беленков

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ГОРЮЧЕСТЬ

Волгоградский государственный технический университет

email: norzes@mail.ru

В данной статье представлен разработанный лабораторный стенд для испытания полимерных материалов на горючесть. Авторами был произведен анализ существующих средств для испытания материалов на горючесть, показавший отсутствие современных приборов для выполнения данной задачи. Большинство из аналогов подразумевают процесс испытания в мануальном режиме, из-за чего возникают погрешности, связанные с человеческим фактором, другие же аналоги позволяют производить испытания лишь небольших фрагментов материалов, испытание же устройства в целом, например, выключателя – не представляется возможным. Разработанная установка лишена этих недостатков. Использование современных датчиков, видеокамеры и автоматического нагревательного устройства, поддерживающего нужную температуру, позволило автоматизировать процесс испытания.

Ключевые слова: полимерные материалы, горючесть, воспламеняемость, пожарная безопасность.

A. N. Shilin, D. G. Snitsaruk, P. G. Belenkov

LABORATORY TEST BENCH FOR FLAMMABILITY TEST

Volgograd State Technical University

Article presents a developed laboratory test bench for testing polymer materials for flammability. The authors made an analysis of existing means for testing materials for combustibility, which showed the absence of modern devices to perform this task. Most of the analogs imply a manual test process, which results in errors associated with the human factor, while other analogs allow testing only small fragments of materials, but testing the device as a whole, for example, a circuit breaker, is not possible. The developed installation is devoid of these drawbacks due to the use of modern sensors, a video camera and an automatic heating device that maintains the desired temperature, which allowed us to automate the test process.

Keywords: polymeric materials, flammability, fire safety, installation for testing materials.

Введение

В настоящее время в России одной из основных и актуальных проблем является пожарная безопасность. Пожары являются причиной гибели людей и приносят большой материальный ущерб. Противопожарная безопасность в большой степени связана с материалами, используемыми при строительстве, капитальных

ремонтах, энергоснабжении промышленных, гражданских и коммерческих зданий [1].

Постановлениями Минстроя РФ введены в действие ГОСТы для испытаний на воспламеняемость, горючесть, распространение пламени, измерение плотности дыма при горении [2]. При испытаниях материалов с помощью установок определяются количественные пока-

затели воспламеняемости, горючести, распространения пламени и измерение плотности дыма. Необходимо отметить, что в настоящее время ГОСТы для испытаний и соответствующие им установки являются устаревшими, которые не удовлетворяют современным требованиям [3, 4]. Поэтому разработка новых ГОСТов и внедрение современных установок является актуальной проблемой. Это обусловлено тем, что сейчас в строительстве и во всех отраслях промышленности, в том числе и кабельной, широко применяются новые синтетические полимерные материалы.

К кабелям, эксплуатирующимся в пожароопасных местах (шахты, электростанции, нефтехимические, общественные здания и т. д.) предъявляются повышенные требования к пожарной безопасности. Из статистики следует, что одной из основных причин пожаров является возгорание кабельных изделий.

Очевидно, что одним из резервов повышения пожарной безопасности является разработка и внедрение установок для испытания материалов на горючесть. В статье предложена разработка установки для контроля горючести полимерных материалов при локальном воздействии нагревательным элементом.

Конструкции существующих установок разработаны на основе устаревшей элементной базы и соответственно не позволяют определять измеряемые величины с необходимой точностью и оперативностью. Поэтому для повышения точности и оперативности контроля горючести материалов необходимо использовать в устройстве современные датчики и исполнительные механизмы.

Отличие состоит в том, что при тесте на измерение высоты пламени и глубины вхождения нагревателя в материал проводит человек с использованием линейных шкал.

Наиболее точные значения будут получены, если автоматизировать все эти процессы, тем

самым повысив точность проводимых тестов, что приведет к снижению уровня возникновения воспламенений в связи с аварийными ситуациями. Для этого измерение высоты, а также примерного объема возникающего пламени проводится оптическими методами, а именно обработкой изображений пламени полученных с помощью цифровой камеры. Глубина вхождения в материал нагретой проволоки производится с помощью датчиков линейного перемещения, к примеру, лазерными дальномерами или энкодерными датчиками.

Разработанное устройство

Структурно-функциональная схема устройства изображена на рис. 1. Образец закрепляется на тележке и движется в сторону проволоки. Достаточное усилие прижима в 1 Н обеспечивается при помощи груза, который крепится тросом к тележке

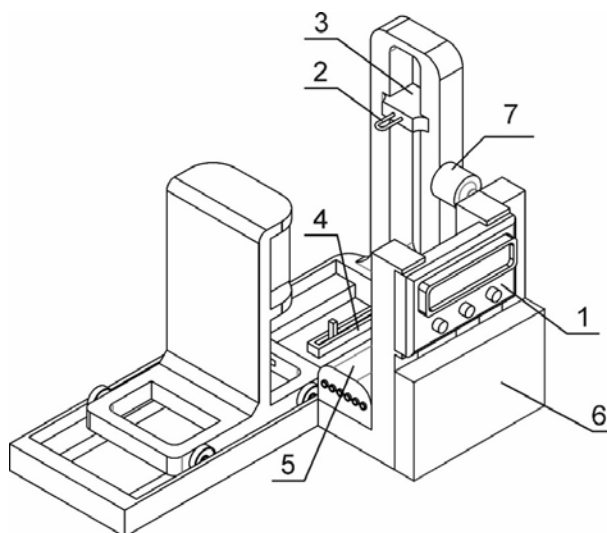


Рис. 1. Структурно-функциональная схема устройства: 1 – управляющее устройство; 2 – нагреватель; 3 – датчик температуры; 4 – датчик перемещения тележки; 5 – блок питания; 6 – электронно-вычислительная машина (ЭВМ); 7 – цифровая камера

На рис. 2 изображена структурная схема устройства.

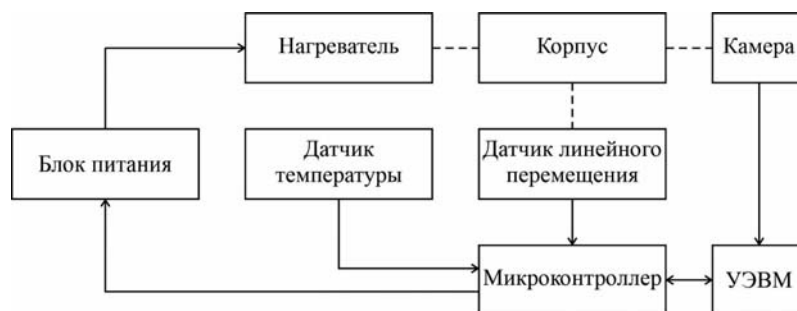


Рис. 2. Структурная схема устройства

В задачи управляющего устройства входит считывание данных с датчика линейного перемещения тележки, отправка данных на ЭВМ, поддержка заданной температуры проволоки. Микроконтроллер соединен с ЭВМ при помощи интерфейса UART.

Датчик температуры состоит из термопары К-типа и преобразователя сигнала термопар МАХ31855К. Горячий спай термопары подключается к проволоке, в то время как холодный спай соединяется с МАХ31855К. В отличие от метода, когда холодный спай опускается в талую воду, метод с преобразователем гораздо точнее определяет температуру, а также имеет гораздо меньшие габариты. МАХ31855 преобразует ЭДС термопары и компенсирует холодный спай за счет встроенного датчика температуры. Абсолютная погрешность составляет $\pm 4^\circ\text{C}$ в диапазоне температур от $+700^\circ\text{C}$

до $+1350^\circ\text{C}$. Соединяется данный преобразователь с микроконтроллером при помощи интерфейса SPI.

Глубина вхождения проволоки в образец определяется при помощи датчика перемещения тележки. Он состоит из переменного резистора линейного перемещения. Для считывания сигнала от переменного резистора используется АЦП микроконтроллера.

Цифровая камера напрямую соединена с компьютером, где программа осуществляет захват изображения. После регистрации изображения происходит его обработка, заключающаяся в выделении контура пламени из общего фона, для чего изображение бинаризируется с помощью алгоритма Брэдли с последующей медианной фильтрацией, после чего восстанавливается контур пламени и заливается контрастным цветом.

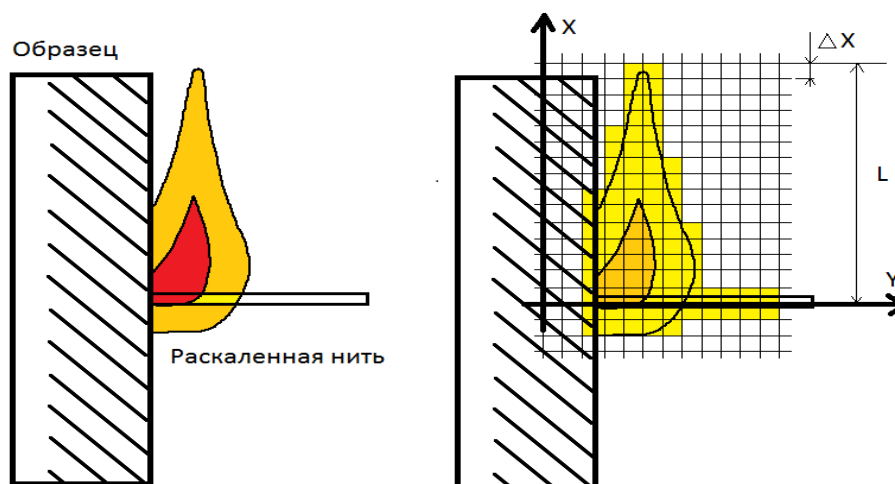


Рис. 3. Бинаризация изображения: Δx и Δy элементы, которые принадлежат площади фигуры, ограниченной контуром детали, S – площадь фигуры, ограниченной контуром детали

После выделения пламени одним цветом происходит подсчет пикселей, которое занимает пламя на изображении. Для того чтобы узнать реальную площадь, необходимо рассчитать пропорцию между длиной и шириной пикселя на изображении и длиной и шириной реального участка поверхности (масштаб). Для этого рассмотрим оптическую схему при регистрации изображения камерой (рис. 4).

Масштаб K определяется из выражения (1).

$$K = \frac{L \cdot d}{f},$$

где L – расстояние до объекта, мм; d – горизонтальный размер матрицы камеры, мм; f – фокусное расстояние объектива камеры, мм.

Для управления процессом измерения было разработано и реализовано программное обеспечение, а именно – прошивка микроконтроллера для управления процессом нагрева и регистрации показаний с датчиков и прикладное приложение на языке Python, управляющее процессом в целом и анализирующее изображение с камеры. Снимок экрана данного приложения изображен на рис. 5.

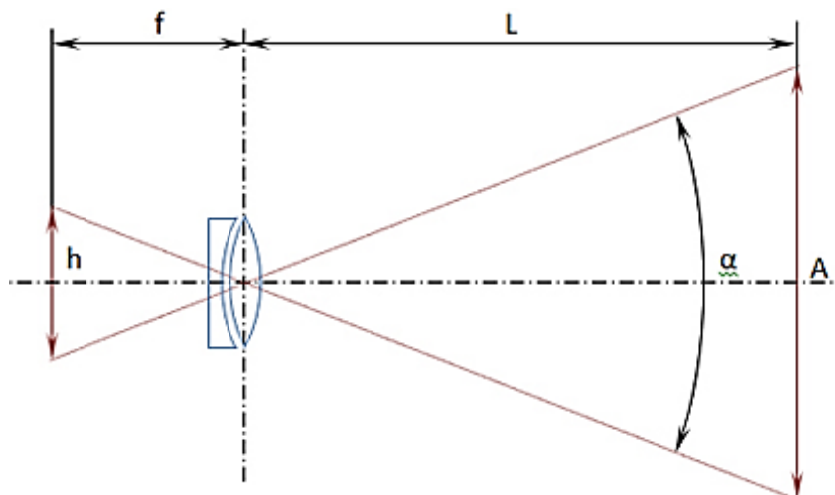


Рис. 4. Оптическая схема

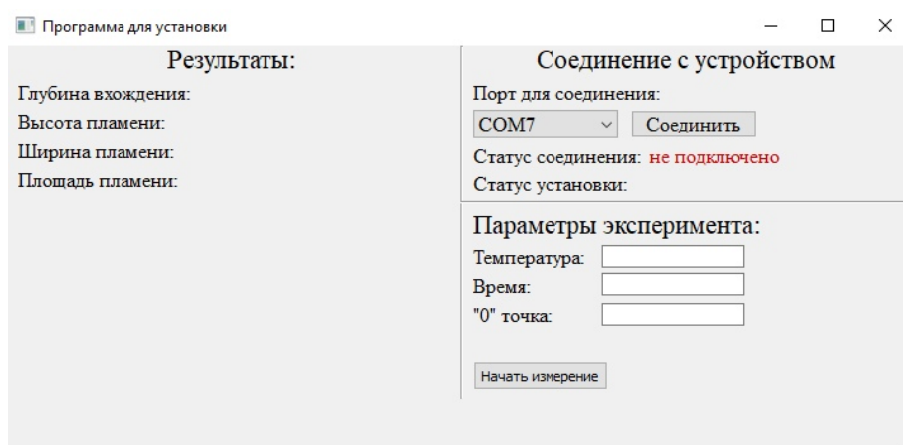


Рис. 5. Экранная форма приложения

Выводы

Внедрение прибора в промышленность позволит повысить качество полимерных материалов за счет контроля их горючести, что позволит использовать менее пожароопасные материалы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брушлинский, Н. Н. Мировая пожарная статистика в конце XX века / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов, П. Вагнер. – Москва : Академия ГПС МВД России, 2000. – 80 с.
2. Ваня, Я. Анализаторы газов и жидкостей : пер. с чеш. / Я. Ваня; под ред. О. С. Арутюнова. – Москва: Энергия, 1970. – 552 с.
3. Измерение плотности дыма при горении кабелей в заданных условиях. Ч. 1. Испытательное оборудование : ГОСТ ИЕС 61034-1-2011 ; введ. 01.01.2013. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 17 с. – (Межгосударственный стандарт).
4. ГОСТ 27483-87 (мэк 695-2-1-80). Испытания на пожароопасность. Методы испытаний. Испытания нагретой проволокой; введ. 01.01.89. – Москва : Издательство стандартов, 1988. – 10 с.

УДК 629.113

*А. Н. Шилин, Г. В. Бойко, Н. С. Кузнецова***СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК АВТОМОБИЛЯ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: eltech@vstu.ru

Актуальной проблемой на сегодняшний день является разработка средств бортового диагностирования технического состояния тормозных систем автомобилей, позволяющих перейти к техническому обслуживанию по фактической необходимости и за счет этого исключить, с одной стороны, возможность эксплуатации неисправного автомобиля, а с другой – необоснованные простои, материальные и трудовые затраты, например, при преждевременной замене тормозных накладок. В статье проведен анализ существующих методов износа фрикционных накладок. У косвенных методов измерения существует недостаток, а именно, наличие методической погрешности, которая обусловлена тем, что в этом методе используется математическая модель функциональной связи измеряемых величин с конечным результатом – величиной износа.

Ключевые слова: тормозной диск, интенсивность износа, фрикционные накладки.

*A. N. Shilin, G. V. Boyko, N. S. Kuznetsova***COMPARATIVE ANALYSIS OF MEANS OF DIAGNOSIS
OF TECHNICAL CONDITION OF CAR BRAKE PADS****Volgograd State Technical University**

An urgent problem today is the development of on-board diagnostics of the technical condition of automobile brake systems, which allow to switch to maintenance on actual need and thereby eliminate, on the one hand, the possibility of operating a faulty car, and on the other, unreasonable downtime, material and labor costs, for example, with premature replacement of brake pads. The article analyzes the existing methods of wear of friction linings. Indirect methods of measurement have a drawback, namely, the presence of a methodological error, which is due to the fact that this method uses a mathematical model of the functional relationship of the measured values with the final result – the amount of wear.

Keywords: brake disc, wear rate, friction adjustments

В настоящее время одной из основных задач, стоящих перед автомобилестроителями, является повышение технического уровня, надежности и конкурентоспособности выпускаемой техники.

Совершенствование конструкции автомобиля и его скоростных характеристик выдвигает все более сложные задачи по обеспечению его эксплуатационной безопасности, которая во многом зависит от надежности и эффективности тормозной системы. Решение этих задач невозможно без современных методов расчета машин и механизмов, среди которых особый интерес, в виду его важности и сложности, представляет функциональный расчет фрикционной пары «тормозной диск (барабан) – колодка».

Как известно, существуют прямые и косвенные методы определения износа пары «тормозной диск (барабан) – колодка». К прямым методам определения износа относят непосредственное взвешивание и измерение размеров деталей до и после эксплуатации. При этом используется поверенное контрольно-измеритель-

ное оборудование с требуемой точностью измерения, сложное и дорогостоящее оборудование для имитации тормозных режимов. Кроме того, данный метод довольно трудоемок, так как требует разборку колесных тормозных механизмов.

Основные методы идентификации процессов трения для прогнозирования критического состояния фрикционного контакта «тормозной диск (барабан) – колодка» отражены в трудах Ю. Д. Карпиевича, В. П. Волкова, А. М. Симоняна, А. А. Ревина и др. В этих работах в результате качественного и количественного анализа изношенных поверхностей деталей определяются причины низкой сопротивляемости изнашиванию и намечаются пути повышения износостойкости.

На сегодняшний день актуальность исследовательских работ в этом направлении обусловлено совершенствованием конструкции тормозных механизмов и существенным ростом количества автомобилей, штатно оборудованных антиблокировочной системой *ABS*.

Известные методы оценки износа тормозных накладок свидетельствует об отсутствии на сегодняшний день единого подхода к описанию и оценке процесса износа пары «тормозной диск (барабан) – колодка» с учетом особенностей работы современных антиблокировочных систем.

Разработка достоверных методов оценки износа тормозных накладок позволит внедрить бортовые системы контроля технического состояния тормозной системы, имеющие широкие возможности для определения остаточного ресурса, корректировки пробегов до технических воздействий, используя фактическое состояние изношенности фрикционной пары тормозной системы.

У косвенных методов измерения существует недостаток, а именно, наличие методической погрешности, которая обусловлена тем, что в этом методе используется математическая модель

функциональной связи измеряемых величин с конечным результатом – величиной износа.

Математические модели разрабатываются при допущениях и упрощениях, кроме того, постоянные физические величины, используемые в вычислениях, непостоянны, имеют некоторый допуск или разброс. Кроме того, в устройствах, содержащих микроконтроллеры и микропроцессоры, возникает погрешность цифровой обработки сигналов, связанная с округлением и накоплением погрешности.

В связи с этим наиболее целесообразно разрабатывать и внедрять автоматизированные системы диагностики тормозных пар с сенсорами износа, которые позволят определять износ не косвенным, а прямым методом.

Из проведенного анализа датчиков известно устройство принцип действия, которого показан на рис. 1.

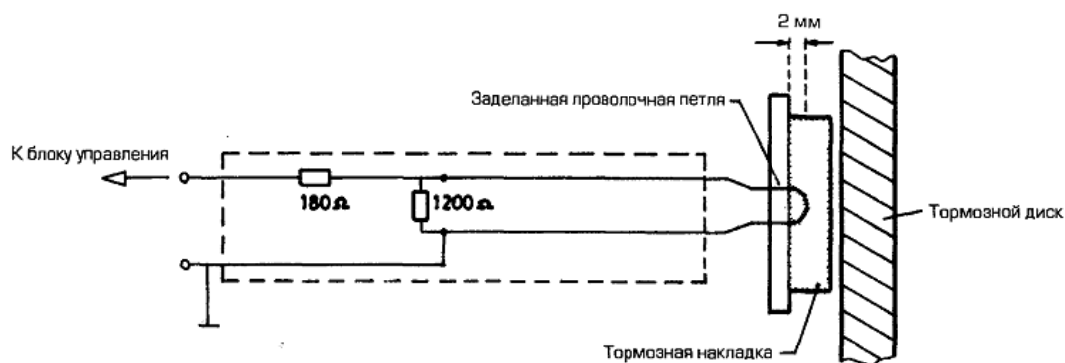


Рис. 1. Принцип действия датчика износа тормозной колодки

Когда проволочная петля внутри датчика не протерта тормозным диском, ток протекает по пути наименьшего сопротивления, поэтому на силу тока влияет резистор сопротивлением 180 Ом. При разрыве контакта датчика износа ток начинает протекать и через резистор номиналом 1200 Ом. Соответственно, блок управления регистрирует появление в цепи дополнительного сопротивления (180+1200 Ом) и зажигает индикатор износа тормозных колодок на приборной панели.

Однако, у данного датчика есть ряд недостатков, а именно, он измеряет конечный результат износа накладки и не позволяет определять динамику и неравномерность износа и, соответственно, выявить причины.

Разработаны устройства, где результаты представляются дискретно (рис. 2). В этих устройствах используются простейшие АЦП, что позволяет конкретизировать с высокой точностью процесс износа.

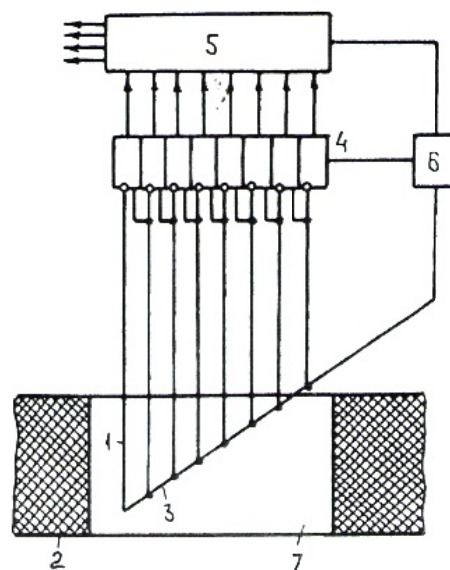


Рис. 2. Электрический дискретный датчик износа

Принцип действия устройства следующий. В процессе работы тормозных устройств по-

верхности фрикционной накладки 2 и основания 7 изнашиваются, перетираются элементы датчика с проводником 3. При некоторой величине износа на части элементов датчика отсутствует напряжение. По мере увеличения износа число таких элементов будет возрастать. Так как логический элемент блока 4 имеет один прямой вход, а другой инверсный, то напряжение, соответствующее логической единице, будет только на выходе одного элемента, соединенного с двумя соседними элементами датчика, один из которых разомкнут с источником питания 6. То есть блок 4 преобразует логическую комбинацию датчика в десятичный код, который подается на светодиодные индикаторы, позволяющие осуществлять контроль износа. С помощью преобразователя 5 десятичный код преобразуется в двоичный для непосредственного ввода в бортовой микропроцессор или ЭВМ.

Точность измерения определяется простой формулой

$$h = d/n,$$

где h – шаг дискретизации, мм; d – толщина фрикционной накладки, мм; n – число электропроводных элементов датчика.

Устройство может быть непосредственно соединено с ЭВМ, которая управляет циклом

испытаний и вычисляет параметры тормозных устройств.

Недостаток предложенного устройства – невысокая помехоустойчивость датчика при использовании его в сочетании с металлизированными фрикционными накладками. В этом случае металлические присадки могут послужить причиной ложного срабатывания схемы, замкнув перетертый в результате износа накладки электропроводный элемент.

Расширить функциональные возможности рассмотренной конструкции за счет измерения износа в металлизированных накладках позволяет оптоэлектронный аналоговый датчик, представленный на рис. 3.

Датчик 1 выполнен в виде световодов, которые расположены в пазах пластинки 2, закрепленной в толще фрикционной накладки 3. Светодиоды 5, 6 позволяют исключить влияние электропроводного слоя из частиц износа на работу устройства. Концы всех световодов датчика соединены вместе. Входные торцы световодов датчика и калибровочного световода 4 установлены напротив светодиодов 5 и 6, подключенных к генератору прямоугольных импульсов – мультивибратору 7. Входные торцы световодов 1 и 4 установлены напротив фотодиода 8, преобразующего изменения светового потока в изменение электрического тока.

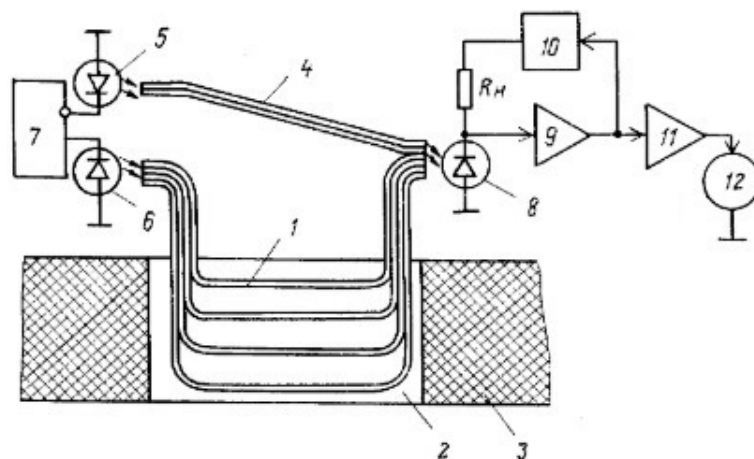


Рис. 3. Оптоэлектронный аналоговый датчик износа

Фотодиод 8 подключен к источнику питания через резистор R_n . Источником питания является блок 10 автоматической регулировки усиления, который за счет изменения напряжения питания фотодиода 8 поддерживает постоянной амплитуду импульса на выходе усилителя 9 фототока, соединенного с этим фотодиодом. Усилитель 9 соединен со входом инвертора 11, который представляет собой усилитель

(коэффициент усиления равен единице), выходной сигнал которого находится в противофазе входному. К выходу инвертора 11 подключен индикатор 12, регистрирующий величину износа.

В процессе работы тормозов поверхности тормозной накладки 3 и пластинки 2 изнашиваются и перетираются элементы датчика, что ведет к уменьшению поперечного сечения све-

товода и, следовательно, светового потока, поступающего от светодиода 6 к фотодиоду 8. Калибровка осуществляется следующим образом. К обоим выходам мультивибратора 7 подключены светодиоды 5 и 6. Поперечное сечение светодиода 4 выбрано таким образом, что проходящий через него световой поток будет всегда больше светового потока, проходящего через светодиода датчика.

Изменения фототока с помощью фотодиода 8 и усилителя 9 преобразуются в изменения напряжения. С помощью блока 10 автоматической регулировки усиления напряжение амплитуды импульса поддерживается постоянным $U_{ст}$ т. е. осуществляется калибровка усилителя и фотодиода, а амплитуда впадины импульса U_x определяется числом световодов датчика, т. е. величиной износа фрикционной накладки. Затем сигнал с усилителя 9 инвертируется инвертором 11, что позволяет измерять не впадину импульса, а амплитуду. К выходу инвертора подключен индикатор 12.

Выводы

Анализ рассмотренных средств оценки износа тормозных накладок свидетельствует об отсутствии на сегодняшний день единого подхода к описанию и оценке процесса износа пары «тормозной диск (барабан) – колодка» с учетом особенностей работы современных антиблокировочных систем.

Разработка достоверных методов оценки износа тормозных накладок позволит внедрить бортовые системы контроля технического состояния тормозной системы, имеющие широкие возможности для определения остаточного

ресурса, корректировки пробегов до технических воздействий, используя фактическое состояние изношенности фрикционной пары тормозной системы.

Наиболее полную информацию об износе тормозных накладок можно получить с помощью датчиков, работающих в реальном времени, тем самым получая высокую точность контроля износа тормозных пар. Совместно вместе с микроЭВМ можно контролировать, а также прогнозировать износ фрикционных накладок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chan, D., & Stachowiak, G.W. (2004). Review of automotive brake friction materials. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 218 (9), pp. 953–966.
2. Chandra Verma, P., Menapace, L., Bonfanti, A., Ciudin, R., Gialanella, S., & Straffellini, G. (2015). Braking pad-disc system: Wear mechanisms and formation of wear fragments. Wear, 322–323, pp. 251–258.
3. Елизаветин, М. А. Повышение надежности машины : учеб / М. А. Елизаветин. – Москва, 1977. – 432 с.
4. Eriksson, M., Lord, J., & Jacobson, S. (2001). Wear and contact conditions of brake pads: Dynamical in situ studies of pads on glass. Wear, 249 (3-4), pp. 272–278.
5. Gajek, A (2016). Diagnostics monitor of the braking efficiency in the on board diagnostics system for the motor vehicles. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 148 (1), 012038.
6. Карпиевич, Ю. Д. Микропроцессорные системы в бортовой диагностике износа накладок тормозов / Ю. Д. Карпиевич // Известия Белорусского национального технического университета, 1, 2006. – С. 45–48.
7. Карпиевич, Ю. Д. Метод определения численного значения работы трения как интегрального параметра при бортовой диагностике износа тормозных накладок / Ю. Д. Карпиевич // Известия Белорусского национального технического университета, 6, 2009. – С. 88–90.

УДК 681.128

С. В. Макартичян, Б. Б. Джелассем

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ В ЕМКОСТЯХ

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: hymir@mail.ru

Нефтяные продукты являются легковоспламеняющимися материалами. Поэтому проведение измерений уровня нефтяных продуктов в емкостях требует повышенной безопасности. На заводах и заправочных станциях резервуары используются для хранения топлива. Эти резервуары обычно выставлены на открытом воздухе или под землей. Непрерывный контроль уровня топлива в емкостях необходим с экономической точки зрения и с позиции безопасности для жизни человека. Существуют различные способы и методы измерения уровня жидкостей в баках, но не все из них могут использоваться в нефтяной промышленности. Надежность и особенно безопасность при использовании уровнемеров являются важнейшими факторами.

Ключевые слова: измерение уровня, уровнемеры, методы измерения уровня, нефтепродукты, точность уровнемеров.

S. V. Makartichyan, B. B. Djelassem

THE FUEL LEVEL MEASURING DEVICE FOR LIQUIDS IN TANKS

Volgograd State Technical University

Petroleum products are flammable materials. Therefore, the level measurement of oil products in tanks requires increased safety. At factories and gas stations, tanks are used to store fuel. These tanks are usually exposed outdoors or underground. Continuous fuel level monitoring in tanks is necessary from an economic point of view and from a position of human life safety. There are various ways and level measuring methods of liquids in tanks, but not all of them can be used in the oil industry. Reliability and especially safety when using level gauges are the most important factors.

Keywords: level measurement, level gauges, level measurement methods, oil products, level gauge accuracy.

Введение

Во многих отраслях современной промышленности экономичная и безопасная работа с высокой производительностью технологических процессов диктует необходимость использования современных методов и приборов измерения, которые следят за состоянием оборудования и ходом процессов. Одной из таких задач является контроль уровня и расхода жидкостей. В любой отрасли промышленности измерение и контроль уровня и расхода жидкости, являются наиважнейшей задачей. При недостаточном внимании к этой проблеме возможны огромные экономические и физические затраты.

В современной промышленности одной из основных задач является оптимизация и автоматизация технических процессов, сокращение расходов, чему способствует большая конкуренция на рынке. Применение современных приборов для измерения и контроля позволяет добиться выполнения работ меньшим числом рабочих и в более быстрые сроки.

В связи с этим на рынке присутствует большое количество различных моделей уровнемеров, как больших компаний, так и небольших фирм-производителей, решающих различные задачи кроме своей прямой функции. Возникает трудность при выборе варианта для оптимального выполнения контроля уровня жидкости и систем измерения, снижающих экономические затраты на производство. Особенно это важно в нефтеперерабатывающей промышленности, предъявляющей повышенные требования к надежности и безопасности процесса контроля уровня нефтепродуктов.

Теоретическая часть

Приборы, используемые для контроля и измерения уровня заполнения различных емкостей и сосудов, или уровнемеры, в зависимости от технических требований, предъявляемых к ним, делятся на две группы:

1) сигнализаторы уровня (используются в случаях, когда требуется получить информацию о достижении жидкостью определенного значения уровня);

2) измерители уровня (в этом случае необходимо производить непрерывные измерения уровня жидкости, а также в любой момент времени иметь представление о положении жидкости в резервуаре).

В настоящее время существует большое количество приборов и методов измерения уровня жидкостей. Однако многие из этих уровнемеров неудобны в использовании, слишком дороги или опасны, имеют низкие метрологические характеристики и надежность.

Рассмотрим основные методы измерения и контроля уровня жидкостей в резервуарах:

1) Визуальные уровнемеры являются самыми простыми измерителями уровня жидкости служат указательные стекла. Работа таких уровнемеров основана на принципе сообщающихся сосудов.

Указательное стекло соединяют с сосудом нижним концом (для открытых сосудов) или обоими концами (для сосудов с избыточным давлением или разрежением). Следя за положением уровня жидкости в стеклянной трубке, можно говорить об изменении уровня жидкости в сосуде.

2) Поплавковые уровнемеры. Чувствительным элементом в данном случае является поплавков, находящийся на поверхности жидкости. Поплавок уравнивается грузом, который связан с ним гибким тросом. Уровень жидкости определяется положением груза относительно шкалы. Однако более надежной признается конструкция с тонущим поплавком.

При изменении уровня жидкости по закону Архимеда изменяется действующая на конец рычага выталкивающая сила. Изменяющийся момент сил, действующих на рычаг, передается от буйка через вал, закрепленный в доннышке, на трубку и уравнивается моментом ее

скручивания. Изменение угла скручивания трубки пропорционально величине уровня.

3) Буйковые уровнемеры. В основу работы буйковых уровнемеров положено физическое явление, описываемое законом Архимеда.

Чувствительным элементом в этих уровнемерах является цилиндрический буюк, изготовленный из материала с плотностью, большей плотности жидкости.

Буюк находится в вертикальном положении и частично погружен в жидкость. Длина буйка H_6 подбирается приближенной к максимально-му измеряемому уровню в аппарате.

Когда уровень жидкости в сосуде равен или меньше начального h_0 , который называется зоной нечувствительности уровнемера, измерительная штанга, на которую подвешен буюк, находится в равновесии, так как момент M_1 создаваемый весом буйка G_1 , уравновешивается моментом M_2 , создаваемым противовесом.

Когда уровень жидкости становится больше h_0 (например, h), часть буйка длиной $h-h_0$ погружается в жидкость, вес буйка уменьшается, а, следовательно, уменьшается и момент M_1 , создаваемый буюком на штанге.

Так как M_2 становится больше M_1 , штанга поворачивается по часовой стрелке на небольшой угол и перемещает рычаг преобразователя, с которого снимается выходной сигнал.

Движение измерительной системы преобразователя происходит до тех пор, пока сумма моментов всех сил, действующих на рычаг, не станет равной нулю.

4) Гидростатические уровнемеры. В основе работы данного уровнемера, лежит определение гидростатического давления, которое оказывает жидкость на дно сосуда.

Величина гидростатического давления на дно сосуда зависит от высоты столба жидкости над измерительным прибором и от плотности жидкости.

Измерение гидростатического давления может осуществляться: датчиком избыточного давления (манометром), подключаемым на высоте, соответствующей нижнему предельному значению уровня; дифференциальным манометром, подключаемым к резервуару на высоте, соответствующей нижнему предельному значению уровня, и к газовому пространству над жидкостью.

5) Электрические уровнемеры. В электрических уровнемерах уровень жидкости преобразуется в какой-либо электрический сигнал.

Наиболее распространены в промышленности два типа электрических уровнемеров: емкостные и омические.

Работа емкостных уровнемеров основана на том, что диэлектрическая проницаемость различных жидкостей: нефтепродуктов, водных растворов солей, кислот и щелочей отличается от диэлектрической проницаемости воздуха либо водных паров.

В сосуд с жидкостью, уровень которой необходимо измерить, опущен преобразователь, представляющий собой электрический конденсатор, емкость которого зависит от уровня жидкости.

Омические уровнемеры, чаще всего применяются только для сигнализации и поддержания уровня жидкости в заданных пределах. Их работа основана на замыкании электрической цепи через контролируемую среду, представляющую собой участок электрической цепи с определенным омическим сопротивлением.

6) Радиоизотопные уровнемеры. В основе работы данных уровнемеров лежит сравнение интенсивностей потоков лучей, проходящих выше или ниже уровня граничного значения двух сред разной плотности.

Использование приборов с радиоизотопными излучателями целесообразно там, только там, где другие методы измерения невозможны. Для обеспечения радиационной защиты персонала при транспортировке, монтаже и ремонтных работах внутри объекта измерения источник излучения помещается в свинцовый контейнер.

7) Ультразвуковые уровнемеры. Данные уровнемеры позволяют измерять уровень в отсутствие соприкосновения с измеряемой средой и в труднодоступных местах.

В работе ультразвуковых уровнемеров применяется принцип отражения звуковых волн от границы раздела жидкость–газ.

Одной из важных особенностей данных уровнемеров является, отсутствие влияния среды на результат измерения. Поэтому широкое применение ультразвуковой уровнемер получил в условиях агрессивной среды, таких как абразивных, вязких и клейких веществ.

8) Радарные уровнемеры. Принцип работы данных устройств основан на том, что излученный СВЧ-сигнал отражается от контролируемого уровня и принимается обратно, где далее соответствующим образом обрабатывается.

Преимущества данных уровнемеров в том, что они обеспечивают минимальный контакт

измерительного устройства с контролируемой среды, а также практически полностью нечувствительны к изменению ее температуры и давления.

9) Волоконно-оптические уровнемеры.

Принцип действия волоконно-оптических датчиков основан на преобразовании измеряемой величин в световой сигнал [1–6]. Световой поток, передаваемый по оптическому волокну источником, может изменяться и отличаться по частоте, фазе, амплитуде импульсов и поляризации, также световой поток можно увеличивать или уменьшать. Волоконно-оптические датчики можно разделить на два основных вида: датчики, где оптическое волокно является передатчиком сигнала; датчики, где оптическое

волокно является чувствительным элементом – в таких датчиках оптическое волокно изменяет свои передающие характеристики. Параметр, который измеряется, воздействует на характеристики волокна, что в свою очередь влияет на характеристики передаваемого по нему светового луча [1–6].

В нефтяной отрасли волоконно-оптические датчики активно применяются и позволяют создавать волоконно-оптические системы мониторинга уровня независимо от температуры окружающей среды, радио- и электропомех [1–6].

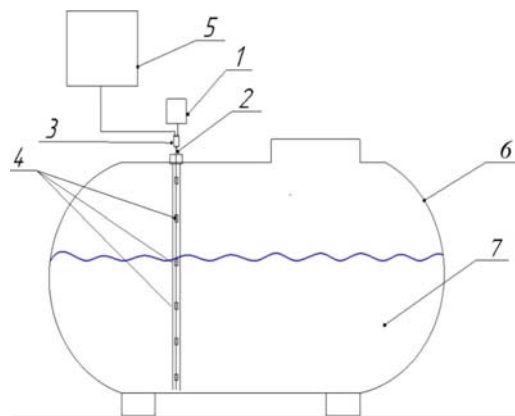
В таблице приведены основные метрологические параметры наиболее распространенных методов измерения уровня жидкости в резервуарах различной формы.

Основные метрологические параметры некоторых уровнемеров

Тип уровнемера	Метрологические параметры			
	Диапазон измерения, м	Температура среды, °С	Предельное давление рабочей среды, МПа	Погрешность измерения, %
Поплавковые	0–20	от – 40 до +120	2.5	± (2–4)
Гидростатические	0.05–63	от – 40 до +125	12	± (1–3)
Акустические	0.2–30	от – 50 до +170	4	± (1–2.5)
Емкостные	0–40	от – 60 до +250	10	± (0.5–5)
Оптические	0–100 и более	от – 40 до +100	7	± (0.2–2)

На основании проведенного анализа приборов и методов измерения уровня следует отметить оптический метод: волоконно-оптические приборы достаточно просты по своей конструкции, безопасны при использовании в нефтяной промышленности, не слишком дороги и позволяют достаточно надежно и точно измерять уровень топлива в резервуарах.

Предлагаемое волоконно-оптическое устройство измерения уровня (см. рисунок) состоит из источника света 1 для генерации света; оптического волокна 2, в которое входит свет, генерируемый источником света 1; светофильтра 3; датчиков интенсивности света с брэгговскими решетками 4 (брэгговские решетки располагаются в оптическом волокне для отражения части света, который генерирует источник света); блока обработки информации 5 для вычисления текущего уровня топлива на основании отношения интенсивности исходного светового потока с интенсивностями отраженных брэгговскими решетками световых потоков; индикатора для отображения информации об уровне топлива в резервуаре.



Структурная схема оптико-волоконного уровнемера

Устройство работает следующим образом. Источник света 1 генерирует свет в оптическом волокне 2. Световой поток поступает на датчики 4 через фильтр 3. Первая брэгговская решетка, которая располагается в первом датчике, отражает часть света, который генерирует источник 1 и если датчик находится на границе раздела сред воздух-топливо, где изменяется температура, то изменяется интенсивность отраженного светового потока. Отраженный све-

товой поток со всех датчиков поступает в блок обработки информации 5 через фильтр 3. В блоке обработки информации 5 для разделения отраженных световых потоков используется демультиплексор, а для преобразования каждого светового потока в электрический сигнал используются фотодиоды (схема усилителя сигнала требуется для каждого фотодиода). Эти электрические сигналы, которые содержат в себе информацию об уровне топлива 7 в резервуаре 6, поступают для обработки в микроконтроллер и текущий уровень топлива отображается на индикаторе.

Выводы

Предложенное волоконно-оптическое устройство для контроля уровня жидкости можно использовать в открытых или подземных резервуарах в нефтеперерабатывающей, нефтяной промышленности и на заправочных станциях. Принцип действия предложенного устройства основан на измерении интенсивности прошед-

шего через датчик оптического излучения при изменении температуры на границе раздела воздуха и топлива в резервуаре. Это устройство можно его использовать не только в нефтяной отрасли, но и во многих других отраслях для контроля уровня любой жидкости в резервуаре.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Окоси, Т.* Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси: Энергоатомиздат, 1990 г.
2. *Бобчук, Л. Г.* Прикладная оптика: учеб. пособие / Л. Г. Бобчук, Ю. В. Богачев, Н. П. Закаэнов. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
3. *Левшина, Е. С.* Электрические измерения физических величин / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
4. *Shiach, G., Nolan, A.* Advanced systems for in-well optical fibre sensing : J. of Physics. 2007. v. 76.
5. ГОСТ Р 8.673–2009 «Датчики и системы измерительные интеллектуальные».
6. *Буймистрюк, Г. Я.* Принципы построения интеллектуальных волоконно-оптических датчиков / Г. Я. Буймистрюк // Фотон-Экспресс. – 2011. – № 6.

УДК 537.633

В. Е. Аввакумов

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДАТЧИКА ХОЛЛА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: xcpvld@yandex.ru

Исследован способ повышения чувствительности датчика Холла при измерении магнитных полей с использованием импульсных токов возбуждения с увеличенной амплитудой без дополнительного усилителя.

Ключевые слова: измерение магнитных полей, датчик Холла, повышение чувствительности, импульсное возбуждение.

V. E. Avvakumov

INCREASING THE SENSITIVITY OF THE HALL SENSOR WHEN USING A PULSED EXCITATION CURRENT

Volgograd State Technical University

The method of increasing the sensitivity of the Hall sensor when measuring magnetic fields using pulsed excitation currents with increased amplitude without an additional amplifier is investigated.

Keywords: magnetic field measurement, Hall sensor, sensitivity increase, pulsed excitation.

Введение

Одной из востребованных измерительных задач является измерение характеристики магнитных полей. В некоторых случаях для этого используют датчики на эффекте Холла (ДХ). Данный тип датчика широко распространен, может использоваться для большого класса задач как в линейном, так и в цифровом режиме.

Теория его хорошо проработана и номенклатура изделий, выпускаемых производителями, достаточно широка. В статье рассматривается подход, который позволяет увеличить чувствительность датчика без использования дополнительных усилителей, и тем самым расширить область его применения для измерения магнитных полей.

Кратко рассмотрим принцип работы и подключения ДХ (рис. 1, а) [1, 2]. Будем рассматривать «чистый» датчик, без интегрированных

цепей усиления, компенсации и др. Возбуждение датчика осуществляют источником постоянного тока J .

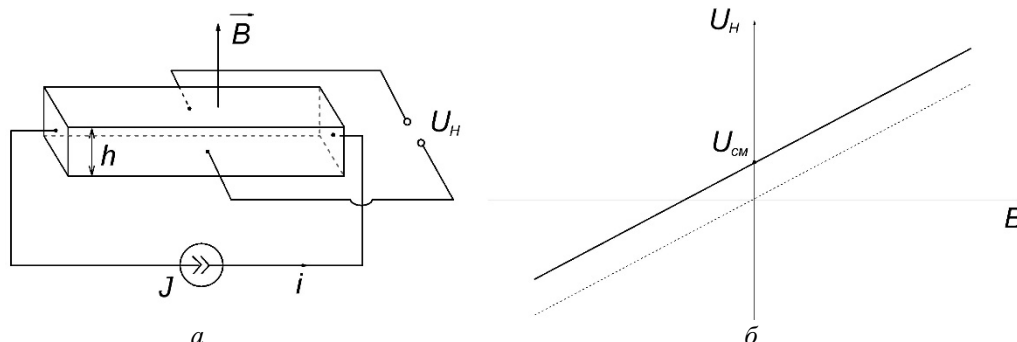


Рис. 1. Подключение датчика Холла (а) и его выходная характеристика (б)

Напряжение Холла определяется выражением:

$$U_H = R_H \frac{iB}{h},$$

где i – ток возбуждения; B – индукция поперечного магнитного поля; h – толщина кристалла-датчика; $R_H \sim 1/n$ – постоянная Холла; n – концентрация свободных носителей заряда. Постоянная Холла зависит от материала и температуры, так как концентрация свободных носителей заряда зависит от температуры.

При этом необходимо отметить что существует напряжение смещения, обусловленное невозможностью симметричного подключения съемных контактов к внутреннему кристаллу датчика. Это приводит к тому, что линейная зависимость выходного напряжения от индукции поперечного магнитного поля перестает проходить через ноль и смещается параллельно теоретической вверх или вниз (рис. 1, б).

Из выражения для напряжения Холла видно, что оно пропорционально величине индукции магнитного поля и току возбуждения, и обратно пропорционально концентрации носителей заряда в материале датчика. Так как основным материалом является полупроводники, то концентрация носителей заряда существенно изменяется с изменением температуры. При работе с ДХ мы можем оказывать влияние лишь на ток возбуждения и, опосредованно, на концентрацию носителей заряда (постоянную Холла), влияя на температуру датчика.

Из прямой пропорциональности следует, что увеличение тока возбуждения должно увеличить чувствительность датчика, а значит и выходное напряжение. Но при этом необходимо учитывать, что протекание электрического тока через кристалл датчика приводит к выделению джоулевой теплоты, пропорциональной квадрату силы тока. Это в свою очередь приводит к увеличению температуры датчика, а значит, к увеличению концентрации свободных носителей заряда и, соответственно, уменьшению чувствительности. Поэтому оптимальный ток возбуждения выбирается таким образом, чтобы не приводить к существенному нагреву датчика, но при этом быть максимально возможным. Также возможно использование дополнительного принудительного охлаждения, например, криогенного, но это не всегда целесообразно. У разных производителей для разных датчиков номинальный ток меняется от единиц миллиампер до пары десятков миллиампер. При этом сами производители не рекомендуют использовать максимальное значение тока без обеспечения стабильного температурного режима и установления термодинамического равновесия. В табл. 1 приведены характеристики нескольких датчиков для сравнения.

Значение номинальной чувствительности ДХ составляет от сотен до нескольких тысяч мВ/Тл. Поэтому в случае измерения слабых магнитных полей необходимо повышать чувствительность ДХ.

Таблица 1

Характеристики датчиков Холла

Наименование	Входное сопротивление, Ом (кОм)	Выходное сопротивление, Ом (кОм)	Номинальный (максимальный) ток, мА	Чувствительность при номинальном токе, мВ/Тл	Напряжение смещения, мВ	Материал
ДХ1	650±150	650±150	7	>300	≤25	GaAs
ДХ2	250±50	250±50	10	>150	≤20	GaAs
ДХ3	40±20	40±20	10	>100	≤10	InSb
ДХК-0.5А	(1,8–3,0)	(≤3)	3	>280	≤7	GaAs
THS118	450–900	580–1350	5 (≤15)	>550 (5мА)	≤5	GaAs
NW-105А	250–450	240–550	5 (≤20)	>1000 (5мА, 50 мТл)	≤18	InSb

Классическим подходом является использование операционного усилителя для усиления выходного сигнала ДХ. Современные датчики, выпускаемые многими производителями, уже имеют интегрированные усилители, а также дополнительные цепи, компенсирующие напряжение смещения, преобразователи выходного сигнала. При использовании такого подхода, для случая малых величин индукции магнитного поля, вырабатываемое напряжение существенно зашумляется различными видами шумов, что ухудшает точность и стабильность измерения [2].

Все же очень заманчивой остается идея об увеличении значения тока возбуждения и при этом кратного увеличения значения чувствительности датчика. Таким образом, требуется решить проблему увеличения тока не допуская, при этом, внутреннего нагрева кристалла датчика. Для снижения теплового нагрева можно использовать не постоянный ток, а импульсный. При этом длительность импульса тока должна быть много меньше периода следования импульсов. Так как количество выделяемой теплоты при ШИМ модуляция зависит от коэффициента заполнения, то чем он меньше, тем меньше тепловыделение. Например, при увеличении тока в 10 раз и кратном уменьшении коэффициента заполнения тепловыделение не изменится. Это даст возможность использовать более высокие амплитудные значения тока возбуждения без существенного нагрева элемента.

Для проверки данного подхода была реализована простая схема импульсного питания ДХ (рис. 2). В качестве подопытного образца выступал датчик THS118. Для определения значения чувствительности использовались амплитудные значения напряжения, снимаемые с ДХ и токоизмерительного резистора с помощью осциллографа.

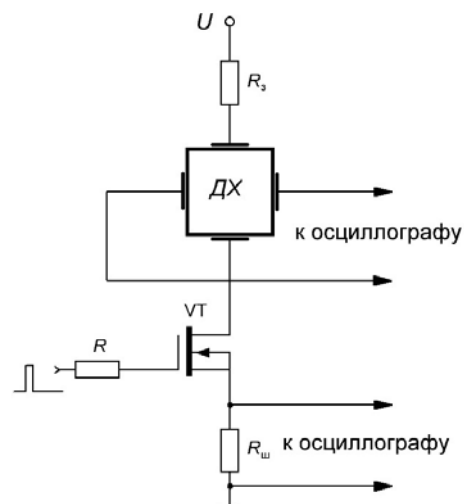


Рис. 2. Структурная схема тестирования ДХ с импульсным возбуждением

По очереди наблюдались напряжение U_H и напряжение, снимаемое с токоизмерительного резистора $R_{ш}$, последовательно включенного в цепь возбуждения датчика. Длительность импульса возбуждения составляла 10 мкс, а период следования импульсов 1 мс (коэффициент заполнения 0,01). Сопротивление R_3 выполняет защитную ограничительную роль в случае электрического пробоя датчика. Источником питающего напряжения являлся регулируемый блок питания с максимальным напряжением 30 В. Дополнительно результаты сравнивались с результатами стандартной схемы включения, при питании постоянным током 5 мА. Источником магнитного поля выступал постоянный неодимовый магнит с дистанционной проставкой. Величина индукции поперечного магнитного поля магнита определялась с использованием линейного датчика Холла SS49E и составляла 0,1 Тл. С помощью NTC термистора 100к Ом 3950 производилось наблюдение за тепловым режимом исследуемого ДХ, по изменению его сопротивления.

Эксперимент показал, что поведение датчика соответствует прогнозируемому: чувствительность возросла кратно току; фронты сигналов четкие проблем с динамическими характеристи-

ками нет; в установившемся температурном режиме существенного нагрева нет. Из недостатков, как и ожидалось, кратно возросло напряжение смещения. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение методов импульсного и постоянного возбуждения ДХ

Параметр	Возбуждение импульсным током	Возбуждение постоянным током
Доля времени активного состояния, %	1	100
Амплитудное значение тока, мА	30	5
Среднее значение тока, мА	0,3	5
Амплитудное значение напряжения смещения, мВ	19	3
Индукция магнитного поля, Тл	0,1	0,1
Амплитудное значение напряжения Холла, мВ	536	92
Чувствительность в активном состоянии мВ/Тл	5360	920

Выводы

Использование импульсного тока возбуждения для датчиков, основанных на эффекте Холла, может позволить увеличить их чувствительность без использования дополнительных усилителей. Комбинируя этот подход с последующим усилением получаем возможность поднять чувствительность датчиков и обеспечить лучшее соотношение сигнал-шум при измерении магнитных полей небольшой величины. Остается открытым вопрос электрической прочности и долговременной надежности дат-

чиков Холла при превышении рекомендуемых производителем значений токов, но это касается только уже произведенных элементов. Для вновь создаваемых, этот вопрос может быть решен технологически.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов / Д. В. Сивухин. В 5 т. Том III. Электричество. – 4-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2004. – 656 с.
2. Кобус, А. Датчики Холла и магниторезисторы / А. Кобус, Я. Тушинский; пер. с польского под ред. О. К. Хомерики. – М. «Энергия», 1971. – 352 с.

УДК 621.373.512

И. В. Самофалов, А. И. Нефедьев

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ВОДИТЕЛЯ АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: nefediev@rambler.ru

В статье приведен краткий анализ факторов, влияющих на состояние водителей транспортных средств. Рассмотрены современные устройства и технологии, применяемые для непрерывного мониторинга состояния водителя. Предложены принцип работы и устройство для контроля психоэмоционального состояния водителя транспортного средства.

Ключевые слова: водитель, ДТП, контроль состояния водителя, психоэмоциональное состояние, контроль усталости.

I. V. Samofalov, A. I. Nefed'ev

INTELLECTUAL SYSTEM OF PSYCHO-EMOTIONAL STATE CONTROL OF A VEHICLE DRIVER

Volgograd State Technical University

The article provides a brief analysis of factors affecting the state of drivers of vehicles. The modern devices and technologies used for continuous monitoring of the driver's condition are considered. The principle of operation and a device for monitoring the psycho-emotional state of a vehicle driver are proposed.

Keywords: driver, traffic accident, driver condition monitoring, psycho-emotional state, fatigue control.

На дорогах России в 2019 году произошло 164358 дорожно-транспортных происшествий (ДТП) [1]. Хотя снижение аварийности продолжается, но динамика ее снижения остается недостаточной для кардинального изменения количества аварий и их тяжести.

Из статистических данных известно, что около четверти всех аварий происходят по причине переутомления водителя во время длительной поездки.

Крупные автопроизводители активно работают над созданием различных систем контроля состояния водителя. Такие системы в основном предназначены для оповещения водителя о наступлении опасного состояния, но более современные системы могут вмешиваться в управление транспортным средством и предупредить ДТП.

Разработка таких систем ведется по нескольким направлениям, позволяющим определить болезненное состояние водителя (контроль усталости, оценка физического напряжения, замедленная реакция и др.).

Важным фактором, влияющим на безопасность движения, является усталость водителя, которые увеличивают риск попадания в ДТП в 4 раза. При движении в городе возможность заснуть за рулем очень мала, а на загородных дорогах она значительно возрастает. Такое состояние водителя зависит от времени суток, интенсивности дорожного потока и освещенности [2].

По статистике до 25 % водителей попадают в ДТП во время длительной поездки, и одной из распространенных причин аварий на дорогах является усталость. Чем дольше человек находится за рулем, тем сильнее у него ухудшается внимание. Согласно проведенным исследованиям, через 4 часа вождения реакция снижается два раза, а через восемь часов – в 6 раз [3].

Внимание водителя отвлекают и другие внутренние и внешние факторы. Среди внутренних факторов можно выделить плохое настроение, раздражительность, разговоры по мобильному телефону, даже при наличии устройства «hands free», разговоры с пассажирами, набор смс во время движения, попытки водителя взять какой-либо предмет (из «бардачка», с заднего сиденья или с пола и т. д.), прослушивание музыки во время движения, курение, прием пищи и распитие напитков во время управления автомобилем. Также снижает внимание прием различных лекарственных препара-

тов, вызывающих сонливость, замедление реакции или другие побочные явления, ведущие к значительному снижению внимания и готовности водителей к опасным ситуациям на дороге, летающие насекомые, попавшие в салон автомобиля, а также игрушки, привязанные к зеркалу заднего вида и раскачивающихся во время движения автомобиля.

Внешние факторы заключаются в характерных особенностях местности, которые может разглядывать водитель, рекламные щиты, установленные рядом с дорогой, информационные дорожные знаки, другие участники движения, особенно пешеходы, велосипедисты и мотоциклисты, часто создающие аварийные ситуации на дороге.

Учитывая эти данные, автопроизводители стремятся сделать передвижение на автомобиле более безопасным. Для этих целей разрабатываются различные системы контроля состояния водителя. В настоящее время такие системы предлагают многие автопроизводители.

Систему контроля усталости водителя впервые разработала фирма Nissan, которая и запатентовала эту революционную для того времени технологию в 1977 году [4]. Но эта система не пошла в серийное производство из-за сложностей технической реализации. Работа системы заключается в том, чтобы анализировать состояние водителя и качество вождения. Изначально определяются параметры в начале поездки, что позволяет оценить скорость реакции человека, а после этого система начинает отслеживать дальнейшую скорость принятия решений. Если система обнаруживает, что реакции водителя замедлились, то появляется звуковое уведомление с рекомендацией отдыха.

В настоящее время многие фирмы разрабатывают подобные системы, совершенствуют и улучшают способы распознавания усталости водителя. Рассмотрим некоторые из таких систем.

Фирма Mercedes-Benz производит систему контроля усталости «Attention Assist», которая следит за возможностью водителя физически управлять автомобилем, и при необходимости подает сигнал для остановки и отдыха [5]. При работе системы осуществляется комплексная проверка, содержащая три вида контроля поведенческих факторов: производится оценка поведения водителя, контролируется движение автомобиля, фиксируется направление взгляда водителя.

Такую систему контроля фирма Mercedes-Benz начала устанавливать с 2011 года. Система состоит из датчика руля, контрольной лампы и звукового предупреждения водителя и начинает работать при скорости более 80 км/час. Датчик руля определяет изменение усилия, оказываемого на руль при его вращении. Кроме этого, система учитывает сигналы от других контрольных датчиков автомобиля: тормозной системы, устойчивости при движении, параметров двигателя и ограничения видимости [5]. При работе системы определяются скорость и боковое ускорение автомобиля в течение 30 минут с начала движения (стиль вождения), длительность поездки и время суток, анализируется управление тормозной системой, органами управления, состояние дорожного покрытия и поведение автомобиля во время движения.

Фирма Volvo производит систему контроля усталости «Driver Alert Control (DAC)», которая фиксирует только характер движения автомобиля по дороге. Отклонение от заданных параметров движения рассматривается системой как наступление усталости у водителя. Система DAC работает совместно с системой предупреждения выезда из полосы «Lane Departure Warning (LDW)» и активируется на скорости от 60 км/ч. Система LDW изначально возникла в виде устройства, повышающего безопасность водителя. Данная технология активно развивается на протяжении последних лет, в настоящее время она внедрена в современные видеорегистраторы, и входит в систему управления беспилотных автомобилей.

Фирма Volkswagen разработала систему-ассистент «Emergency Assist», которая частично перехватывает управление автомобилем в экстренной медицинской ситуации. Ассистент «Emergency Assist» следит за работой рулем со стороны водителя. В экстренной ситуации, когда водитель оказывается не в состоянии управлять автомобилем, система принимает управление автомобилем на себя, выполняет натяжение ремня безопасности (проактивная система безопасности), предупреждает о потенциально опасной ситуации других участников дорожного движения, затормаживает автомобиль до полной остановки, и выполняет аварийный вызов. Действие ассистента Emergency Assist обеспечивается согласованной работой ассистента движения по полосе, электромеханического стояночного тормоза, автоматиче-

ской коробки передач, службы аварийного вызова и адаптивного круиз-контроля [6].

Фирма Ford разработала систему безопасности, включающую в себя систему предупреждения схода с полосы, систему контроля за усталостью водителя и систему распознавания дорожных знаков [7]. Усталость водителя контролируется с помощью системы предупреждения схода с полосы. Состояние водителя оценивается на основе анализа поведения автомобиля в полосе движения. Система активируется, начиная со скорости 65 км/ч. Система распознавания дорожных знаков предназначена для информирования водителя о дорожных знаках, что повышает безопасность движения.

Многие системы контроля усталости основаны на использовании видеокамер, которые запоминают параметры человека в начале движения, а затем выполняют мониторинг в течение поездки. С помощью камер, направленных на водителя, собирается вся необходимая информация. Также система автоматически информирует человека о необходимости отдыха, и подает экстренные сигналы для увеличения бдительности.

В качестве примера рассмотрим систему контроля «Driver Attention System (DAS)» фирмы Seeing Machines Technology, которая была разработана для автомобилей General Motors. Данная система контроля усталости определяет степень внимания водителя при помощи инфракрасной камеры на колонке рулевого колеса. Определение состояния внимания водителя достигается с помощью точного измерения ориентации головы и движений век в полном диапазоне дневных и ночных условий вождения, включая использование солнцезащитных очков [7]. Система производит контроль открытости глаз водителя и их сосредоточенности. При обнаружении признаков усталости и потери внимательности водителем, система дает команду о прекращении движения транспортного средства.

Основная сложность в технической реализации и обучении подобных систем заключается в распознавании реальной усталости и исключении ложных срабатываний. Существуют системы, основанные на контроле физического состояния водителя, когда считываются параметры тела, включая частоту морганий, частоту опускания век, уровень открытости глаз, положение головы, наклон тела и другие показатели. Конструктивные особенности таких систем зависят от способа реализации и контроля движения [8].

Для обеспечения безопасности движения была разработана интеллектуальная система контроля психоэмоционального состояния во-

дителя автотранспортного средства, структурная схема которой представлена на рисунке.



Структурная схема интеллектуальной системы контроля психоэмоционального состояния водителя

Разработанная система состоит из четырех датчиков, при помощи которых в блок управления поступает вся необходимая информация о психоэмоциональном состоянии водителя, и звуковом сигнализаторе, подключенном к выходу системы. Датчики пульса, проводимости и температуры смонтированы в рулевом колесе. Основой датчика положения головы является видеокамера, информация с которой обрабатывается блоком управления. При сильном наклоне головы в течение времени более трех секунд блок управления выдаст предупреждающий сигнал через звуковой сигнализатор. Если положение головы, и/или информация с остальных датчиков не соответствует разрешенному диапазону, то блок управления через электронную систему управления двигателем (ЭСУД) останавливает автомобиль. При этом задействуется тормозная система, и включается аварийная сигнализация. Такая система позволяет, например, выявить наступление сердечного приступа даже на ранних стадиях, и тем самым предупредить аварию.

Безопасность движения является основным вопросом, над которым работают производители автомобилей. Различные системы контроля позволяют снизить количество ДТП, усиливают бдительность водителя с помощью звуковых сигналов, выдают рекомендации для отдыха после определенного времени нахождения за рулем или при сильной усталости. Разработан-

ная система также позволит внести вклад в безопасность движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Госавтоинспекция опубликовала годовую статистику ДТП за 2019 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://1gai.ru/publ/524565-gosavtoinspekciya-opublikovala-godovuju-statistiku-dtp-za-2019-god.html>, свободный – (20.04.2020).
2. Не спи – убьешься [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.gazeta.ru/auto/2006/04/24_a_610366.shtml?print, свободный – (20.04.2020).
3. Время реакции водителя – что означает и от каких факторов зависит? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://autopravilo.ru/sovety/vremya-reakcii-voditelya-chto-oznachaet-i-ot-kakix-faktorov-zavisit.html>, свободный – (20.04.2020).
4. Система распознавания усталости водителя, как она работает [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://znanieavto.ru/komfort/datchik-ustalosti-voditelya.html>, свободный – (20.04.2020).
5. Система контроля усталости водителя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://povozcar.ru/attention-assist-dac.html>, свободный – (20.04.2020).
6. Traffic jam assist, lane assist, emergency assist, распознавание дорожных знаков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vagcode.ru/2019/01/21/assist-activation/>, свободный – (20.04.2020).
7. Seeing machines technology enables gm super cruise driver assistance system [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.prnewswire.com/news-releases/seeing-machines-technology-enables-gm-super-cruise-driver-assistance-system-300540972.html>, свободный – (20.04.2020).
8. Пономарев, Н. В. Автоматизированная система контроля функционального состояния водителя транспортного средства / Н. В. Пономарев // Транспорт российской федерации. – 2010. – № 2 (27). – С. 86–94.

УДК 621.311.62

*В. Г. Гусев, А. И. Нефедьев***СОВРЕМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ
ИМПУЛЬСНЫХ БЛОКОВ ПИТАНИЯ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: nefediev@rambler.ru

В статье рассмотрены современные устройства и системы тестирования импульсных источников питания. Проанализированы принципы работы нескольких проверочных стендов для источников питания от разных производителей. Приведены параметры стендов и сравнительный анализ их характеристик.

Ключевые слова: импульсный источник питания, электросеть, стенд, нагрузочная характеристика, температура, напряжение, ток.

*V. G. Gusev, A. I. Nefed'ev***MODERN DEVICES FOR TESTING PULSE POWER SUPPLIES****Volgograd State Technical University**

The article discusses modern devices and systems for testing switching power supplies. The principles of operation of several test benches for power supplies from different manufacturers are analyzed. The parameters of the stands and a comparative analysis of their characteristics are given.

Keywords: switching power supply, mains, test bench, load characteristic, temperature, voltage, current.

Наличие качественного и надежного блока питания (БП) критически важно для обеспечения бесперебойной работы любой электронной системы. С целью повышения надежности работы системы необходимо обеспечить надежное электропитание всех элементов системы. Импульсные источники питания в настоящее время являются наиболее распространенными, и причиной тому являются их относительно малые габариты. Для того чтобы убедиться в соответствии реальных параметров импульсного источника питания заявленным параметрам, необходимо провести его тестирование.

Методики тестирования БП непрерывно развиваются и совершенствуются. Целью исследования БП является необходимость получения данных об основных характеристиках, позволяющих сравнивать БП между собой, оценивать возможность их использования в различной аппаратуре.

Тестирование импульсного БП заключается в проверке заявленных характеристик, таких как значение пульсаций напряжений в режиме номинальной нагрузки, режиме холостого хода, режиме половинной нагрузки, в режиме максимальной нагрузки, с различными вариантами нагрузок, и в режиме реальной нагрузки (например, в составе компьютера).

Также проводится тестирование на поведение источника питания при переходных процессах при подключении к электросети, и при

резком изменении параметров нагрузки, исследование формы потребляемого тока из электросети и исследование параметров источника питания при изменении напряжения электросети в заявленных пределах, измерение КПД.

Тестирование импульсных источников питания проводится также на сохранение работоспособности при повышенной и пониженной температуре окружающей среды.

Одним из немаловажных способов тестирования является визуальный осмотр БП. Данный тип тестирования позволяет определить показатели качества изделия: качество изготовления корпуса (толщина металла, жесткость, особенности сборки, качество окраски блока), качество внутреннего монтажа. Все блоки питания обязательно проверяются на соответствие стандарту ATX [1] версии 2 и более новой, или по более жесткому SSI EPS [2]. Также проверяется наличие серьезных ошибок в качестве изготовления. Проверяются паспортные параметры блока и проверяется соответствие параметров блоков питания, заявленным в технической документации на изделие.

Для контроля параметров блоков питания разработано множество устройств. Рассмотрим основные устройства, позволяющие проводить тестирование блоков питания.

На рис. 1 приведен стенд для тестирования от ИТ лаборатории Modlabs [4]. Данный прибор является микрокомпьютером, способным в ав-

томатическом режиме проводить измерения всех каналов напряжения, отслеживать действующие на линиях токи и проводить всесторонние тесты узлов БП.



Рис. 1. Стенд для тестирования источников питания

Основные возможности стенда:

- включение/отключение блока питания, замер времени включения/отключения блока;
- непрерывный мониторинг напряжений на всех каналах блока питания;
- непрерывный мониторинг токов на всех силовых каналах блока питания (кроме канала -12 В);
- непрерывное слежение за температурами внутри стенда и на выходе БП;
- возможность подключения осциллографа, для измерения пульсаций выходного напряжения;
- отслеживание и защита от повреждений при аварийных ситуациях;
- возможность снятия кросс-нагрузочных характеристик и оценка по каждому основным напряжений;
- гибкие возможности расширения и поддержка дополнительных модулей;
- наличие интерфейса *USB 2.0* для связи с компьютером и управления;
- поддержка операционных систем *Windows 2000/2003/Vista*, включая 64-бит версии;
- автономное питание от электросети 220 В;
- небольшие габариты устройства.

Стенд имеет восемь полностью управляемых каналов нагрузки, способных потреблять ток более 30 ампер. Так как нагрузка стенда построена с использованием мощных полевых транзисторов, точность и возможности установки тока потребления легко варьировать в широких пределах. Шаг задания тока на всех каналах – 50 мА, но при тестах в ручном режиме используются более большие шаги задания

тока. Шесть каналов устройства подключены к различным разъемам с напряжением +12 В, один канал создает нагрузку на выходе источника питания +5 В, и еще один канал – на выходе источника питания +3,3 В. Также имеется неуправляемый канал +5 В, создающий токовую нагрузку 1,5 А, неизменную во время всех тестов, и канал для создания токовой нагрузки 0,3 А на линии -12 В. Испытательный стенд позволяет тестировать блоки питания с мощностью до 1700 Вт при температуре окружающей среды не выше +25 °С. Мощность, потребляемая вентиляторами, может достигать 80 Вт по каналу +12 В, поэтому стенд питается от собственного автономного блока питания.

На рис. 2 представлена тестовая система тестирования источников питания от сервисного центра *fcenter* [3]. На верхних двух блоках радиаторов, охлаждаемых мощными вентиляторами типоразмера 120 x 120 x 38 мм, расположены транзисторы нагрузки 12-вольтовых каналов. Также имеются радиаторы охлаждения транзисторов нагрузки каналов +5 В и +3,3 В, а в отдельном блоке, подключаемом шлейфом к *LPT*-порту управляющего компьютера, расположены ЦАП, АЦП и сопутствующая электроника. При габаритах 290 x 270 x 200 мм она позволяет испытывать блоки питания мощностью до 1350 Вт (до 1100 Вт по шине +12 В, и до 250 Вт по шинам +5 В и +3,3 В).



Рис. 2. Система тестирования источников питания *Fcenter*

Для управления стендом и автоматизации некоторых тестов используется программа, позволяющая:

- вручную устанавливать нагрузку на каждый из четырех имеющихся каналов:

первый канал +12 В, от 0 до 44 А;
второй канал +12 В, от 0 до 48 А;
канал +5 В, от 0 до 35 А;
канал +3,3 В, от 0 до 25 А;

– в реальном времени контролировать напряжение тестируемого блока питания на указанных шинах;

– автоматически измерять и строить графики кросс-нагрузочных характеристик для указанного блока питания;

– автоматически измерять и строить графики зависимости КПД и коэффициента мощности блока в зависимости от нагрузки;

– в полуавтоматическом режиме строить графики зависимости скоростей вентиляторов блока от нагрузки;

– в полуавтоматическом режиме калибровать установку с целью получения максимально точных результатов.

Тестовая система блока питания модели 8000 (*Switching Power Supply ATS Model 8000*), производимая компанией *Chroma ATE inc* (рис. 3), является автоматической системой, и поставляется с готовой библиотекой тестовых элементов, охватывающей большинство стандартных тестов блока питания [5]. В отличие от традиционного программного обеспечения *ATE* пользователям не нужно иметь знания языка программирования для создания новых тестовых заданий. Вместо этого тестовая система позволяет пользователям использовать предварительно скомпилированные тестовые задания и упрощать определение условий и спецификаций теста.



Рис. 3. Автоматическая тестовая система блока питания *Chroma ATS 8000*

В состав установки входят электронная нагрузка: модель 6310A/6330A/ 63200/63600 се-

рии, анализатор времени / шума (модель 80611), источник питания постоянного тока (62000P/62000H), цифровой запоминающий осциллограф (серия *TDS-3000/TDS-5000/TDS-7000*), реле-мультиплексор (модель A800043), цифровой мультиметр (*Chroma 12061, Agilent 34401A*), анализатор-измеритель мощности (модель 6633), системный контроллер (промышленный ПК), тестер короткого замыкания (модель 80612), контроллер включения-выключения (модель 80613), источник переменного тока (модель серии 6400/6500/61500/61600/61700), выключатель (30A/60A по выбору с управлением аварийного останова), фильтр электромагнитных помех (30A) и вход питания системы.

Для тестирования источников питания находят применение электронные нагрузки, предназначенные для имитации нагрузки источников электропитания. Несмотря на то что нагрузку можно создать с помощью реостатов, намного удобнее использовать электронную нагрузку, являющуюся одновременно и средством измерения, позволяющим измерить основные параметры ИП в реальных условиях их эксплуатации. Электронные нагрузки постоянного тока могут эмулировать различные режимы постоянного тока, постоянного напряжения, постоянного сопротивления, статической и динамической нагрузки и короткого замыкания. Электронные нагрузки переменного тока могут эмулировать режимы постоянного тока, постоянного сопротивления, коэффициента амплитуды, коэффициента мощности и короткого замыкания [5].

Примером такого устройства может служить электронная нагрузка серии АКИП-13хх [6]. Такие устройства обеспечивает минимальное напряжение на нагрузке в пределах от 0,1 до 1 В при токе нагрузки до 360 А.

Современные электронные нагрузки, включая электронные нагрузки серии АКИП-13хх, позволяют тестировать как первичные, так и вторичные источники питания постоянного и переменного тока не только в «классическом» статическом режиме, но и в динамическом режиме, полностью моделирующем поведение реальной нагрузки. Со все возрастающими требованиями к источникам питания и увеличением числа нормированных параметров, электронные нагрузки заменяют классические пассивные реостаты, неспособные в полной мере обеспечить тестирование и проверку источников питания. Использование встроенных измери-

тельных приборов в электронные нагрузки позволяет минимизировать число других средств измерения, используемых при тестировании и поверке источников питания.

Сравнительный анализ вышеперечисленных устройств для тестирования показал, что наиболее широкий спектр решения задач позволяет решать *Chroma ATS 8000*, но с экономической точки зрения и габаритов устройства он проигрывает другим тестирующим системам. Тестовые системы от *Modlabs*, *Fcenter* и электронные нагрузки АКИП-13хх имеют сравнительно малые габариты и имеют возможность встраиваться в другие системы при работе.

Таким образом, рассмотренные устройства и системы для тестирования импульсных источников питания позволяют не только весьма детально исследовать поведение блока питания в различных режимах, но и объективно сравнить различные блоки питания по выбранным параметрам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ATX Specification version 2.2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://arduinoplus.ru/wp-content/uploads/2018/03/developer_specs_atx2_2.pdf, свободный. – (20.04.2020).
2. Блоки питания: конструкция, форм-факторы и спецификации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.thg.ru/howto/obzor_blokov_pitaniya/obzor_blokov_pitaniya-03.html, свободный. – (20.04.2020).
3. Методика тестирования блоков питания. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://fcenter.ru/online/hardarticles/tower/22647-Metodika_testirovaniya_blokov_pitaniya, свободный. – (20.04.2020).
4. Методика тестирования блоков питания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.modlabs.net/page/metodika-testirovaniya-blokov-pitaniya-1>, свободный. – (20.04.2020).
5. Switching Power Supply ATS Model 8000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.chromaate.com/product/smpps_ats_8000.htm, свободный. – (20.04.2020).
6. Электронные нагрузки серии АКИП-13хх и их использование для тестирования источников питания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://prist.ru/library/stati/elektronnye_nagruzki_serii_akip-13hh_i_ih_ispolzovanie_dlya_testirovaniya_istochnikov_pitaniya/, свободный. – (20.04.2020).

Ответственный за выпуск редактор РИО
В. В. Свитачева

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

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

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

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

Темплан 2020 г. (научные издания). Поз. № 18ж. Дата выхода в свет 09.06.2020 г. Формат 60 × 84
1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,44. Уч.-изд. л. 7,60.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ №

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

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

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В научно-техническом журнале «ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ» публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований, представляют научный и практический интерес для широкого круга специалистов в области экономики.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия журнала, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редакция направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей на компакт-дисках (CD) в полном соответствии с распечатанным оригиналом. Диск должен быть вложен в отдельный конверт, на этикетке указываются фамилии авторов статьи.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см; нижнее – 3,0 см; левое – 2,5 см; правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, где работает автор статьи. В конце статьи ставится полное название учреждения, которое рекомендует статью для публикации, дата и подпись автора (всех авторов).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводятся на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать 8 страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *a*, *b*, и т. д. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной-двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail); документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.