



Издается
с января 2004 г.

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

ISSN 2500-0586

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

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

Редакционная коллегия:

И. И. Артюхов – д.т.н., проф. СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
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. Дарманиян – д.т.н., проф. ВГАУ,
г. Волгоград
А. М. Иванов – д. т. н., проф.,
МГТУ (МАДИ), г. Москва
В. В. Коротаев – д.т.н., проф., ИТМО,
г. Санкт-Петербург
Г. О. 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. В. Навроцкий – д.х.н., проф., ВолгГТУ
А. А. Ревин. – д.т.н., проф., ВолгГТУ
Б. В. Скворцов – д.т.н., проф., СГАУ
им. академика С. П. Королева, г. Самара
О. А. Тишин. – д.т.н., проф., ВолгГТУ
Е. А. Федянов – д.т.н., проф., ВолгГТУ
В. М. Шаповалов – д.т.н., проф. ВолгГТУ;
В. М. Шарипов – д.т.н., проф., МГТУ
(МАМИ), г. Москва

Ответственный секретарь
Ю. В. Аристова – доц., к.т.н.

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала по каталогу
Агентства «Роспечать»
для Российской Федерации –
94193(ОК+ЭК). По вопросам
подписки обращаться
в издательство.

Тел. издательства ВолгГТУ:
+7 (8442) 24-84-06,
fax: +7 (8442) 24-84-06,
e-mail: otr@vstu.ru

№ 2 (19)
Июнь
2017

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: – (8442) 23-00-76
e-mail: rector@vstu.ru

Отв. секретарь: телефон: – (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,
Rector of VSTU

Editorial Board:

I. I. Artuchov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU, Saratov
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
V. V. Korotaev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
ITMO University, St. Petersburg
G. O. Kotiev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU, Saratov
M. Clemens – D. Sc. (Engineering), Prof.,
University of Stuttgart, Germany
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. V. Navrotsky – D. Sc. (Chemistry), Prof.,
VSTU, Volgograd
A. A. Revin – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
B. V. Skvortsov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
Samara University, Samara
O. A. Tishin – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
V. M. Shapovalov – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
V. M. Sharipov – D. Sc. (Engineering),
Prof., UMeCh, Moscow

Executive Secretary
Yu. V. Arisova – PhD, Associate Prof.

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

VSTU Publisher tel.:

+7 (8442) 24-84-06,
fax: +7 (8442) 24-84-06,
e-mail: otr@vstu.ru

© Volgograd State Technical University,
«Energo- e resursosberezhenie: promyshlennost' i transport », 2017

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 (19)
June
2017**

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 accordance
with the current legislation of the Russia Federation.*

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

The articles are published for free.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Авдеюк Д. Н. 18

Азарян Д. К. 43

Артюшенко Н. С. 18

Атрашенко О. С. 36

Ахмедова О. О. 32

Бондаренко А. В. 49

Булаев А. М. 57

Городецкий А. Е. 61

Дементьев С. С. 21, 27

Исаев А. В. 43

Ким Д. С. 7

Кирюхина Е. И. 15

Копейкина Т. В. 46

Курбанов В. Г. 61

Макартичан С. В. 7

Нефедьев А. И. 43

Панасенко М. В. 11

Скорикова Е. М. 36

Сницарук Д. Г. 53

Степанов А. А. 53

Стрижиченко А. В. 49

Тарасова И. Л. 61

Хоперскова Л. В. 40

Шилин А. А. 15

Шилин А. Н. 32, 53, 57

AUTHOR INDEX

Akhmedova O. O. 32

Artyushenko N. S. 18

Atrashenko O. S. 36

Avdeyuk D. N. 18

Azaryan D. K. 43

Bondarenko A. V. 49

Bulaev A. M. 57

Dementyev S. S. 21, 27

Gorodetskiy A. E. 61

Isaev A. V. 43

Khoperskova L. V. 41

Kim D. S. 7

Kiryukhina E. I. 15

Kopeikina T. V. 47

Kurbanov V. G. 61

Makartichyan S. V. 7

Nefed'ev A. I. 43

Panasenko M. V. 12

Shilin A. A. 15

Shilin A. N. 32, 53, 57

Skorikova E. M. 36

Snitsaruk D. G. 53

Steranov A. A. 53

Strizhichenko A. V. 49

Tarasova I. L. 61

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Макартичан С. В., Ким Д. С.</i> Информационно-измерительная система контроля гололедных отложений на проводах ЛЭП.....	7
<i>Панасенко М. В.</i> Оперативные и перспективные мероприятия по снижению гололедно-ветровых аварий в электросетях.....	11
<i>Кирюхина Е. И., Шилин А. А.</i> Интеллектуальная релейная защита систем электроснабжения.....	15
<i>Артюшенко Н. С., Авдеюк Д. Н.</i> Исследование влияния окружающей среды на параметры линии при определении места повреждения линии электропередачи локационным методом.....	18
<i>Дементьев С. С.</i> Диагностика состояния воздушных линий электропередачи с применением нейрокompьютера.....	21
<i>Дементьев С. С.</i> Оценка погрешности видеоизмерений при диагностике оледенения ЛЭП оптическим методом.....	27
<i>Ахмедова О. О., Шилин А. Н.</i> Исследование влияния условий окружающей среды на параметры воздушных линий электропередачи для корректировки уставок систем релейной защиты в реальном времени.....	32
<i>Атрашенко О. С., Скорикова Е. М.</i> Современные методы контроля изоляции кабелей.....	36
<i>Хоперскова Л. В.</i> Тепловая неустойчивость жидкого диэлектрика в силовом трансформаторе.....	40
<i>Нефедьев А. И., Исаев А. В., Азарян Д. К.</i> Емкостной делитель высокого напряжения на газонаполненных конденсаторах.....	43
<i>Копейкина Т. В.</i> Анализ существующих достоинств и недостатков при применении устройств плавного пуска электродвигателей.....	46
<i>Бондаренко А. В., Стрижиченко А. В.</i> Оценка энергетической эффективности различных схем парокомпрессионного теплового насоса.....	49
<i>Шилин А. Н., Сницарук Д. Г., Степанов А. А.</i> Оптико-электронный дальнометрический прибор контроля профилограмм обечаек.....	53
<i>Шилин А. Н., Булаев А. М.</i> Анализ методов и средств контроля горючести электрических кабелей с полимерной оболочкой.....	57
<i>Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Курбанов В. Г.</i> Адаптивная искусственная кисть руки.....	61

CONTENTS

<i>Makartichyan S. V., Kim D. S.</i> INFORMATION-MEASURING CONTROL SYSTEM OF ICE DEPOS-ITS ON POWER LINE WIRES.....	7
<i>Panasenko M. V.</i> EXPEDITIOUS AND PERSPECTIVE ACTIONS FOR DECREASE IN ICE AND WIND ACCIDENTS IN POWER SUPPLY NETWORKS.....	12
<i>Kiryukhina E. I., Shilin A. A.</i> SMART RELAY PROTECTION OF POWER SUPPLY SYSTEMS.....	15
<i>Artyushenko N. S., Avdeyuk D. N.</i> INVESTIGATION OF ENVIRONMENTAL INFLUENCE ON THE LINE PARAMETERS DETERMINING THE PLACE OF DAMAGE TO THE ELECTRIC TRANSMISSION LINE BY THE LOCATION METHOD.....	18
<i>Dementyev S. S.</i> DIAGNOSTICS OF THE OVERHEAD POWER LINE CONDITION WITH THE USE OF A NEUROCOMPUTER.....	21
<i>Dementyev S. S.</i> ESTIMATION OF THE VIDEO MEASUREMENTS ERROR IN THE DIAGNOSIS OF OHL ICING BY THE OPTICAL METHOD.....	27
<i>Akhmedova O. O., Shilin A. N.</i> THE ENVIRONMENTAL INFLUENCE AT ELECTRICITY LINES TRANSMISSION FOR RELAY SYSTEM SETTINGS PROTECTION IN REAL TIME.....	32
<i>Atrashenko O. S., Skorikova E. M.</i> THE MODERN CONTROL METHODS OF INSULATION OF CABLES.....	36
<i>Khoperskova L. V.</i> THERMAL INSTABILITY OF LIQUID DIELECTRIC IN POWER TRANSFORMER.....	41
<i>Nefed'ev A. I., Isaev A. V., Azaryan D. K.</i> CAPACITIVE HIGH VOLTAGE DIVIDER ON GAS FILLED CAPACITORS.....	43
<i>Kopeikina T. V.</i> ANALYSIS OF EXISTING STRENGTHS AND WEAKNESSES IN THE APPLICATION OF SOFT STARTERS OF ELECTRIC MOTORS.....	47
<i>Bondarenko A. V., Strizhichenko A. V.</i> ASSESSMENT OF POWER EFFECTIVENESS OF VARIOUS SCHEMES OF A VAPOR-COMPRESSION HEAT PUMP.....	49
<i>Shilin A. N., Snitsaruk D. G., Stepanov A. A.</i> OPTICAL-ELECTRONIC RANGEFINDER INSTRUMENT OF MONITORING PROFILOGRAMMS OF SHELLS.....	53
<i>Shilin A. N., Bulaev A. M.</i> THE ANALYSIS OF METHODS AND CONTROL DEVICES OF COMBUSTIBILITY OF ELECTRIC CABLES WITH THE POLYMERIC COVER.....	57
<i>Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L., Kurbanov V. G.</i> ADAPTIVE ARTIFICIAL HAND.....	61

С. В. Макартичан, Д. С. Ким

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА
КОНТРОЛЯ ГОЛОЛЕДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПРОВОДАХ ЛЭП**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: hymir@mail.ru

Рассмотрены причины обледенения проводов ЛЭП и контактных сетей, которые способствуют увеличению ущерба от обледенения проводов в условиях РФ. Проведен аналитический обзор способов борьбы с обледенением проводов ЛЭП и контактных сетей, а также методов и средств обнаружения гололедных отложений. Предложена информационно-измерительная система контроля параметров гололедной муфты, позволяющая локализовать места и оценить размеры гололедных отложений на проводах ЛЭП.

Ключевые слова: обледенение проводов ЛЭП, гололедная муфта, линии с распределенными параметрами, методы обнаружения гололедных отложений.

S. V. Makartichyan, D. S. Kim

**INFORMATION-MEASURING CONTROL SYSTEM OF ICE
DEPOSITS ON POWER LINE WIRES**

Volgograd State Technical University

The reasons of power line wires and contact networks frosting which promote increase in damage from wires frosting in the conditions of the Russian Federation are considered. The state-of-the-art review of ways against power line wires and contact networks frosting, and also methods and sensors of ice deposits is carried out. The information-measuring control system of ice coupling parameters allowing to localize places and to estimate the amount of ice deposits on power line wires is offered.

Keywords: power line wires frosting, the ice coupling, distributed parameters lines, ice deposits detection methods.

Введение

При эксплуатации воздушных линий электропередач часто возникает проблема обледенения проводов. Отложение гололеда, изморози и мокрого снега (далее – гололеда) представляет большую опасность для нормальной эксплуатации воздушных линий электропередачи.

Значительное число воздушных линий электропередачи в России находятся в третьем, четвертом и особом районах по гололеду, подверженных в зимнее время и в межсезонье образованию сверхрасчетных гололедных отложений (практически 1 раз в 2–4 года). Толщина гололеда на них может достигать 60–70 мм, существенно утяжеляя провода. В результате значительного увеличения массы проводов и воздействующих на них динамических и статических нагрузок происходят опасные и нежелательные явления, особенно при сильном ветре.

Аварии при гололедно-ветровых нагрузках парализуют систему энергоснабжения потребителей вследствие массовых обрывов токопроводящих проводов и грозозащитных тросов под тяжестью снега и льда. Эти аварии составляют для территории России около 25 % от общего количества повреждений на воздушных линиях, а их продолжительность – около 40 % от общей продолжительности всех аварийных отключений.

Гололедные аварии на ЛЭП имеют массовый характер и приносят огромный материальный ущерб из-за недоотпуска электроэнергии потребителям и необходимости проведения ремонтно-восстановительных работ.

**Анализ существующего уровня
устройств контроля гололедных отложений**

На процесс гололедообразования на линиях электропередачи влияют температура воздуха, скорость ветра, высота подвеса проводов, закру-

чивание проводов, диаметр проводов, протекающие нагрузочного тока по проводам, действие возникающего при этом электрического поля и диаметр капель.

Поэтому в настоящее время существуют два направления обнаружения гололеда:

1) прогнозирование вероятности возможного гололедообразования на основе метеорологических данных воздушной среды, окружающей провода, с учетом технических параметров ЛЭП;

2) непосредственный контроль процесса гололедообразования на проводах с помощью датчиков и устройств обнаружения гололеда [1–3], что позволяет достаточно точно определять момент начала его необходимой плавки.

Прогнозирование гололедообразования на основе метеорологических данных воздушной среды применяют во многих странах, где обледенение линий электропередачи является актуальной проблемой, чтобы смягчить или избежать его влияния на работоспособность этих линий. При этом учитываются рельеф местности, где проходит трасса воздушной ЛЭП, высота трассы над уровнем моря, а также климатические и погодные условия. Прогноз осуществляется применительно к техническим параметрам воздушной линии.

При обледенении меняется целый ряд физических, геометрических и других параметров воздушных линий, что позволяет создавать датчики гололеда, основанные на различных способах определения появления или наличия гололеда на проводе.

На сегодняшний день имеется огромное количество устройств и методов для обнаружения гололеда.

Датчики при появлении гололеда на ЛЭП реагируют на изменения:

- физических параметров среды, окружающей провода;
- электрических характеристик проводов;
- веса или натяжения проводов;
- условий распространения высокочастотных и импульсных сигналов по проводам воздушных линий.

Наиболее объективным методом измерения гололедной нагрузки на проводах воздушной линии является **измерение веса** одного или нескольких пролетов провода воздушной линии. Величина натяжения провода для конкретной воздушной линии определяется нагрузками от гололеда и ветра, а также температурой окружающей среды. Для оценки степени напряжен-

ного состояния материала провода и сравнения его с предельно допустимым значением представляется наиболее целесообразным контроль натяжения провода.

Применяемые в энергетике датчики построены на принципе срабатывания от веса льда на проводах ЛЭП. Их основу составляют преобразования взаимного перемещения деталей в сигнал о появлении гололеда на проводах электрических линии.

Способ реализуется посредством измерения гололедной и гололедно-ветровой нагрузок на провод с последующим сравнением измеренных величин с ранее заданными величинами пороговых нагрузок (значимых гололедных и гололедно-ветровых, опасных, допустимых нагрузок и т. д.)

Общие недостатки (при любом варианте реализации):

- сложное конструктивное исполнение и недостаточная надежность, вызванная большим количеством механических деталей;
- необходимо дополнительное определение величины ожидаемой ветровой нагрузки на провод без отложений для использования ее в качестве эталона, что приводит к усложнению;
- если учесть ветровые нагрузки на провода, то погрешность таких датчиков очень большая;
- вес провода с гололедными отложениями измеряется только на одном пролете воздушной линии, в то время как гололед может образовываться и на других, неконтролируемых, пролетах линии электропередачи;
- момент начала гололедообразования не фиксируется;
- способ предполагает определение интенсивности процесса гололедообразования по скорости приращения веса гололеда;
- не являются универсальными, не могут использоваться без настройки для любого типа ЛЭП, имеющих различные параметры.

Локационный метод основан на зависимости волнового сопротивления провода от толщины ледяной муфты. При локационном методе диагностики информацию несут импульсы, отраженные от неоднородностей волнового сопротивления линии. При образовании ГИО на проводах ВЛ появляется дополнительное затухание локационных сигналов и уменьшается скорость их распространения по проводам

Из-за уменьшения скорости распространения происходит запаздывание локационных импульсов. Запаздывание, обусловленное удлине-

нием проводов под воздействием веса и ветровых нагрузок, мало влияет на суммарное запаздывание, поэтому им можно пренебречь.

Локационный метод обнаружения гололеда является объективнее и информативнее метода взвешивания проводов.

Локационный метод позволяет надежно следить в реальном времени за динамикой обледенения проводов и четко определять начало необходимой плавки гололедных отложений для предотвращения обрыва проводов электролиний и обусловленный этим недоотпуск электроэнергии потребителям.

Метод позволяет следить за эффективностью плавки гололеда и дает возможность определять момент его своевременного прекращения при исчезновении опасности разрушения линии и обрыва проводов. Оптимизация времени плавки гололеда способствует энергосбережению и позволяет сэкономить значительные финансовые средства. В то же время в некоторых ситуациях можно избежать плавки гололеда, если вес отложений будет меньше нормативной величины и начнется естественный сброс гололеда с проводов.

Общие недостатки локационных методов, основанных на приеме отраженного сигнала:

- невозможность отличить наличие небольшого по толщине гололедного образования на большой длине воздушной линии от опасной концентрации льда на ее отдельных небольших участках.
- широкий спектр частот при передаче информации является помехой для ВЧ приемников, установленных по концам ВЛ.

Информационно-измерительная система контроля гололедных отложений на проводах ЛЭП

Локационное устройство, осуществляющее зондирование ЛЭП, называется рефлектометром. В рефлектометрах основным источником погрешностей являются две причины:

- отражение импульса от неоднородности волнового сопротивления;
- искажение импульса, обусловленного различными значениями волновых сопротивлений для частотных составляющих зондирующего импульса.

Для исключения влияния первой причины необходимо измерение не отраженного, а прямого сигнала, т. е. время прохождения сигнала в одном направлении. Для исключения второй причины – использовать гармонический сигнал, что позволит увеличить отношение «сигнал / шум».

Однако для реализации этих методов измерения необходим дополнительный канал образцового сигнала, который может быть сравнительно просто реализован с помощью радиотехнических устройств. Для исключения взаимного влияния сигналов, распространяемых по проводу и воздуху, необходимо чтобы частоты этих сигналов отличались.

Как показывают исследования [2], наибольший вклад в погрешность измерения параметров гололедной муфты вносит погонная емкость C_0 между проводами. Будем полагать, что провод покрыт однородным цилиндрическим осесимметричным слоем льда.

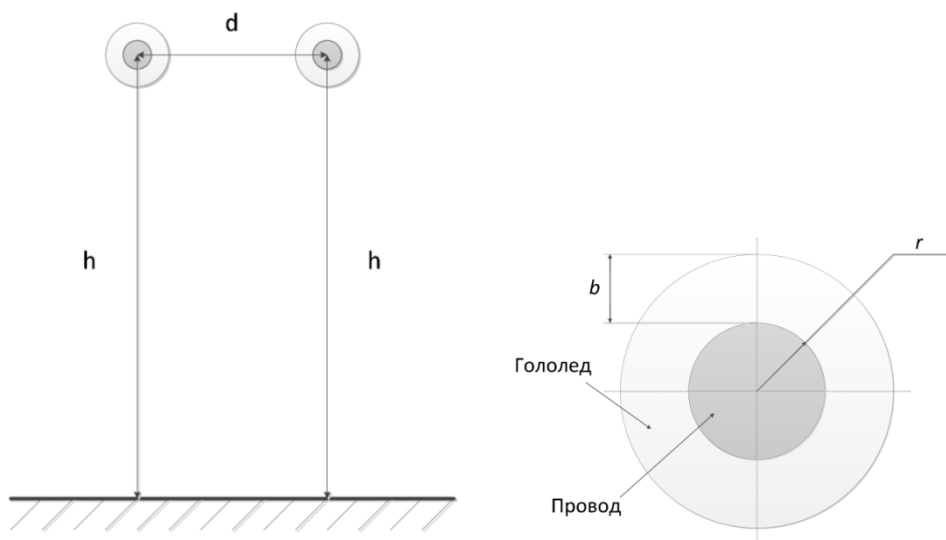


Рис. 1. Модель в программной среде Elcut

Для определения зависимости погонной емкости между проводами с учетом влияния земли от изменения толщины ледяной муфты было произведено моделирование (рис. 1) в программной среде Elcut для следующих парамет-

ров: радиус проводов $r = 1$ см, высота подвеса проводов над землей $h = 10$ м, расстояние между проводами $d = 1$ м, относительная диэлектрическая проницаемость льда $\epsilon_d = 8$. Полученные результаты приведены в таблице.

Результаты моделирования

b , см	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_0 , пФ	12,04	13,13	14,10	14,87	15,53	16,23	16,92	17,55	18,09	18,62

Полученные результаты были аппроксимированы полиномом четвертой степени:

$$C_0(b) = 1,004 + 1,752 \cdot 10^{-10} \cdot b - 2,829 \cdot 10^{-9} \cdot b^2 + 3,257 \cdot 10^{-8} \cdot b^3 - 1,385 \cdot 10^{-7} \cdot b^4, \quad (1)$$

Следует отметить, что данная функциональная зависимость емкости от толщины гололедной муфты справедлива только для параметров рассмотренной модели.

Принцип работы предлагаемой системы основан на зависимости времени распространения гармонического сигнала t по длинной линии от толщины гололедной муфты. Увеличение диэлектрической проницаемости простран-

ства между проводами линии из-за гололедных отложений ведет к увеличению погонной емкости C_0 между проводами, что вызывает уменьшение скорости распространения сигнала v , и, следовательно, увеличение времени t его прохождения. Время распространения гармонического сигнала t по длинной однородной линии можно определить как отношение длины l участка к фазовой скорости v :

$$t = \frac{l}{v} = l \sqrt{\frac{1}{2} \left[C_0 L_0 + \frac{\sqrt{(R_0^2 + \omega^2 L_0^2)(G_0^2 + \omega^2 C_0^2)} - G_0 R_0}{\omega^2} \right]}, \quad (2)$$

где R_0 , L_0 , G_0 , C_0 – первичные параметры линии, ω – частота гармонического сигнала.

Подставляя (1) в (2) будем иметь зависимость времени распространения сигнала по участку ЛЭП от толщины гололедных отложений.

Линия, на которой проводится контроль гололедообразования, разбивается на участки (рис. 2). В начале и конце каждого участка ус-

тановлены радиоприемники и радиопередатчики, позволяющие передавать информацию о времени распространения гармонического высокочастотного сигнала по участку линии на диспетчерский пункт. Количество таких участков и местоположение установки датчиков на линии определяется в соответствии с картами гололедно-ветровых нагрузок для конкретной ЛЭП.

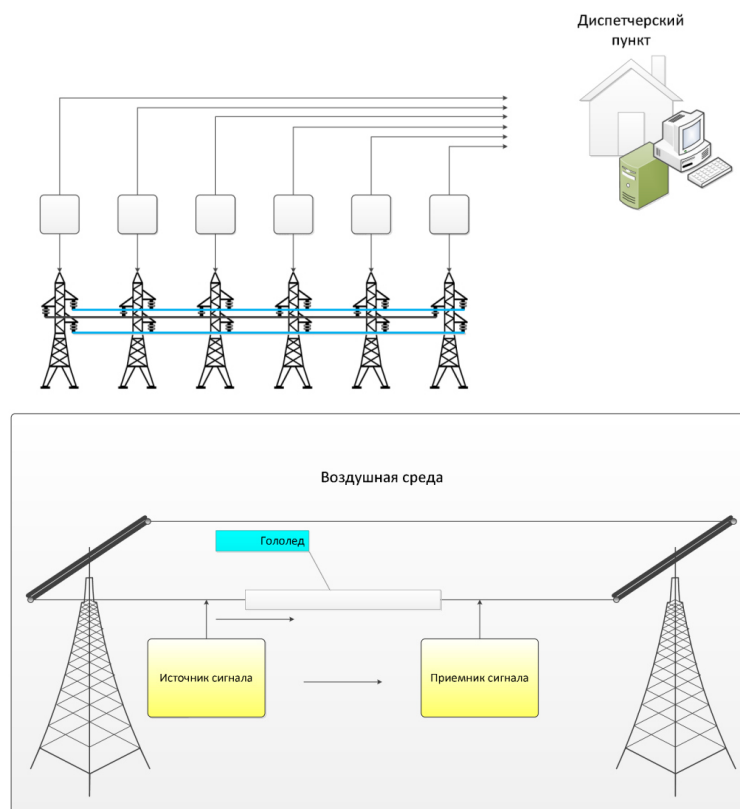


Рис. 2. Структурная схема ИИС контроля гололедных отложений

Данные с каждого участка передаются только в дискретные моменты времени, поэтому представляется возможным использовать один и тот же радиоканал с передачей сигналов, разделенных во времени. В диспетчерском пункте будет располагаться сервер, который будет принимать, обрабатывать, хранить и отображать данные о местоположении и размерах гололедных отложений на проводах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Титов, Д. Е.* Мониторинг интенсивности гололедообразования на воздушных линиях электропередачи и в контактных сетях : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Титов Дмитрий Евгеньевич. – Саратов, 2014. – 150 с.
2. *Минуллин, Р. Г.* Обнаружение гололедных образований на линиях электропередачи локационным зондированием / Р. Г. Минуллин, Д. Ф. Губаев. – Казань : Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – 208 с.
3. *Левченко, И. И.* Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах : учеб. пособие / И. И. Левченко, А. С. Засыпкин, А. А. Аллилуев, Е. В. Сацук. – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 448 с.

УДК 621.311.315.1

М. В. Панасенко

ОПЕРАТИВНЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫХ АВАРИЙ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградский государственный технический университет
e-mail: panasenkoma@mail.ru

Частично рассмотрена система мероприятий по предотвращению и ликвидации гололедно-ветровых аварий, включающая в себя только оперативные (улучшение технического состояния электрических сетей) и перспективные (совершенствование сооружения воздушных линий) мероприятия. К первым относятся обследование технического состояния линий, их реконструкция, внедрение систем управления активами, использование автономных источников питания и накопителей и внедрение автоматизированных систем управления. Ко вторым относят освоение оборудования с повышенной стойкостью к гололедно-ветровым воздействиям.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, реконструкция, гололедно-ветровые аварии, техническое состояние электросетей; пропускная способность, надежность.

M. V. Panasenko

EXPEDITIOUS AND PERSPECTIVE ACTIONS FOR DECREASE IN ICE AND WIND ACCIDENTS IN POWER SUPPLY NETWORKS

**Kamyshin institute of technology (branch)
Volgograd state technical university**

The system of actions for prevention and elimination naked ice and wind accidents, including only quick (improvement of technical condition of electric networks) and perspective (improvement of a construction of power lines) actions is partially considered. Inspection of technical condition of lines, their reconstruction, introduction of control systems of assets, use of independent power supplies and stores and introduction of automated control systems concern to the first. Re-fer development of the equipment with the increased resistance to ice and wind influences to the second.

Keywords: electricity transmission power lines, reconstruction, ice and wind accidents, technical condition of power supply networks; capacity, reliability.

Наименее надежным элементом электрических сетей являются воздушные линии (ВЛ) электропередачи. До 80 % всех повреждений в сетях приходится на их долю. Главными причинами, вызывающими резкое увеличение повреждаемости воздушных линий электропередач, являются климатические воздействия (38 % из всех отказов). Система мероприятий включает в себя оперативные, перспективные, технические и организационные мероприятия, рассмотрим первые два.

1. Улучшение технического состояния электрических сетей:

1.1. Обследование технического состояния ВЛ и их элементов в процессе эксплуатации и после повреждений.

Как показывает практика, наиболее эффективные методы диагностики ВЛ – это дистанционные. Их проведение достаточно трудоемко и требует значительных капитальных вложений, однако полученные результаты остаются востребованными на протяжении длительного периода времени (3–5 и более лет). Обследование воздушной линии электропередачи происходит с борта воздушного судна с помощью специальных лазерных сканеров и фотокамеры высокого разрешения. На основе полученных данных строится трехмерное изображение оборудования, охранных зон, окружающей местности и растительности. В момент наблюдения получают полную картину состояния линии с учетом данных по нагрузке ВЛ, метеорологических параметров, типа провода и его физических характеристик. Полученная информация (об изменении состояния линии при определенных метеоусловиях, о механической нагрузке), внесенная в компьютерную программу, используется для прогнозирования состояния ВЛ на ближайшие годы. Можно даже «предсказать» срок эксплуатации линии, состояние охранных зон на несколько лет вперед. Описан-

ная технология является уникальной и была разработана в России компанией «ОПТЭН».

К другим современным методам диагностики относятся:

– мониторинг оборудования с помощью космических спутников (эта технология применяется в основном в военных целях);

– диагностика состояния провода с помощью высокоточных датчиков, размещаемых на оборудовании. Датчики фиксируют температуру провода и окружающей среды, токи нагрузки и т. п. В настоящее время ведутся научные разработки, позволяющие усовершенствовать эту технологию [1].

1.2. Реконструкция ВЛ.

Реконструкция и техническое перевооружение физически изношенного и морально устаревшего оборудования рассматриваются как приоритетное направление инвестиционной политики в электросетевом строительстве. Предусматривается полное восстановление ВЛ на металлических и железобетонных опорах при сроках службы 50–60 лет и более, а при менее длительных сроках работы – частичная реконструкция активной части ВЛ [2].

1.3. Внедрение систем управления технологическими активами.

Надежное функционирование объектов электроэнергетики обеспечивается постоянным проведением ремонтных работ. С помощью современных систем управления технологическими активами (СУД) оптимизируется процесс управления ремонтными работами, обеспечивается баланс между рисками отказа оборудования и затратами на его обслуживание и ремонт. Оценка состояния оборудования производится с помощью паспортизации и диагностики. Система управления технологическими активами позволяет:

– через оценку уровня рисков и технического состояния расставить приоритеты, сосредото-

точить внимание на тех активах, которые несут в себе самые высокие риски;

– сформировать базу, которой могут пользоваться работники предприятия всех уровней, и предоставить руководству полную информацию по сетевым активам для принятия обоснованных организационно-технических решений [1].

1.4. Внедрение автоматизированных систем управления в распределительных сетях.

Применение технологии децентрализованной автоматизации, базирующейся на автоматическом секционировании сети с помощью реклоузеров, повышает надежность распределительных сетей 6–10 кВ, снижает эксплуатационные издержки на профилактическое обслуживание; расследование аварий; ремонт поврежденного оборудования; сбор, обработку и запись информации о режимах и событиях; поиск места повреждения на ВЛ [6].

При возникновении повреждения на линии, реклоузеры автоматически выделяют поврежденный участок и передают информацию об отключении на диспетчерский пункт. Оперативная бригада направляется непосредственно на участок с аварией, не тратя время на объезд всего фидера. Управление реклоузером может осуществляться как местно, так и дистанционно при помощи программного обеспечения. Выпуск вакуумных реклоузеров серии PBA/ TEL освоила фирма «Таврида Электрик». Реклоузел PBA/ TEL прекрасно зарекомендовал себя как надежный многофункциональный аппарат, использующийся в различных странах мира (Россия, Казахстан, Украина,

Литва, Югославия, Сербия, Болгария, Вьетнам, Германия, Австралия, Великобритания, Южная Африка, Чили и др.) [3].

1.5. Использование автономных источников питания и накопителей электроэнергии.

Современное состояние промышленности позволяет решить проблему восстановления электроснабжения потребителей на время проведения восстановительных работ в электрических сетях путем установки автономных (стационарных или мобильных) источников питания. Мощность источников питания подбирается по нагрузке потребителя. Установка автономных источников питания на напряжении 0,4 и 6–10 кВ – многоплановая задача, прежде всего для проектировщиков. Потребуется адаптировать местную сеть, обеспечить связь источника питания с местным питающим центром.

Другой способ обеспечения бесперебойности электроснабжения – применение накопителей электроэнергии. В зависимости от вида накапливаемой энергии можно выделить две основные группы: механические накопители энергии (ГАЭС, инерционные аккумуляторы – маховики, аккумуляторы, основанные на принципе сжатия воздуха); электрохимические аккумуляторы энергии (Li-ion, Na-S, свинцово-кислотные и другие) [4].

Возможные точки размещения накопителей энергии: трансформаторные подстанции и конечные потребители. Возможные места размещения накопителей энергии зависят от целей их применения (см. таблицу).

Цель использования и место установки накопителей энергии

Цель использования накопителей энергии	Места размещения накопителей энергии
Выравнивание пиковых нагрузок	Объекты генерации, конечные потребители
Регулирование выработки ВИЭ (высоковольтные источники энергии)	Объекты генерации, конечные потребители
Регулирование частоты энергосистемы	Электрические сети, объекты генерации, конечный интересант (системный оператор)
Повышение надежности электроснабжения	Электрические сети, конечные потребители
Аварийные источники питания	Конечный потребитель (особенно объекты первой категории надежности электроснабжения)

Наиболее распространенными системами накопления электроэнергии на текущий момент являются гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС, более 98 % всей установленной мощности накопителей энергии в мире). Но ввиду своей существенной инертности ГАЭС

нельзя использовать в целях повышения надежности электросетей [3].

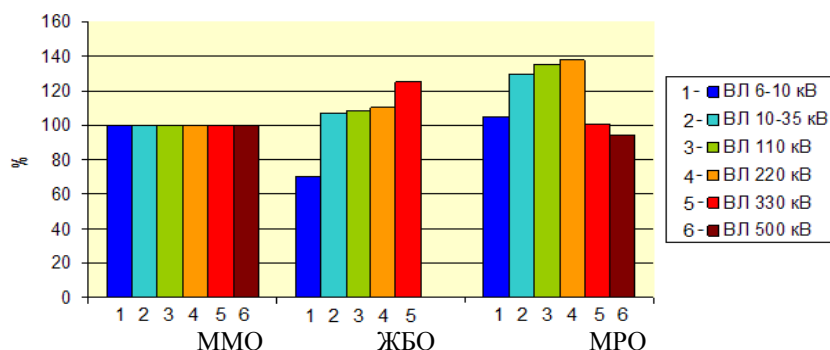
2. Совершенствование сооружения ВЛ:

2.1. Промышленное освоение оборудования ВЛ с повышенной стойкостью к гололедно-ветровым воздействиям.

По количеству отказов на первом месте стоят провода и тросы (37 %), затем изоляторы, опоры и арматура. По тяжести отказов, на первом месте стоят опоры.

Опоры. В отечественном электросетевом строительстве традиционно используют стальные опоры башенного типа и опоры из центрифугированного железобетона. С целью увеличения сроков службы воздушных линий электропередачи (до 50–75 лет), уменьшения

потока отказов от климатических нагрузок, сокращения сроков строительства, уменьшения времени восстановления после аварий и снижения затрат на эксплуатацию предложена замена железобетонных (ЖБО) или металлических решетчатых опор (МРО) на многогранные (ММО). Соотношение стоимостей строительства сетей разных классов напряжения на опорах различных типов приводится на диаграмме (см. рисунок).



Соотношение стоимостей строительства сетей разных классов напряжения на опорах различных типов

Преимущества многогранных опор проявляются в наибольшей степени для сетей напряжением 35–220 кВ. Многогранные опоры будут предпочтительнее в городских условиях, а также в горных и северных районах.

За рубежом, например в Канаде и США, в распределительном комплексе начинается внедрение композитных опор [5]. Их отличает высокая степень прочности, упругость, повышенная огнестойкость, легкость, простота в установке. Опоры модульные, любой модуль заменяем. По результатам опытной эксплуатации, композитные опоры отлично противостоят изломам и выдерживают даже экстремальные природные нагрузки. Гарантийный срок службы композитных опор у некоторых производителей более 40 лет. Недостаток композитных опор – их высокая стоимость. Поэтому предлагается их чередовать с деревянными опорами, что позволит избежать «каскадных» отключений линии в случае сильного ветра, снегопада или ледяного шторма. Подобное оборудование рассматривается как весьма перспективное в регионах и странах, подверженных ледяным дождям и сильным снегопадам.

Провода. Повышение пропускной способности и механической прочности воздушных линий электропередачи в условиях экстремальных климатических нагрузок является одной из

актуальных задач для электросетевых компаний. Данные требования достигаются за счет усовершенствований конструкции провода:

- использование специальных термостойких сплавов с присадками циркония (TACSR/ACR, TACSR/HICIN, ZTACSR/HICIN). Такие провода устойчивы к высоким температурам и могут в течение длительного времени выдерживать повышенную токовую нагрузку. Повышенная температура поверхности провода в штатном режиме препятствует отложению на нем гололеда;

- создается зазор между токопроводящими слоями провода и сердечником (GTACSR/GZTACSR). При механических нагрузках тяжение приходится на стальную сердечник. Значительно уменьшается стрела провеса провода, чем у других типов проводов, при одинаковой токовой нагрузке;

- проволоки токопроводящих слоев имеют не круглое, а Z-образное сечение. Между двумя Z-образными проволоками возникает большая контактная поверхность, что улучшает демпфирование и значительно снижает амплитуду при «пляске» проводов. Провод AERO-Z лучше противостоит снегу и обледенению, ледяные наросты отделяются быстрее.

Общий недостаток работы проводов с повышенными температурами – повышение нагрузочных потерь в линии [3].

Выводы

Система мероприятий по предотвращению и ликвидации гололедно-ветровых аварий, включает в себя: обследование технического состояния ВЛ и их элементов в процессе эксплуатации и после повреждений; реконструкцию и техническое перевооружение физически изношенного и морально устаревшего оборудования; внедрение систем управления технологическими активами; использование автоматизированных систем управления в распределительных сетях; применение автономных источников питания и накопителей электроэнергии; промышленное освоение оборудования ВЛ с повышенной стойкостью к гололедно-ветровым воздействиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. «Ледяной дождь» не страшен: 10 советов энергосетевым компаниям. Энергоэксперт. №1 (24) 2011. С.18-32. URL: <http://www.energyexpert.ru>
2. Техническое состояние электрических сетей России и перспективы их развития / Ю. В. Лебедева, Н. Ю. Шевченко, К. Н. Бахтиаров // Современные проблемы науки и об-

разования. – 2013.-№4. URL: <http://www.science-education.ru/110-9808>.

3. Мероприятия по снижению гололедно-ветровых аварий в электрических сетях / М. В. Панасенко, Н. Ю. Шевченко, Н. П. Хромов, А. Г. Сошинов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 8. – С. 30–37.

4. Сравнительный анализ аккумуляторных и емкостных накопителей электроэнергии как элемента питания устройств информационно-измерительных систем мониторинга воздушных линий электропередачи / М. В. Панасенко, О. О. Ахмедова, Г. Г. Угаров // Ресурсно-энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов: Вторая Всероссийская научно-практическая конференция 23–26 сентября 2008 / филиал Московского энергетического института в г. Волжском. – Волжский, 2008. – С.63–66.

5. Власов, В. В. Опыт разработки, изготовления и проведения испытаний легких одноцепных промежуточных опор из композиционных материалов для высоковольтных линий 110–220 кВ для проведения аварийно-восстановительных работ и применения в труднодоступной местности / В. В. Власов, В. М. Сухар // Воздушные линии. – 2012. – № 4 – С. 25–36.

6. Современные системы мониторинга воздушных линий электропередачи / М. В. Панасенко, Н. П. Хромов // Электроэнергетика глазами молодежи : сб. науч. тр. IV междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 14–18 окт. 2013 г. : Т. 1 / Южно-Российский гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М. И. Платова. — Новочеркасск, 2013. – С. 529–532.

УДК 621.316.925.1

Е. И. Кирюхина, А. А. Шилин

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: shilin.jr@gmail.com

В статье представлен способ реализации релейной защиты линий электропередач с применением нейросети. Предлагается для настройки системы релейной защиты использовать аппарат искусственных нейронных сетей и выстраивать уставку на основе данных эксплуатации.

Ключевые слова: релейная защита, искусственная нейронная сеть, линии электропередачи, аварийные режимы.

E. I. Kiryukhina, A. A. Shilin

SMART RELAY PROTECTION OF POWER SUPPLY SYSTEMS

Volgograd State Technical University

The article presents a method for implementing relay protection of power lines using a neural network. It is proposed to use the device of artificial neural networks to set the relay protection system and to set the setpoint based on the operation data.

Keywords: relay protection, artificial neural network, power lines, emergency modes.

Самым ненадежным элементом систем электроснабжения являются линии электропередачи (ЛЭП) из-за их большой протяженности и влияния на них большого числа различных внешних воздействий. В городских сетях около 85 % отключений приходится на долю ЛЭП, а в сельских

сетях – 90–95 %. Отказом ЛЭП называется всякое вынужденное отключение при ее повреждениях. Причинами аварий могут быть природные условия, а также человеческий фактор [1].

Основным видом повреждений линий являются короткие замыкания (КЗ). Наиболее час-

то встречаются однофазные замыкания на землю. На их долю приходится до 65 % общего числа замыканий [2]. Трехфазное КЗ – наиболее распространенный вид повреждения, вызывающий появление наибольших токов КЗ. Поэтому трехфазное КЗ является расчетным при определении максимального тока КЗ.

На возникновение повреждений реагирует релейная защита (РЗ), которая выявляет их и действует на отключение. Таким образом, РЗ является основным видом электрической автоматики, без которой невозможна нормальная работа энергосистем и электрических сетей.

Далеко не все величины, характеризующие поведение релейной защиты, могут быть точно определены. Большинство из них являются случайными, т. е. изменяющимися от случая к случаю. Например, максимальный и минимальный расчетные токи короткого замыкания зависят от сопротивления участка линии до точки КЗ, которое в свою очередь является функцией различных факторов, таких как температура провода, погодные условия, время года, сопротивление грунта, величина нагрузки и т. д. В результате в процесс функционирования защиты вводится элемент неопределенности: иногда она ведет себя не так, как того ожидает обслуживающий персонал, вследствие чего и возникают отказы в функционировании.

Исходя из этого, уставки устройств РЗ не всегда удовлетворяют необходимым требованиям, поскольку в реальных устройствах ток срабатывания реле задается жестко, т. е. непосредственно по расчетным формулам. Для того чтобы повысить чувствительность РЗ, предлагается ввести элемент искусственной нейронной сети (ИНС).

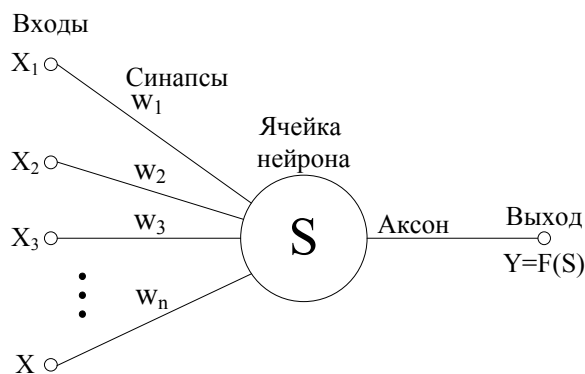


Рис. 1. Модель нейрона

Основу нейронной сети составляет нейрон (рис. 1) – элемент, который имитирует работу

нейронов мозга. Нейрон характеризуется своим состоянием и, по аналогии с реальным нейроном, может быть либо возбужден, либо заторможен. Как видно, у нейрона есть входы (синапсы), которые соединены с выходами других нейронов, и есть выход (аксон), сигнал с которого поступает на синапсы других нейронов. Каждый синапс характеризуется величиной синаптической связи – ее также называют весом w_i . Состояние нейрона определяется как сумма состояний его входов. Как видно из рис. 3, значение на входе синапса умножается на вес данного синапса, затем все эти значения суммируются и получается текущее состояние нейрона. Значение на выходе нейрона – это функция от его состояния.

Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения – одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что в случае успешного обучения сеть сможет выдать верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также при неполных и/или «зашумленных», частично искаженных данных [3].

Наиболее простой и распространенной, но, тем не менее, способной решать широкий круг задач является топология сети, называемая однослойным перцептроном. Он довольно прост в реализации и обучении и довольно востребован в задачах классификации. Важнейшая особенность сети, свидетельствующая о ее широких возможностях и огромном потенциале, состоит в параллельной обработке информации всеми звеньями.

Другое не менее важное свойство – способность к обучению и обобщению накопленных знаний. Можно выделить два подхода: обучение с учителем и обучение без учителя. При обучении с учителем предполагается, что, помимо входных сигналов, составляющих вектор x , известны также и ожидаемые выходные сигналы нейрона d_k , составляющие вектор d (рис. 2). В подобной ситуации подбор весовых коэффициентов должен быть организован так, чтобы фактические выходные сигналы нейрона y_k принимали бы значения, как можно более

близкие к ожидаемым значениям d_k . Ключевым моментом процесса обучения с учителем является знание ожидаемых значений d_k выходного сигнала нейрона. Таким образом, фактический

выходной сигнал сравнивается с желаемым откликом, в результате чего получаем сигнал ошибки (1) [3]:

$$e_k(n) = d_k(n) - y_k(n). \quad (1)$$

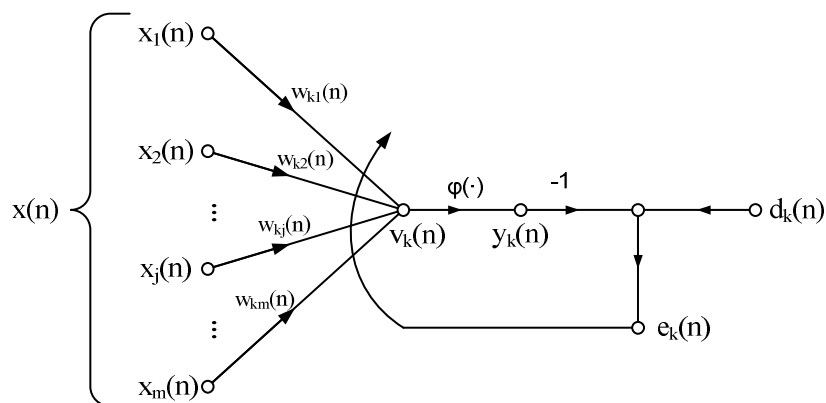


Рис. 2. Граф нейрона

Сигнал ошибки инициализирует механизм управления, цель которого заключается в применении последовательности корректировок к синаптическим весам нейрона. Эти изменения нацелены на пошаговое изменение выходного сигнала к желаемому. Эта цель достигается за счет минимизации индекса производительности, определяемый в терминах сигнала ошибки следующим образом (2):

$$E(n) = \frac{1}{2} e_k^2(n), \quad (2)$$

где $E(n)$ – текущее значение энергии ошибки. Пошаговая корректировка синаптических весов нейрона продолжается до тех пор, пока система не достигнет устойчивого состояния, т. е. такого, при котором синаптические веса практически стабилизируются. В этой точке процесс обучения останавливается. Другими словами, корректировка, применяемая к синаптическому весу нейрона, пропорциональна изменению сигнала ошибки на входной сигнал его вызвавший.

К широким прикладным возможностям нейронных сетей следует отнести и способность к решению задач прогнозирования, т. е. предсказания будущей реакции системы по ее предшествующему поведению. Накапливая статистические данные, включающие в себя информацию о времени, координатах, погодных условиях, сопутствующих возникновению

аварийных режимов ВЛЭП или их исключаящих, нейронная сеть вырабатывает решение, каким будет наиболее вероятное состояние линии. Сравнивая после этого прогноз и реальное состояние системы, ИНС определяет погрешность прогнозирования и использует это значение для дальнейшей адаптации весовых коэффициентов, т. е. изменения силы синаптических связей между нейронами.

Чаще всего для задач прогнозирования используется нейронная сеть в виде персептрона с одним скрытым слоем и сигмоидальной функцией активации. Один из популярных вариантов аппаратной реализации нейронных сетей заключается в использовании для этой цели сигнальных процессоров. Моделирование нейронных сетей на сигнальных процессорах осуществляется программным способом, что позволяет в случае необходимости легко модифицировать используемый алгоритм и структуру сети.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анищенко, В. А. Надежность систем электроснабжения : учеб. пособие / В. А. Анищенко. – Мн. : УП «Технопринт», 2001. – 160 с.
2. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита [Текст] / Э. М. Шнеерсон. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
3. Ясницкий, Л. Н. Введение в искусственный интеллект : учеб. пособие / Л. Н. Ясницкий. – М. : Академия, 2008. – 176 с.

УДК 620.9

Н. С. Артюшенко, Д. Н. Авдеюк

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПАРАМЕТРЫ ЛИНИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ЛОКАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: Artex23@yandex.ru

В статье приведен анализ влияния факторов окружающей среды (температура, гололедная муфта) на параметры линии при определении места повреждения линии электропередачи с помощью рефлектометра. Полученные функциональные зависимости погрешностей от величин внешних климатических факторов могут быть использованы для автоматической коррекции методической погрешности.

Ключевые слова: линии с распределенными параметрами, удельные параметра линии, рефлектометр, локационный метод.

N. S. Artyushenko, D. N. Avdeyuk

INVESTIGATION OF ENVIRONMENTAL INFLUENCE ON THE LINE PARAMETERS DETERMINING THE PLACE OF DAMAGE TO THE ELECTRIC TRANSMISSION LINE BY THE LOCATION METHOD

Volgograd State Technical University

The article analyzes the influence of environmental factors (temperature, glaze clutch) on the parameters of the environmental line in determining the fault location of the transmission line using a reflectometer. The obtained functional dependences of errors on the values of external climatic factors can be used to automatically correct the methodical error.

Keywords: Lines with distributed parameters, specific line parameters, reflectometer, location method.

В любом рефлектометре перед измерением расстояния нужно установить коэффициент укорочения. Точность измерения расстояния до места повреждения зависит от правильной установки коэффициента укорочения. Короткие импульсные сигналы, используемые при методе импульсной рефлектометрии, распространяются в разных линиях с разной скоростью. Упрощенно можно считать, что эта скорость очень близка к скорости света в вакууме, но в действительности эта скорость зависит от удельных параметров линии, которые, в свою очередь, изменяются от температуры и образования гололедной муфты. Поэтому был проведен анализ изменения параметров линии электропередачи при изменении температуры окружающей среды.

Удлинение и провисание провода при изменении температуры и удельной нагрузки

Свободно подвешенный провод сохраняет данные ему при монтаже натяжение и стрелу провеса лишь до тех пор, пока не изменятся атмосферные условия, которые были при монтаже. С изменением температуры окружающего воздуха или изменением температуры самого провода вследствие уменьшения или увеличе-

ния протекающего по нему тока, а также при появлении дополнительных нагрузок от гололеда и ветра изменяются длина провода, его натяжение и стрелы провеса (рис. 1).

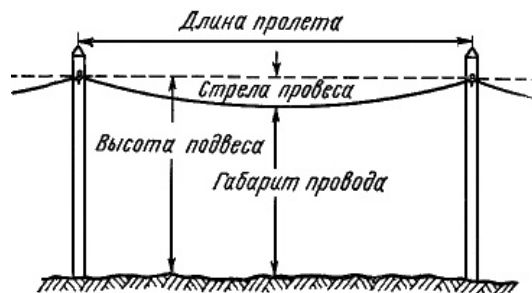


Рис. 1. Линия электропередач

Зададим параметры *исходного* режима (удельная нагрузка от собственного веса провода $\gamma_u = \gamma_{np}$ [кг/(м·мм²)], средняя температура провода в нормальном режиме работы $t_u = 20$ °С ($\approx$ средняя температура окружающей среды), расстояние от провода до земли (габарит) $\Gamma_u = 7,7$ м), высота подвеса провода $H = 8$ м и определим провисание провода при изменении температуры и удельной нагрузки на примере провода АС 70/11, при изменении температуры t от -40 до +40 °С.

Удельная нагрузка от собственного веса провода [1]:

$$\gamma_{np} = \frac{G}{S} \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где G – масса 1 км провода, кг; S – сечение провода, мм².

Длина провода в пролете [1]:

$$L = l + \frac{8 \cdot f^2}{3 \cdot l}, \quad (2)$$

где l – длина пролета, м; $f=H-G$ – стрела провеса провода, м.

Механическое напряжение в материале провода σ , кг/мм² [1]:

$$f = \frac{\gamma \cdot l^2}{8 \cdot \sigma} \Rightarrow \sigma = \frac{\gamma \cdot l^2}{8 \cdot f}. \quad (3)$$

В расчетном режиме (параметры с индексом «р») на проводе образуется гололедная муфта радиусом b [мм], а также возможно изменение температуры провода ($t_p \neq t_u$).

Удельная нагрузка от собственного веса провода, покрытого гололедом:

$$\gamma_p = \gamma_{np} + \gamma_{zm}, \quad (4)$$

где γ_{zm} – удельная нагрузка от веса гололедной муфты.

Удельная нагрузка от веса гололедной муфты [1]:

$$\gamma_{zm} = 2,83 \frac{b \cdot (d + b)}{S} \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где d – диаметр провода, мм.

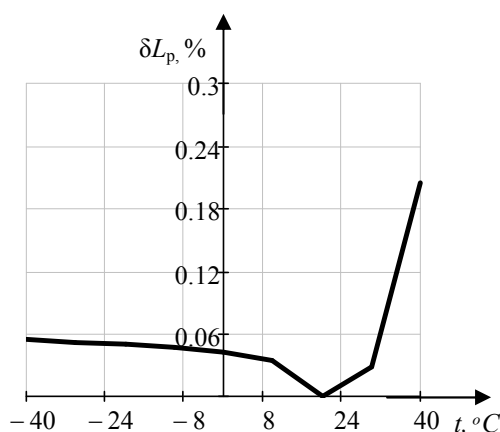


Рис. 2. Относительная погрешность длины провода в пролете с учетом гололедной нагрузки от изменения температуры

Уравнение состояния провода (связывающее параметры исходного и расчетного режимов) [1]:

$$\sigma_p - \frac{\gamma_p^2 \cdot l^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_p^2} = \sigma_u - \frac{\gamma_u^2 \cdot l^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_u^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_p - t_u), \quad (6)$$

где α – температурный коэффициент линейного удлинения, 1/°C; E – модуль Юнга, кг/мм².

Решаем (6) в Mathcad (с помощью оператора polyroots) относительно σ_p , после чего, используя (3), находим стрелу провеса f_p (и соответственно значение габарита L_p).

С помощью (2) вычисляем длину провода L_p в пролете с учетом гололедной нагрузки и изменения температуры (рис. 2).

Изменение погонного активного сопротивления при нагреве и удлинении провода

Изменение удельного активного сопротивления при отклонении температуры t относительно 20 °C [2]:

$$r'_0 = r_0^{20} [1 + \alpha(t - 20)], \quad (7)$$

где r_0^{20} – нормативное значение сопротивления при 20 °C; α – температурный коэффициент электрического сопротивления (для сталеалюминевых проводов 0,00403 Ом/град).

Считая, что длина ЛЭП при обледенении не изменится, погонное сопротивление при удлинении провода в пролете (в расчетном режиме) составит (рис. 3):

$$r_{0(p)} = r_{0(u)} \cdot \frac{L_p}{L_u}. \quad (8)$$

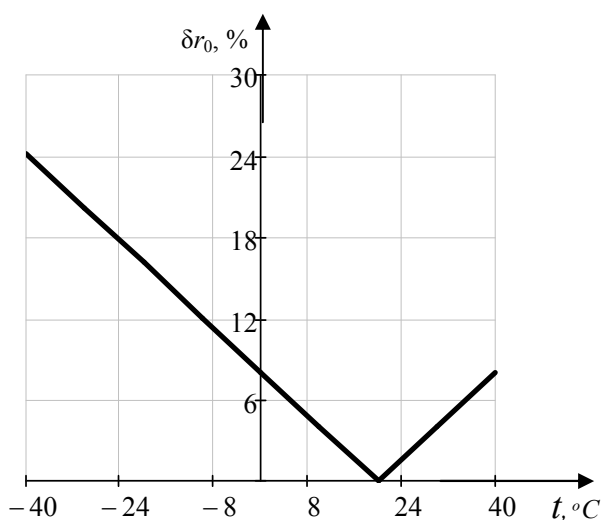


Рис. 3. Относительная погрешность удельного активного сопротивления при отклонении температуры t относительно 20 °C

Изменение погонной емкостной проводимости

В соответствии с теорией Дебая действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ' и ϵ'' соответственно) рассчитываются по формулам [3, 4]:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau_p)^2}, \quad (9)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau_p}{1 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau_p)^2}, \quad (10)$$

где ε_{∞} – относительная диэлектрическая проницаемость льда на высоких частотах (3,1); ε_s –

относительная диэлектрическая проницаемость на низких частотах; f – частота электромагнитного поля, Гц; τ_p – время релаксации диэлектрической проницаемости, с.

Эмпирическая зависимость относительной диэлектрической проницаемости льда при постоянном электрическом поле от температуры льда T , К [3]:

$$\varepsilon_s = 1982,084329 - 22,098339 \cdot T + 0,087238 \cdot T^2 - 1,1596 \cdot 10^{-4} \cdot T^3. \quad (11)$$

Эмпирическая зависимость времени релаксации диэлектрической проницаемости от температуры льда [3]:

$$\tau_p = 53258,81606 \cdot \exp(0,077697 \cdot T - 1,1187 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 1,9937 \cdot 10^{-6} \cdot T^3). \quad (12)$$

Удельная емкость гололедной муфты (в виде цилиндрического конденсатора) [5]:

$$C_{зм} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon' \cdot \varepsilon_0}{\ln\left(\frac{2 \cdot b}{d}\right)}, \quad (13)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная ($8,854 \times 10^{-12}$ Ф/м); b – радиус гололедной муфты, мм; d – диаметр провода, мм.

С целью уточнения расчета целесообразно провисающий в пролете провод заменить эквивалентным по своему электростатическому влиянию прямолинейным проводом. Высота эквивалентного провода (в расчетном режиме) составит [6]:

$$h_3 = H \cdot \exp\left(-0,67 \cdot \frac{f_p}{H}\right), \quad (14)$$

где H – высота подвеса реального провода на опоре, м; f_p – стрела провеса провода в расчетном режиме (*стрела провеса удлинённого под действием нагрузки и температуры провода*), м.

Емкость подвешенного в воздухе на высоте h_3 провода [5]:

$$C_{np} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\ln\left(\frac{4 \cdot h_3}{d}\right)}. \quad (15)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха (≈ 1).

Удельная емкость оледенелой фазы [5]:

$$C_0 = \frac{C_{зм} \cdot C_{np}}{C_{зм} + C_{np}}, \quad (16)$$

или с учетом (4), (5) (рис. 4)

$$C_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon' \cdot \varepsilon_0}{\varepsilon' \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot h_3}{d}\right) + \varepsilon \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot b}{d}\right)}. \quad (17)$$

Погонная емкостная проводимость [2]:

$$b_0 = \omega \cdot C_0, \quad (18)$$

где ω – циклическая частота поля, рад/с.

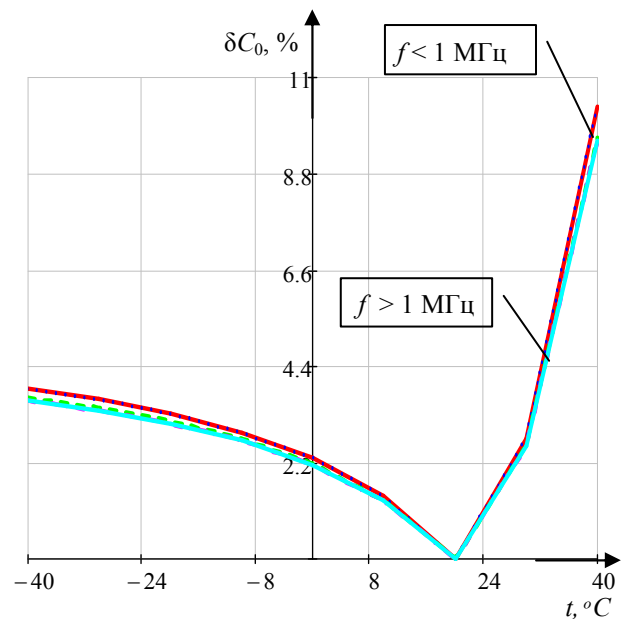


Рис. 4. Относительная погрешность удельной емкости от изменения температуры при различных частотах

Изменение погонной активной проводимости

Тангенс угла диэлектрических потерь в ледовой оболочке [4]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (19)$$

Погонная активная проводимость фазы (рис. 5) [2]:

$$g_0 = b_0 \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (20)$$

Из анализа математических моделей с распределенными параметрами следует, что отклонение параметров линии из-за влияния

внешних факторов является источником погрешностей определения места аварии с помощью рефлектометра.

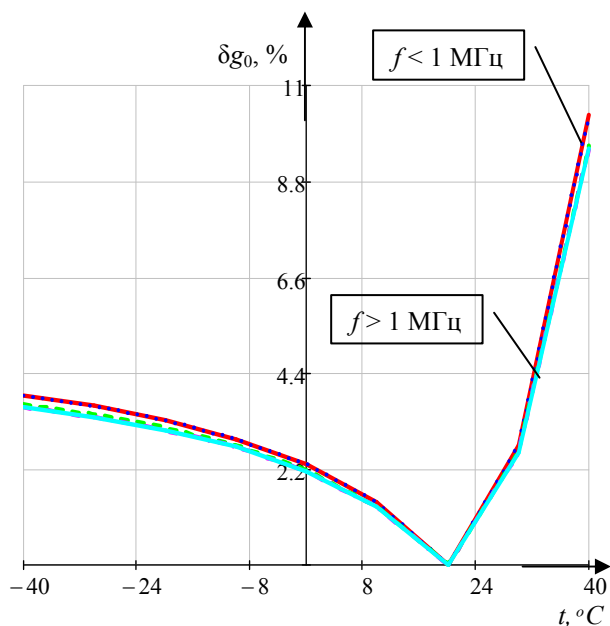


Рис. 5. Относительная погрешность активной проводимости от изменения температуры при различных частотах

Полученные функциональные зависимости погрешностей от величин внешних климатиче-

ских факторов могут быть использованы для автоматической коррекции методической погрешности.

Для реализации автоматической коррекции необходимо измерять температуру внешней среды, толщину гололедной муфты на проводах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глазунов, А. А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. В 2 т. Т. 1. Работа и расчет проводов и тросов / А. А. Глазунов. – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1956. – 192 с.
2. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 715 с.
3. Диэлектрические свойства воды и льда [Электронный ресурс] // Лаборатория метеотехнологий. – Режим доступа: <http://meteolab.ru/projects/dielectric/>. – (Дата обращения: 03.04.2017).
4. Щербаченко, Л. А. Исследование комплексной диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков при радиочастотах: метод. рек-ция / Л. А. Щербаченко, В. А. Карнаков, С. Д. Марчук. – Иркутск : ИГУ, 2005. – 15 с.
5. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 3 / К. С. Демирчян [и др.]. – СПб. : Питер, 2004. – 377 с.
6. Юренков, В. Д. Антенный емкостный отбор энергии от линий электропередачи / В. Д. Юренков // Электричество. – 1952. – № 7. – С. 32–40.

УДК 621.315.17

С. С. Дементьев

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОКОМПЬЮТЕРА

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: c165tc34@yandex.ru

Точное определение места повреждения (ОМП) на воздушных линиях электропередачи является залогом быстрого восстановления электроснабжения. Для решения этой задачи предлагается новая методика дистанционного ОМП с онлайн-коррекцией погонных параметров линии и применением нейрокомпьютера. Использование искусственной нейронной сети позволяет создать систему, устойчивую к ошибкам в исходной информации. В статье рассматриваются основные элементы подобной системы и алгоритм ее функционирования.

Ключевые слова: интеллектуальные сети, мониторинг ЛЭП, нейрокомпьютер, определение мест коротких замыканий.

S. S. Dementyev

DIAGNOSTICS OF THE OVERHEAD POWER LINE CONDITION WITH THE USE OF A NEUROCOMPUTER

Volgograd State Technical University

The accurate location of the damage (LD) on overhead power lines is the key to a rapid restoration of electricity supply. To solve this problem, we propose a new technique for remote LD with online correction of line parameters and the use of a neurocomputer. Using an artificial neural network allows to create a system that is resistant to errors in the source information. The article considers the main elements of the system and the algorithm of its functioning.

Keywords: smart grids, OHL monitoring, neurocomputer, location of short circuits.

Аварии на воздушных линиях электропередачи (ВЛЭП) являются главным препятствием на пути к обеспечению бесперебойного электроснабжения потребителей. В России проблема низкой надежности ВЛЭП особенно актуальна по причине значительной протяженности и радиально-магистрального построения сетей, а также ввиду сильной изношенности самих линий [4]. При этом очевидные шаги по реконструкции сетей путем замены и упрочнения конструктивных элементов ВЛЭП требуют значительных капиталовложений и времени, вследствие чего более насущной выглядит задача «интеллектуализации» существующих сетей, а именно внедрения компьютеризированных систем для непрерывной диагностики состояния линий и своевременного определения места повреждения (ОМП) при аварии.

На сегодняшний день подавляющее большинство средств мониторинга ВЛЭП реализуют топографические и дистанционные методы ОМП, подразумевающие соответственно размещение отдельных сенсоров аварийных режимов на линии и подключение к одному из участков электропередачи для локализации повреждения по параметрам переходного процесса [3]. Недостатком систем первого типа является необходимость монтажа, наладки и обслуживания большого числа линейных датчиков, в свою очередь устройства дистанционного ОМП отличаются

низкой точностью по причине непостоянства и неоднородности параметров линии.

Также следует заметить, что функционал перечисленных технических решений ограничивается лишь диагностированием возникших неисправностей, в то время как контроль предаварийных режимов, вызванных механическим (гололедно-ветровым) воздействием окружающей среды, остается недоступным.

Данная статья иллюстрирует новую модификацию дистанционного метода ОМП, подразумевающую обучение искусственной нейронной сети распознаванию аварийных режимов и одновременную коррекцию параметров линии с учетом текущего метеовоздействия.

Благодаря особой «гибкости» нейронных сетей при обработке информации, возможности использование любых, как высоко коррелирующих, так и независимых данных в качестве входных параметров, устойчивости к ошибкам в репрезентативной «учебной» выборке и высокой скорости обучения, можно сказать, что производительность нейросетевой архитектуры откроет новые возможности при осуществлении диагностики воздушных линий.

Техническая реализация и алгоритм мониторинга неисправностей

Предлагаемая система для диагностики состояния ВЛЭП (рис. 1) содержит следующие основные элементы:

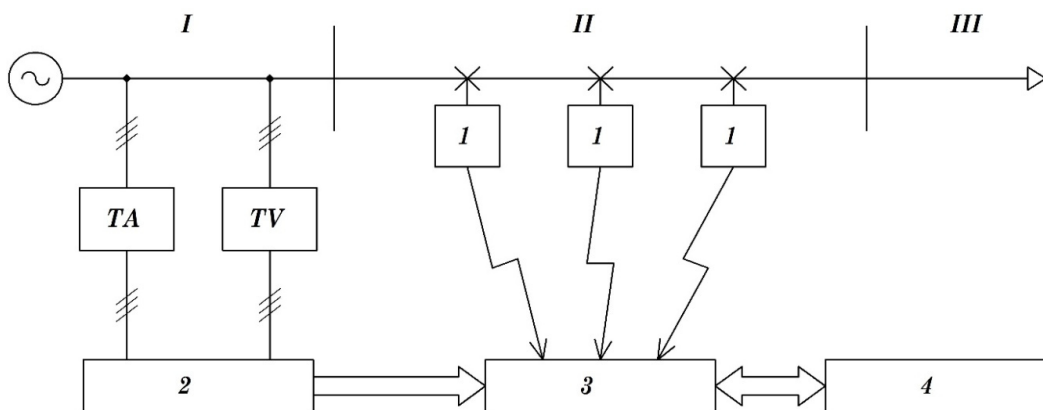


Рис. 1. Система локализации и классификации повреждений на ВЛЭП:

1 – смарт-опора; 2 – аналого-цифровой преобразователь; 3 – хост-ЭВМ; 4 – нейрокомпьютер;
ТА, ТВ – измерительные трансформаторы тока (А) и напряжения (В)

• **Смарт-опора** – «умная» опора [5], выполняющая функцию терминала для сбора данных о нагреве, оледенении и провисании проводов, а также контроля климатических условий на трассе линии (участок II). Смарт-опора (рис. 2) включает в себя оптические метки 1 положения

фаз, камеру видеонаблюдения 2 и датчик температуры провода 3.

Выполняемые с заданными промежутками времени видеоизмерения стрел провеса f (габарита Γ до земли) и мониторинг температурной деформации проводов позволяют с высокой

достоверностью определять величину гололедных отложений, что делает возможным непрерывный перерасчет продольных и поперечных погонных параметров линии с учетом изменения метеонагрузок.

Размещение измерительного оборудования

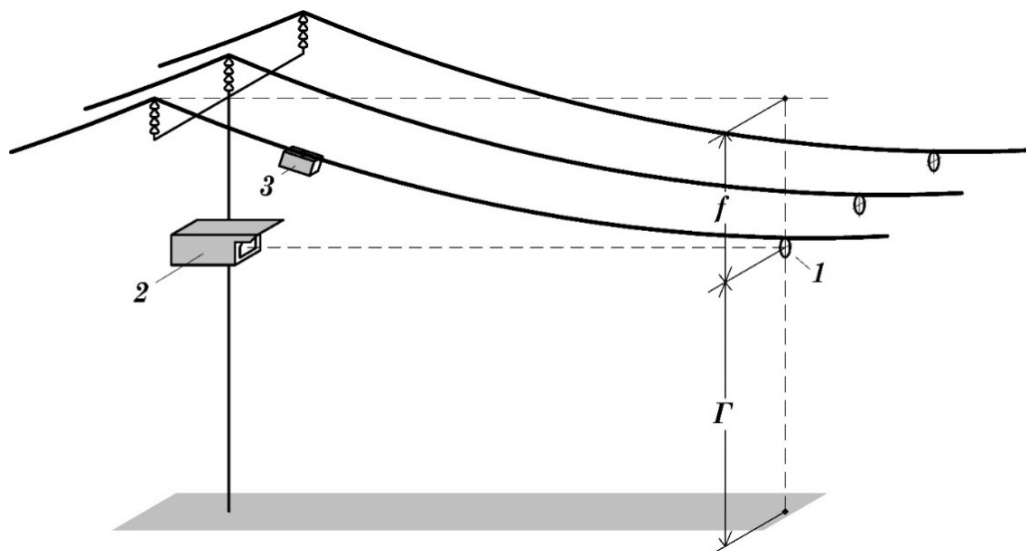


Рис. 2. Смарт-опора ВЛЭП

Помимо этого, мониторинг гололедообразования на линии способствует осуществлению *прогнозирования* неисправностей, что открывает возможности для своевременного принятия мер (плавки отложений) по недопущению аварийных отключений.

• **Хост-ЭВМ** – главный (ведущий) компьютер, объединяющий размещаемые на линии терминалы смарт-опор в сеть передачи данных о состоянии ВЛЭП. С учетом информации от «умных» опор хранящиеся в памяти ЭВМ сведения о рельефе местности, грунтах и параметрах пролетов на всем протяжении линии позволят автоматически вычислять погонные характеристики ВЛЭП на различных больших и малых участках трассы, благодаря чему цепная схема замещения линии будет включать в себя множество отрезков.

Заметим, что результатом применения дистанционного метода ОМП является длина проводника до места аварии, но не дистанция до повреждения, так как ввиду провисания фазного провода его длина отличается от длины пролета. Таким образом, информация о гололедной нагрузке, нагреве проводов и сопутствующие данные о пролетах и рельефе позволяют более точно определять действительное расстояние до места аварии.

согласно рис. 2 на нескольких линейных опорах на всем протяжении трассы необходимо для более точного моделирования ВЛЭП, заключающегося в замене линии с распределенными параметрами на цепь из условно однородных участков.

• **Нейрокомпьютер** – реализованное на программном (виртуальный нейрокомпьютер) или аппаратном (на базе нейроплат для ЭВМ) уровнях вычислительное устройство, воспроизводящее принципы организации и алгоритмы обработки информации, присущие биологическим нервным системам. Имитируя низкоуровневую структуру мозга, искусственная нейросеть (ИНС) также обладает способностью к обобщению полученных в результате «обучения» данных [4].

Предлагаемая система локализации и классификации повреждений на ВЛЭП (рис. 1) функционирует следующим образом.

ШАГ 1. Опрос периферийных терминалов («умных» опор) для сбора информации о текущем состоянии линии (гололедообразовании и нагреве).

ШАГ 2. Компиляция расчетной схемы ВЛЭП с учетом полученных данных, а также предварительно загруженных в память компьютера топографических сведений и информации о характеристиках пролетов (длина, наличие опор разной геометрии и опор с повышающими вставками, параллельное близкое прохождение соседних высоковольтных линий и т. д.). С учетом всего перечисленного каждый из множества блоков (рис. 3 [2]) цепной схемы замещения линии будет

обладать отличающимися собственными (с одичным индексом) и взаимными (с двойным индексом) сопротивлениями R , индуктивностями L , а также емкостными B и активными G проводимостями (являющихся наиболее «чувствительными» к оледенению проводов параметрами).

ШАГ 3. Моделирование возможных аварийных режимов (однофазное короткое замы-

кание (1Ф КЗ) в результате обрыва провода, 2Ф КЗ при схлестывании проводов (например, в случае неравномерного сброса снега и льда с проводов разных ярусов), 2Ф КЗ с замыканием на землю, 3Ф КЗ) на различном удалении от передающего конца сети (участок I на рис. 1). Целью данного этапа является формирование «учебника» для нейронной сети.

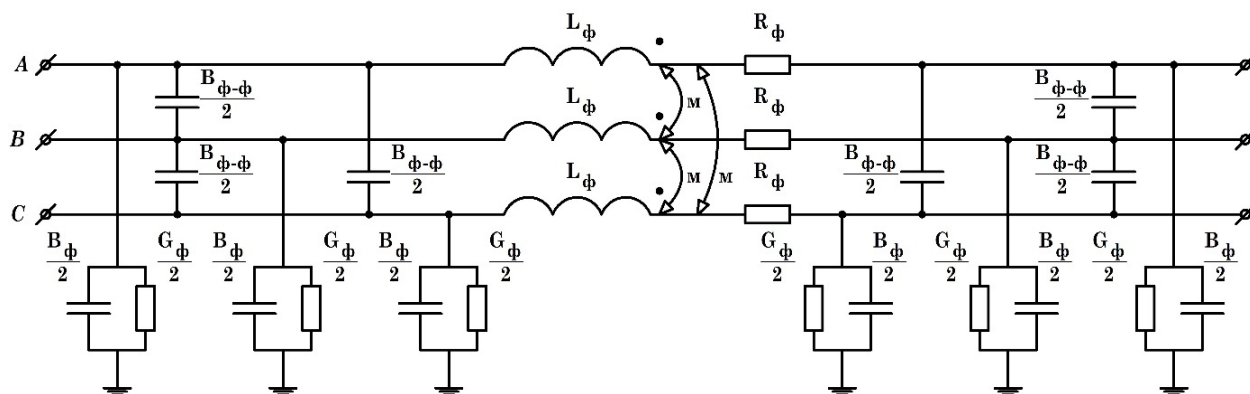


Рис. 3. П-образная схема замещения участка ВЛЭП

Очевидно, что с увеличением расстояния до места аварии x сигналы тока I и напряжения U , регистрируемые на передающем конце электрической сети, также изменяются. Зависимости $I(x)$, $U(x)$, продемонстрированные на рис. 4, были получены путем моделирования с использованием Simulink аварийных ситуаций (замыкание фазы А на землю G (А-Г), А-В, А-В-Г, А-В-С) на ВЛЭП 110 кВ длиной 60 км, выполненной проводом АС-150/24 с номинальным габаритом до земли и свободном от гололеда, на

опорах ПМ110-1 без грозозащитного троса и проходящей по местности с идеально ровным рельефом, а также равномерно и одинаково увлажненной почвой. Перечисленные допущения позволили использовать в качестве модели трехфазной ВЛЭП лишь один π -блок из библиотеки SimPowerSystems (рис. 5). При этом, как отмечалось выше, в случае моделирования неоднородной (реальной) линии ее схема замещения будет представлять собой цепь из множества π -блоков.

ШАГ 4. Обучение нейрокompьютера.

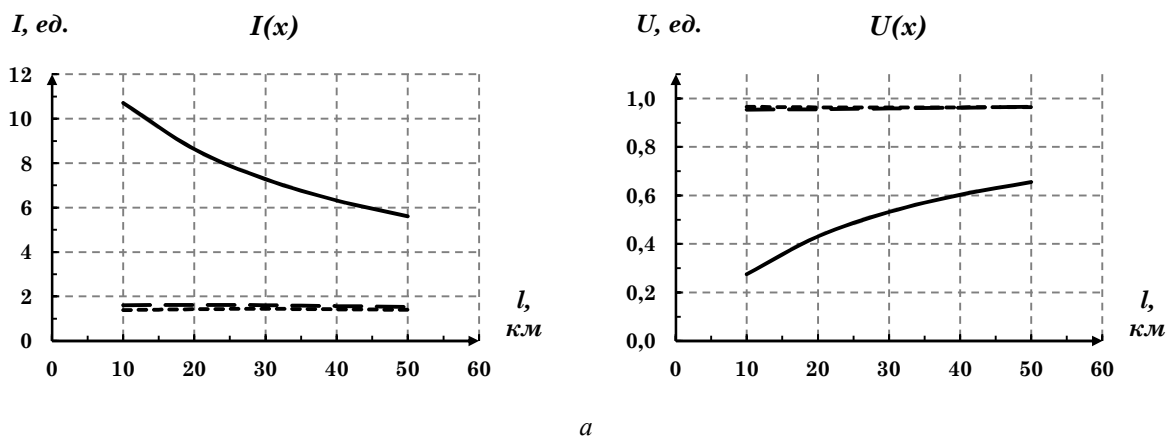


Рис. 4. Зависимость регистрируемых тока и напряжения от расстояния до места аварии (в ед. от ном. значений): а – А-Г, б – А-В, в – А-В-Г, г – А-В-С (спл. – ф. А, кор. штр. – ф. В, длин. штр. – ф. С) (см. также с. 25)

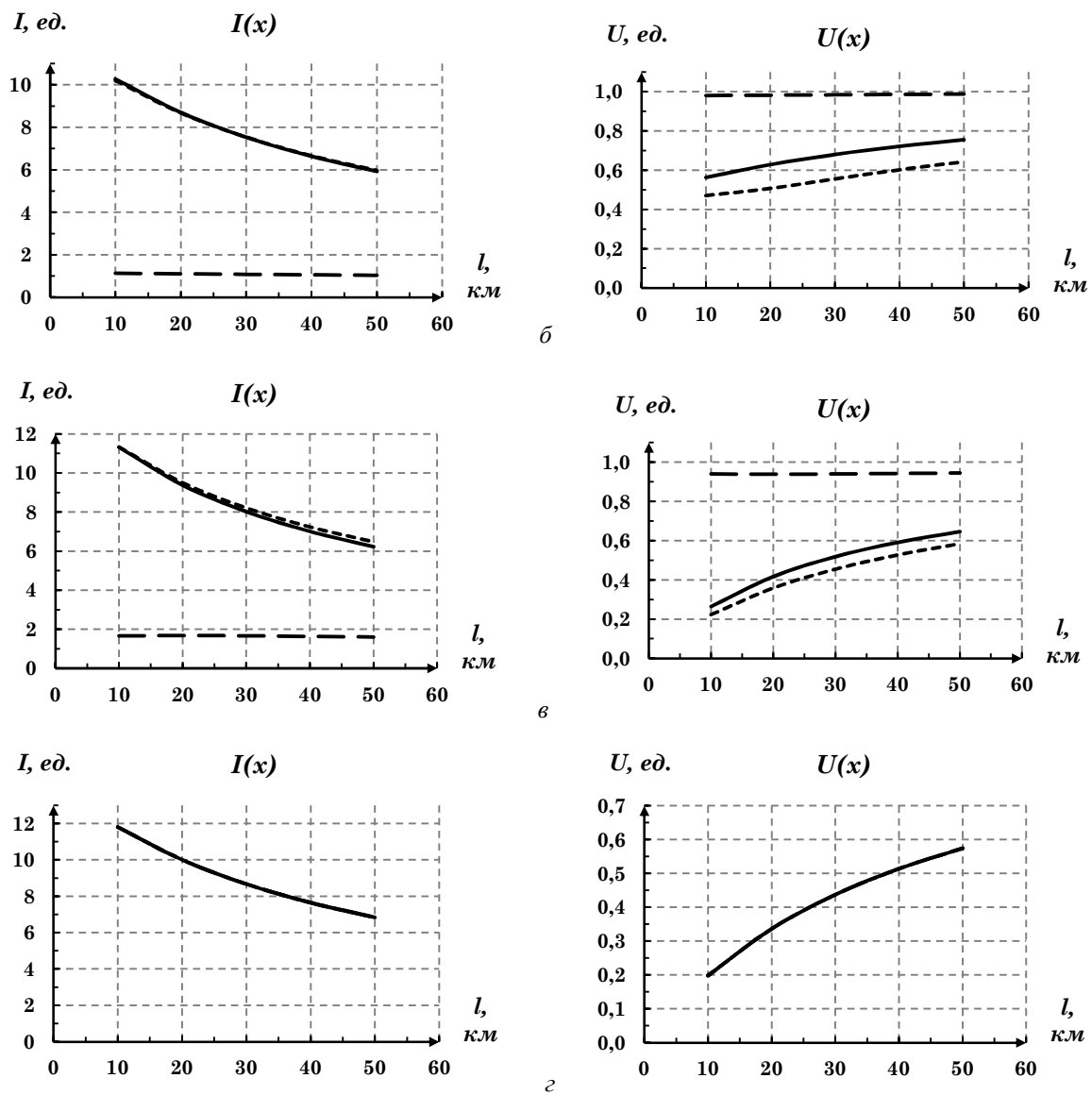


Рис. 4. Окончание

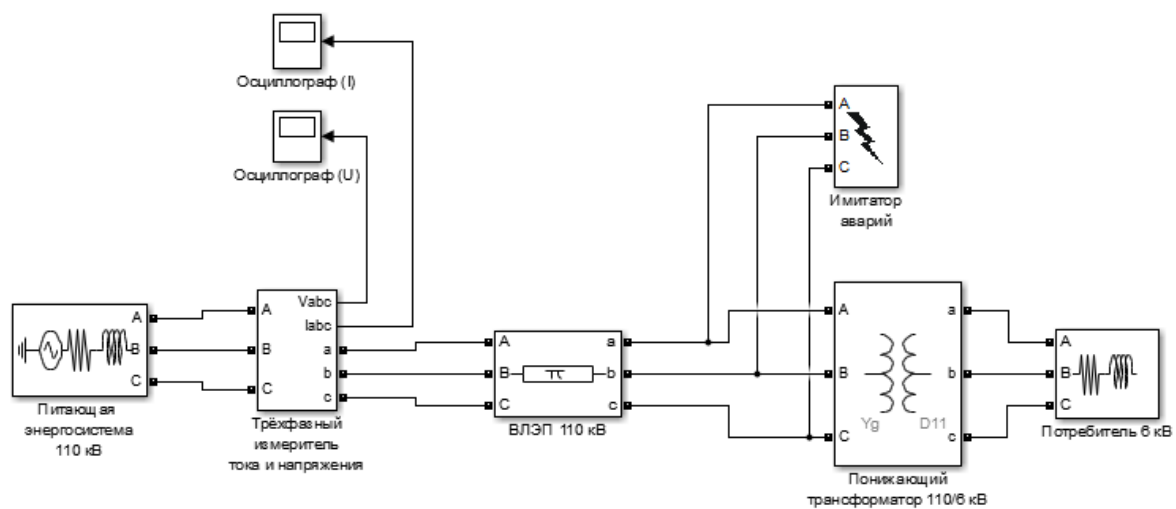


Рис. 5. Simulink-модель электрической сети

В данном случае искусственная нейронная сеть может иметь персептронную архитектуру с n -м количеством скрытых слоев (рис. 6).

Как видно из рисунка, анализ сигналов напряжения и тока на линии требует наличия шести нейронов входного слоя, тогда как классификация аварии и определение дистанции до повреждения требует четырех выходных нейронов (три нейрона кодируют тип аварии (000 – отсутствие повреждений, 001 – 1Ф КЗ, 010 – 2Ф КЗ, 011 – 2Ф КЗ на землю, 100 – 3Ф КЗ), а четвертый – указывает расстояние x до неисправности).

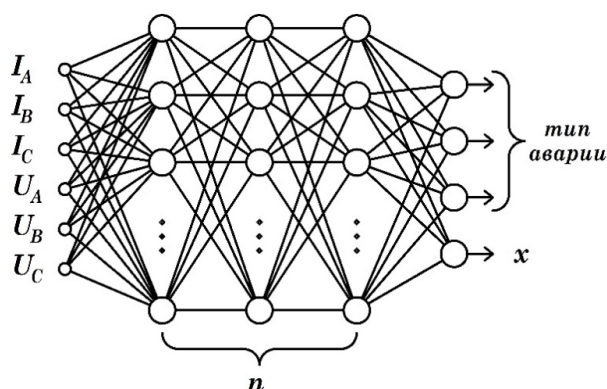


Рис. 6. Нейронная сеть для классификации аварий и ОМП

На этапе обучения происходит вычисление синаптических весов нейронной сети. Для каждого набора входных параметров (сигналов тока и напряжения) из обучающей выборки («учебника») известно требуемое значение выхода нейронной сети (трехзначный код повреждения и дистанция до места аварии). Этот процесс можно рассматривать как решение оптимизационной задачи. Ее целью является минимизация функции ошибки на обучающем множестве путем подбора значений синаптических весов [1].

ШАГ 5. Подача на вход нейронной сети реальных сигналов тока и напряжения на линии, классификация аварии и определение места по

вреждения с учетом рельефа местности и провисания проводов.

В заключение следует заметить, что на сегодняшний день практически не существует строгой теории синтеза искусственных нейронных сетей, вследствие чего нейрокомпьютер по-прежнему остается «черным ящиком». Количество слоев, число нейронов в каждом слое, тип активационной функции определяются исключительно эмпирически, путем многократного сравнения сетей различной архитектуры с целью оптимизации персептрона по таким параметрам как скорость и погрешность обучения [1].

Тем не менее отсутствие методики построения искусственных нейронных сетей не является препятствием к исследованию возможностей их применения для диагностики воздушных ЛЭП и других электроустановок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с.
2. Николаев, Р. Моделирование воздушной линии электропередачи в системе координат прямой, обратной и нулевой последовательности [Электронный ресурс] / Р. Николаев // Моделирование в электроэнергетике – Режим доступа: <http://simenergy.ru/simulation/modeling-primary/63-line-120-sequence>. – (Дата обращения: 02.05.2017).
3. Шилин, А. А. Анализ дистанционных методов определения мест повреждений линий электропередачи / А. А. Шилин, Н. С. Артюшенко // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2016. – № 3 (15). – С. 14–18.
4. Шилин, А. Н. Нейрокомпьютерная система диагностирования воздушных линий электропередачи / А. Н. Шилин, А. А. Шилин // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 3. – С. 68–72.
5. Шилин, А. А. «Умные» опоры воздушных линий электропередачи / А. А. Шилин, Н. С. Артюшенко, С. С. Деметьев // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: матер. III российской молодежной науч. школы-конф. (21–23 окт. 2014 г.) / Нац. исслед. Томский политехн. ун-т. – Томск, 2015. – С. 235–239.

УДК 621.315.175

*С. С. Дементьев***ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ВИДЕОИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ
ОЛЕДЕНЕНИЯ ЛЭП ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: c165tc34@yandex.ru

Диагностирование оледенения ЛЭП оптическим методом подразумевает контроль провисания проводов по данным видеонаблюдения. В статье рассматривается методика для расчета погрешности видеоизмерений, вызванной прогибами опор от ветровых нагрузок. Сделан вывод о необходимости мониторинга деформаций гибких опор, а также предложено устройство для коррекции возникающей методической погрешности.

Ключевые слова: интеллектуальные сети, мониторинг ЛЭП, видеоизмерения, диагностика гололедообразования.

*S. S. Dementyev***ESTIMATION OF THE VIDEO MEASUREMENTS ERROR
IN THE DIAGNOSIS OF OHL ICING BY THE OPTICAL METHOD****Volgograd State Technical University**

Diagnosis the line icing by the optical method means controlling the conductor sag according to the video surveillance data. The technique for calculating the video measurement error caused by tower deflections from wind loads is considered in the article. A conclusion on the need to monitor deformations of flexible towers is done, and a device to correct the emerging methodical error is proposed.

Keywords: smart grids, OHL monitoring, video measurements, icing diagnostics.

Одной из основных проблем развития современной электроэнергетики является повышение надежности энергообеспечения, а именно осуществление долгосрочного бесперебойного электроснабжения потребителей за счет минимизации риска аварий в передающей сети, наиболее уязвимым элементом которой остаются воздушные ЛЭП.

Согласно статистическим данным в более чем 50 % случаев причиной выхода из строя ЛЭП является оледенение фазных проводов [2], в связи с чем существует объективная потребность в оснащении линий устройствами диагностики гололедообразования. Использование сенсоров климатических нагрузок в качестве первичного источника информации о контролируемом участке линии станет одним из этапов построения «умных» сетей электроснабжения (*smart grids*) [8].

На сегодняшний день большинство устройств диагностики состояния ЛЭП реализуют тензометрические методы оценки оледенения и требуют значительного изменения изолирующих подвесок ввиду установки силоизмерительных датчиков [2]. Заметим, что более простые в осуществлении способы косвенного обнаружения гололедных отложений (локационным зондированием, измерением электриче-

ской емкости, использованием ультразвуковых клиренсометров и т. д. [6]) отличаются заведомо более низкими метрологическими характеристиками по причине трудно формализуемого возмущающего воздействия среды на чувствительные элементы устройств.

Резюмируя вышесказанное, можно констатировать, что наиболее перспективным способом диагностики оледенения ЛЭП является оптический метод [7], при этом практическая реализация данной технологии требует разработки соответствующей процедуры для оценки и при необходимости коррекции погрешности видеоизмерений.

Оценка методической погрешности

Описываемое в [7] оптико-электронное устройство для мониторинга гололедных нагрузок (рис. 1) включает в себя устанавливаемые на определенном удалении от начала пролета метки положения фаз 1, ПЗС-камеру 2 с лазерной или инфракрасной подсветкой, а также накладной датчик температуры провода 3.

Изменение провисания f провода (либо его габарита Γ над землей) свидетельствует о перегреве или оледенении линии и является универсальным диагностическим маркером ее состояния.

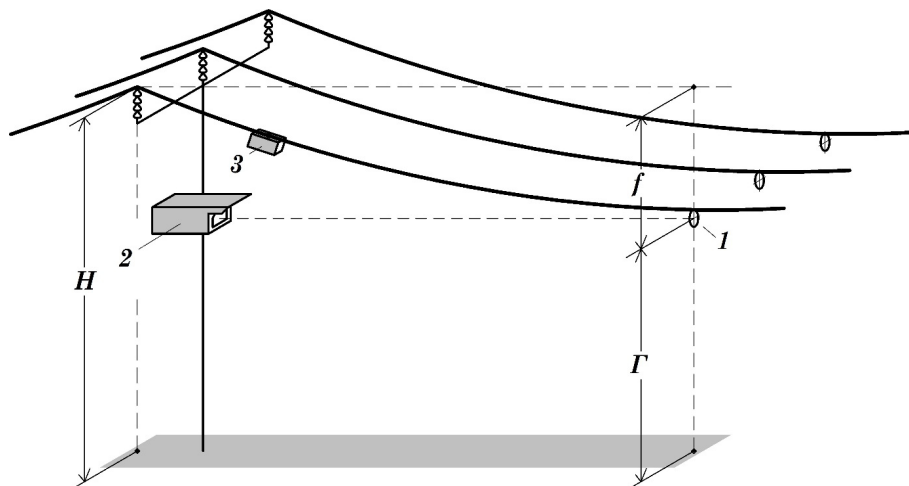


Рис. 1. Устройство видеомониторинга гололедных нагрузок

Стрела провеса фазы определяется очевидным выражением:

$$f = H - Y, \quad (1)$$

где H – высота подвеса провода, Y – его текущая ордината, регистрируемая видеосенсором посредством наблюдения за оптической меткой.

Также нетрудно убедиться, что прогиб стойки опоры под действием ветра и соответствующий поворот траверсы на некоторый угол α (рис. 2) приводит к искажению значения провисания, так как

$$f_{err} = f + \Delta H, \quad (2)$$

где ΔH – изменение высоты подвеса провода при изгибе опоры.

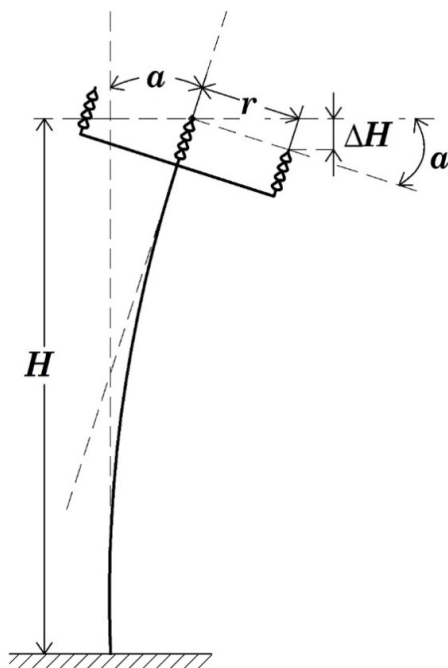


Рис. 2. Смещение точки подвеса провода при деформации опоры

Как видно, в данном случае увеличение стрелы провеса не связано с возрастанием гололедной массы и объясняется лишь прогибом стойки, являющимся, таким образом, источником методической погрешности.

Оценим влияние прогибов на величину погрешности видеоизмерений на примере наиболее «гибких» опор – композитных (например, ПК-35). Для этого необходимо получить уравнение упругой линии стойки, находящейся под воздействием горизонтальных (ветровых) и вертикальных (весовых) нагрузок (рис. 3).

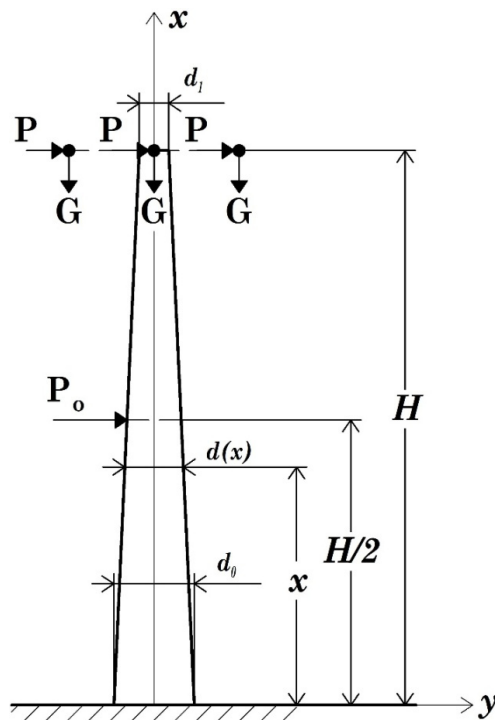


Рис. 3. Схема деформации одностоечной композитной опоры

Выражение для изгибающего момента в произвольном сечении x опоры имеет следующий вид:

$$M(x) = 3 \cdot P \cdot (H - x) + P_o \cdot (0,5H - x), \quad (3)$$

где P , P_o – ветровые нагрузки соответственно на провода и стойку опоры.

Сечение полый композитной опоры представляет собой кольцо внешним диаметром $d(x)$ и толщиной δ . С учетом этого общеизвестная формула для нахождения геометрического момента инерции кольцевого сечения запишется как

$$J(x) = \frac{\pi \cdot [d(x)]^4}{64} \left[1 - \left(1 - \frac{\delta}{d(x)} \right)^4 \right], \quad (4)$$

где

$$d(x) = d_1 \cdot \frac{x}{H} + d_0 \cdot \left(1 - \frac{x}{H} \right). \quad (5)$$

Уравнение упругой линии стойки (являющейся с точки зрения строительной механики консольным стержнем) представляет собой выражение [5]:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{E \cdot J(x)}, \quad (6)$$

которое с учетом (3), (4) будет иметь вид:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = 64 \cdot \frac{3 \cdot P \cdot (H - x) + P_o \cdot (0,5H - x)}{E \cdot \pi \cdot [d(x)]^4 \cdot \left(1 - \left[1 - \delta/d(x) \right]^4 \right)}, \quad (7)$$

где E – модуль упругости материала опоры.

Сформулируем задачу Коши:

$$y''(x) = \frac{M(x)}{E \cdot J(x)}, \quad 0 \leq x \leq H, \quad (8)$$

$$y'(0) = 0, \quad y(0) = 0.$$

Поиск аналитического решения $y(x)$ данной задачи ввиду сложности уравнения (3) является крайне затруднительным, в связи с чем более рациональным выглядит использование численных методов решения, простейшим из которых является метод Эйлера [3].

Таким образом, задача Коши сводится к поиску приближенных значений $y_i \approx y(x_i)$ на сетке $\{x_i\} \in [0, H]$, где $i = \overline{0, n}$.

Применение вычислительной техники позволяет скомпенсировать недостаточную точность метода Эйлера более частым разбиением сетки решения (к примеру, задавая $n=1000$).

Кроме того, следует учитывать наличие продольного изгиба от веса средней фазы G (см. рис. 3), в связи с чем точное значение прогиба в точке $x=x_i$ с учетом найденного значения отклонения от действия поперечных сил y_{0i} будет определяться выражением [5]:

$$y_i = \frac{y_{0i}}{1 - \frac{G}{P_{\text{эi}}}}, \quad (9)$$

где $P_{\text{эi}}$ – эйлерова сила, вычисляемая по формуле [5]:

$$P_{\text{эi}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J(x_i)}{(\mu \cdot x_i)^2}, \quad (10)$$

где μ – коэффициент приведения длины, зависящий от типа опорных закреплений стержня (так как один конец стойки глухо зашлемлен, а другой свободен, $\mu=2$).

Условия, для которых проводился расчет (параметры опоры, пролета и местности), приводятся в таблице.

Расчетные параметры

Высота опоры, м	Модуль упругости стеклопластика, ГПа	Толщина стенки стойки, мм	Тип провода	Длина пролета, м	Район по ветру	Район по гололеду
14,5	25	12	АС-120/19	150	4	5

На рис. 4 представлен график прогибов опоры по высоте применительно к указанным расчетным условиям.

Заметим, что характерная для стеклопластиковых опор особенность в виде значительных прогибов под действием гололедно-ветровых нагрузок нашла свой отклик и в последних редакциях ПУЭ, согласно которому габариты ЛЭП с гибкими опорами рассчитываются для случая максимально отклоненных опор [1].

Угол поворота траверсы α (см. рис. 2) при изгибе опоры равен углу наклона касательной к линии прогиба стойки, проведенной в точке ее вершины. При этом, как оговаривалось ранее, в силу крайне малого шага разбиения сетки решения ($\Delta h = 1,45 \cdot 10^{-2}$ м) с достаточной точностью можно утверждать, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \lim_{\Delta h \rightarrow 0} \frac{\Delta y_n}{\Delta h} \approx \frac{\Delta y_n}{\Delta h}, \quad (11)$$

где $\Delta y_n = y_n - y_{n-1}$.

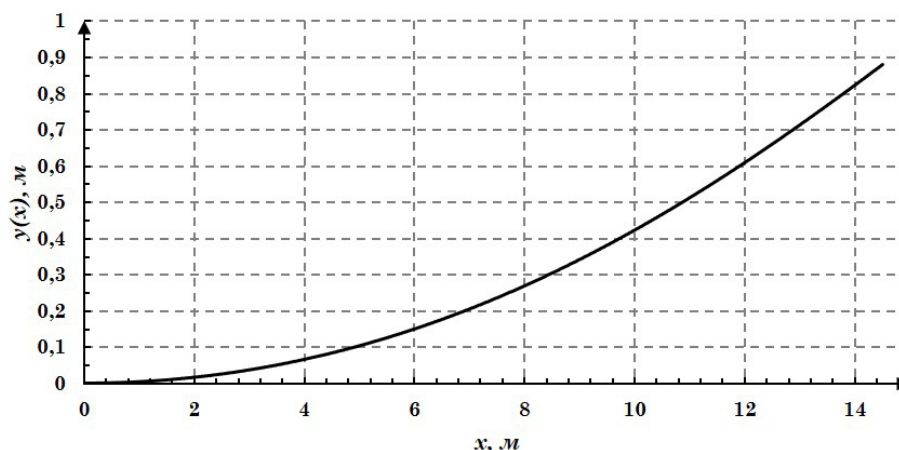


Рис. 4. График прогибов композитной опоры

Таким образом, увеличение стрелы провеса при повороте траверсы составит

$$\Delta H = r \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (12)$$

где r – вылет провода.

Для нахождения «искаженного» значения удельной гололедной нагрузки γ_{err} запишем уравнение состояния провода (в данном случае связывающего параметры «истинного» режима с «искаженным») [4]:

$$\sigma_{err} - \frac{\gamma_{err}^2 \cdot l^2 \cdot E_n}{24 \cdot \sigma_{err}^2} = \sigma - \frac{\gamma^2 \cdot l^2 \cdot E_n}{24 \cdot \sigma^2}, \quad (13)$$

где σ , σ_{err} – значения механического напряжения в материале провода в соответствующих режимах, l – длина пролета, E_n – модуль Юнга сталеалюминиевого провода.

Выражая из (13) величину γ_{err} с учетом соотношения [4]

$$f = \frac{\gamma \cdot l^2}{8 \cdot \sigma}, \quad (14)$$

получим:

$$\gamma_{err} = f_{err} \left(\frac{64 \cdot E_n}{3 \cdot l^4} (f_{err}^2 - f^2) + \frac{\gamma}{f} \right). \quad (15)$$

Уравнение (14) позволит вычислить значение относительной погрешности видеоизмерений:

$$\delta\gamma = \frac{\gamma_{err} - \gamma}{\gamma} \cdot 100\%. \quad (16)$$

Полагая, что при номинальных климатических условиях (см. таблицу) механическое напряжение в материале провода не превысит допустимого значения (для АС-120/19 – 135 Н/мм²), методическая погрешность составит 24,8 %.

Очевидно, что изготовление опоры из более жесткого материала способствует снижению прогибов и уменьшению погрешности. Так, в случае замены стандартного стекловолокна ($E=25$ ГПа) на базальтовое (79,3 ГПа), значение погрешности составит 7,54 %, а в случае углеродного (230 ГПа) – не более 2,6 %.

Графическое изображение полученной в ходе выполнения расчетов зависимости методической погрешности видеоизмерений от величины прогибов опоры показано на рис. 5.

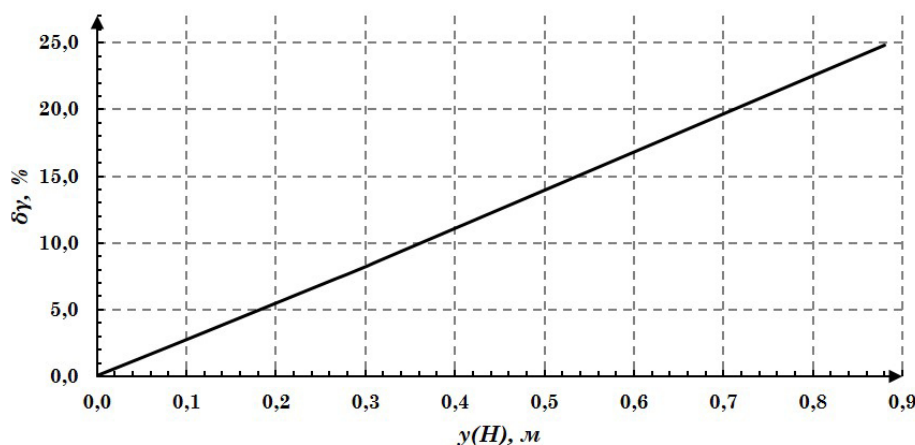


Рис. 5. Зависимость методической погрешности видеоизмерений от прогибов опоры ПК-35

Коррекция погрешности

Низкая жесткость материала опоры является причиной значительного прогиба стойки, что, как видно из рис. 5, приводит к весомой (до 24,8 % в данном случае) методической погрешности. Следовательно, при диагностике оледенения проводов, подвешенных к гибким опорам, величина их прогиба под действием ветра и гололеда также должна измеряться с целью коррекции соответствующих значений линейного габарита.

Предлагаемое устройство для контроля положения вершины опоры (рис. 6) включает в себя визирную цель 1 в виде точечного источника света (ТИС) и видеосенсор 2, монтируемый у основания стойки.

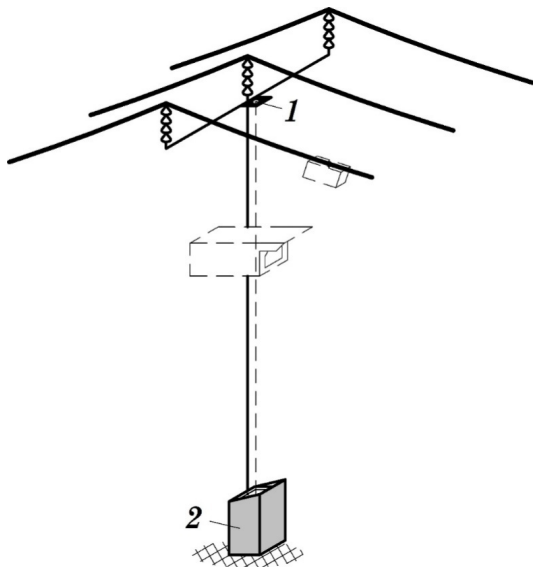


Рис. 6. Устройство для контроля прогибов гибкой опоры

Высокоточная регистрация девиации ТИС позволит определять текущий наклон α траверсы и связанное с этим изменение ΔH координаты подвеса провода (см. рис. 2), что делает возможным своевременную коррекцию значения стрелы провеса и повышает достоверность измерительной информации.

Выводы

Представленный способ оценки погрешности видеоизмерений при диагностике оледенения ЛЭП оптическим методом позволяет выявить необходимость контроля изгибов линейной опоры. В случае, если прогиб опоры вносит значительную методическую погрешность и требует коррекции, устройство видеомониторинга должно комплектоваться дополнительным оптоэлектронным датчиком, расположенным у основания стойки, и визирной целью, устанавливаемой на уровне подвеса проводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 февраля 2015 г. – М.: КНОРУС, 2015. – 488 с.
2. Башкевич, В. Я. Мониторинг воздушных линий электропередачи, эксплуатируемых в экстремальных метеословиях: монография / В. Я. Башкевич [и др.]. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2013. – 244 с.
3. Вержбицкий, В. М. Основы численных методов: учеб. для вузов / В. М. Вержбицкий. – М.: Высшая школа, 2009. – 840 с.
4. Глазунов, А. А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. В 2 т. Т. 1. Работа и расчет проводов и тросов / А.А. Глазунов. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 192 с.
5. Дарков, А. В. Сопротивление материалов : учеб. для вузов / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. – М.: Высшая школа, 1975. – 645 с.
6. Минуллин, Р. Г. Обнаружение гололедных образований на линиях электропередачи локационным зондированием / Р. Г. Минуллин, Д. Ф. Губаев. – Казань: КГЭУ, 2010. – 208 с.
7. Шилин, А. А. Оптико-электронная система контроля механических нагрузок на воздушных линиях электропередачи / А. А. Шилин, С. С. Дементьев // Вопросы надежности работы систем электроснабжения в условиях гололедно-ветровых нагрузок: матер. междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 19 октября 2016 г.) / редкол.: Ф. Р. Исмагилов (отв. ред.) [и др.] / ФГБОУ ВО «Уфимский гос. авиационный техн. ун-т». – Уфа, 2016. – С. 96–100.
8. Wachal, R. A computer vision early-warning ice detection system for the Smart Grid / R. Wachal [et al.] // IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (Orlando, FL, May 07-10, 2012). – Orlando, 2012. – 1-6 pp. – DOI: 10.1109/TDC.2012.6281621.

УДК 620.9

О. О. Ахмедова, А. Н. Шилин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
НА ПАРАМЕТРЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
ДЛЯ КОРРЕКТИРОВКИ УСТАВОК СИСТЕМ
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: Ahmedova-olga@mail.ru

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. При определении продольных и поперечных параметров ВЛЭП используют усредненные данные, такие как проводимость грунта, физические свойства проводников, атмосферные условия и геометрическое расположение фазных проводников относительно поверхности земли и друг друга, которые принимаются неизменными. УРЗА могут функционировать некорректно (сработать ложно или излишне, или не верно определить расстояние до места повреждения), если их уставки не отражают реального состояния контролируемой ВЛЭП. Актуальным является уточнение параметров воздушных линий электропередачи для верного определения уставок релейной защиты с применением имитационных моделей.

Ключевые слова: Релейная защита, продольные и поперечные параметры воздушных линий электропередачи, проводимость земли, корректировка уставок.

О. О. Akhmedova, A. N. Shilin

**THE ENVIRONMENTAL INFLUENCE AT ELECTRICITY LINES
TRANSMISSION FOR RELAY SYSTEM SETTINGS PROTECTION IN REAL TIME**

Volgograd State Technical University

The parameters of air electricity lines transmission are used by algorithms of many devices in relay protection and automation, their correct definition is important for precise relay protection system functioning and automatic equipment work. When longitudinal and transversal parameters of electricity lines are being determined, an average data is being used, such as soil conductivity, conductors' physical characteristics, atmospheric conditions and phase conductors geometrical arrangement, concerning the earth surface and each other, which is taken as constant. Relay protection settings can function incorrectly (i.e. to work falsely or overwork, or to define wrong distance to a damage point), if their settings don't match a real condition of controlled electric lines. Thus the specification of electricity transmission parameters for the right definition of relay protection settings together with imitating models application is considered highly important.

Keywords: relay protection, longitudinal and transversal parameters of electricity lines transmission, earth conductivity, settings correction

Воздушная линия электропередачи характеризуются следующим параметрами: удельное активное сопротивление R , удельное реактивное сопротивление X , удельная активная проводимость G и удельная реактивная проводимость B , как правило, эти параметры относят к единице длины воздушной линии и в расчетах принимают погонные значения, соответственно R_0 , X_0 , G_0 , B_0 . При анализе линий электропередачи используются табличные приближенные значения продольных и поперечных параметров в схемах замещения, хотя решения задач в неупрощенном виде приводит к существенным уточнениям известных решений. Произведем анализ характеристик данных электрических величин.

Удельное активное сопротивление

Удельное активное сопротивление определяется сечением проводника и удельным сопротивлением материала. Данные приводящиеся в справочной литературе рассчитаны на температуру провода 20°C не учитывают сезонные изменение температуры окружающей среды, присущие практически для большей части РФ.

Зависимость активного сопротивления от температуры провода определяется:

$$R_{0t} = R_{020} \left(1 + \alpha (t_{np} - 20^\circ) \right), \quad (1)$$

где R_{020} – табличное значение удельного сопротивления при температуре провода 20°C ; t_{np} – температура провода, $^\circ\text{C}$; α – температурный коэффициент электрического сопротивления, Ом/град.

Температура проводов воздушной линии электропередачи зависит от условий охлаждения в окружающей среде (температуры воздуха) и протекающего по ним тока. При предельных по условиям нагрева токовых нагрузок температура провода может достигать $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при низкой температуре окружающей среды и малых нагрузках до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, следовательно, удельное активное сопротивление может увеличиться на 20 % и уменьшиться на 30 %.

Найдем из уравнения температуру провода воздушной линии:

$$t_{np} = \frac{I^2 R_{020} + \sigma F t_{ок} - 20 \sigma F}{\sigma F - I^2 R_{020} \alpha} + 20. \quad (2)$$

Построим на основании выражения (2) зависимость температуры провода АС–120 от температуры окружающего воздуха, скорости ветра и протекающего по нему тока (рис. 1), учитывая атмосферное давление равное 1, температуру окружающей среды в диапазоне от $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость ветра от 0,6 м/сек, соответствующую перемещению воздушных масс только за счет нагрева до 6 м/сек. Так как $I_{доп}$ – это величина тока проходящая по воздушной линии при нормальной температуре ($+25\text{ }^{\circ}\text{C}$) и при отсутствии ветра, способная произвести нагрев провода до предельно допустимого значения ($+70\text{ }^{\circ}\text{C}$), то влияние токовой нагрузки оценивалось в диапазоне от 0 до $I_{доп}$.

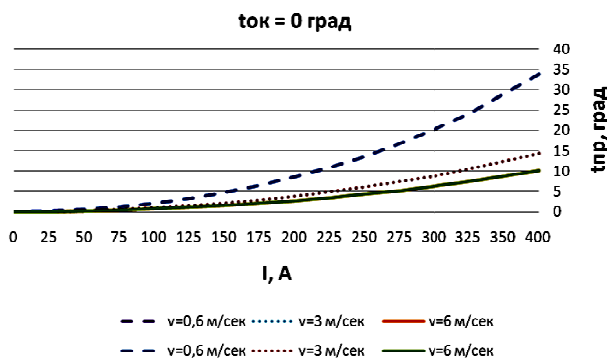


Рис. 1. Зависимости температуры провода марки АС–120 от протекающего тока, температуры окружающей среды, скорости ветра

Из рис. 1 следует, что при малых и средних токах от допустимого, проходящих по воздушной линии и не больших ветровых значительные изменения температуры провода происходят в основном из-за колебания температуры окружающей среды. Если токовая нагрузка более 30 % от допустимого тока линии и скорость ветра не велика, то уже ток, проходящий по проводнику оказывает заметное влияние на

его нагрев. При увеличении скорости ветра значительно улучшается отвод тепла даже при большом значении протекающего тока.

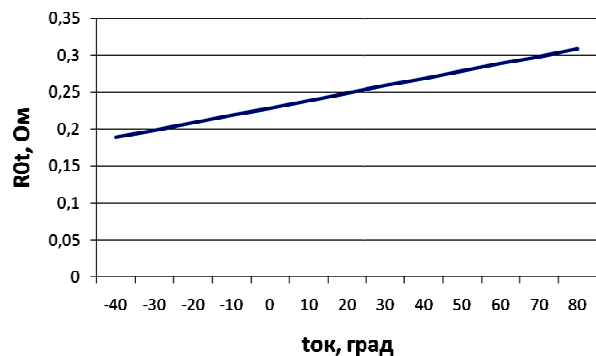


Рис. 2. График зависимости сопротивления провода марки АС–120 длиной 1 км от температуры окружающей среды

Температура проводника не опускается ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и не поднимается выше $79\text{ }^{\circ}\text{C}$, даже при малой скорости ветра и токе проходящему по линии равному току допустимому, следовательно, произведем анализ зависимости сопротивления провода воздушной линии электропередачи от температуры $R_{0t} = f(t)$ в указанном диапазоне (рис. 2). Из графика видно, что повышение температуры провода на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению сопротивления провода на 4 %.

Анализ температурных условий работы проводов различных сечений, используемых на воздушных линиях напряжением 35 кВ и выше показал, что основные зависимости температуры провода от протекающего тока, температуры окружающей среды, скорости ветра аналогичны представленным на рис. 1. Следовательно, и зависимость сопротивления провода воздушной линии электропередачи при изменяющейся температуре окружающей среды для различных марок проводников не будет отличаться от графика, представленного на рис. 2.

Удельное реактивное сопротивление

Удельное реактивное сопротивление зависит от потекосцепления, которое в свою очередь зависит от взаимного расположения проводов при учете пронизывания магнитным потоком поверхности земли.

Определим реактивное сопротивление воздушной линии электропередачи с учетом конечной проводимости грунта. Так как полное сопротивление определяется магнитным потоком, то его можно считать индуктивным. Мощность, затрачиваемая на протекание тока через сопротивление R_b в грунте, определяется Джоу-

левыми потерями на тепло. Активное сопротивление (3) не зависит от проводимости грунта, а является пропорционально частоте, так как увеличение проводимости земли ведет к увеличению степени неравномерности распределения тока и, как следствие, компенсирует уменьшение потерь мощности, идущей на тепло Джоуля.

$$R_s = \pi^2 f \cdot 10^{-4} \text{ Ом/км.} \quad (3)$$

С увеличением частоты и проводимости грунта магнитный поток, который замыкается в земле, будет убывать, так как будет возрастать степень неоднородности распределения тока в земле (4).

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

Для точного определения полного сопротивления провода с учетом проводимости зем-

$$\dot{Z}_{np} = R_{0t} + R_s + jX_s + jX_e = \left[R_{020} (1 + \alpha(t - 20^\circ)) + \left(\pi^2 f + j 29 f \lg \frac{0,178}{r_0 \sqrt{f \gamma \cdot 10^{-9}}} \right) \cdot 10^{-4} \right]. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что реактивное сопротивление не зависит от высоты подвеса провода, так как (4) увеличение высоты подвеса уменьшает X_s от потока, замыкающегося в грунте, но при этом увеличивается X_e из-за увеличения потока замыкающегося в воздухе.

Из выражении (7), следует, что значение реактивного сопротивления провода зависит от сопротивления грунта, которое изменяется в широком диапазоне под влиянием таких факторов, как температура, влажность [6]. Анализируя зависимости, представленные на рис. 7, следует, что резкое снижение сопротивления грунта происходит при увеличении влажности на 15–20 %, дальнейшее увлажнение мало влияет на его сопротивление, табличные значения сопротивления даются на глубине порядка 0,7 м, а в более глубоких слоях грунта оно значительно снижается и уже не имеет ярко выраженных колебаний, это объясняется тем, что грунт не подвержен сезонным колебаниям (таяние снега, пересушивание в летний период, промерзание), а имеет постоянное значение влажности, поэтому предполагается, что на глубине от 3 м и далее сопротивление грунта будет иметь значение равное 15 % от табличного. Для уточненной оценки сопротивления земли будем рассматривать ее двухслойной: первый слой глубиной 2,5 м, а глубину второго слоя определим, основываясь на методе зеркальных отображений, как половину двойной высоты подвеса провода

ли необходимо также учитывать активное сопротивление самого провода и сцепление провода с частью потока, который замыкается в воздухе. Определим реактивное сопротивление, создаваемое частью замыкающегося в воздухе потока, который в свою очередь создается только током провода и совпадает с ним по фазе, как для одного провода однофазной двухпроводной линии, при условии, что расстояние между проводами D численно равняется высоте подвеса h рассматриваемого провода [5].

$$X_e = 29 f \lg \frac{h}{r_0} \cdot 10^{-4} \text{ Ом/км.} \quad (5)$$

Индуктивность, соответствующая части потока замыкающегося в воздухе, будет равна:

$$L_e = 4,61 \lg \frac{h}{r_0} \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км.} \quad (6)$$

Запишем полное сопротивление провода

воздушной линии электропередачи над поверхностью земли. Тогда из выражение (8) определим эквивалентное сопротивление.

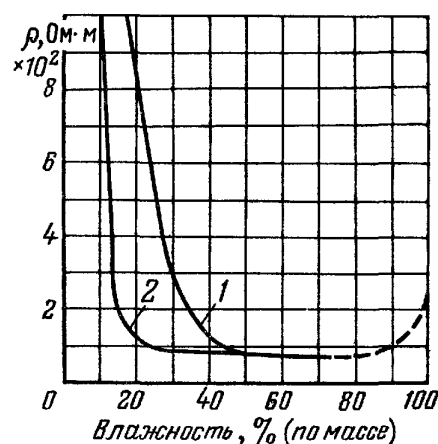


Рис. 3. Изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от содержания в нем влаги: 1 — тонкодисперсный грунт, 2 — грубодисперсный грунт

$$\rho_{\text{экв}} = \frac{h}{\sum_{k=1}^3 \frac{\Delta d_k}{\rho_k} + \frac{\Delta d_2}{\rho_2}}, \quad (8)$$

где h — высота от фиктивного провода расположенного в грунте до поверхности земли, м; Δd_k — максимальной глубине промокания грунта, м; Δd_2 — толщина грунта не подверженная сезонному изменению влажности, м; ρ_k — сопротивление грунта на участке Δd_k , Ом/м; ρ_2 — сопротивление грунта на участке Δd_2 , Ом/м.

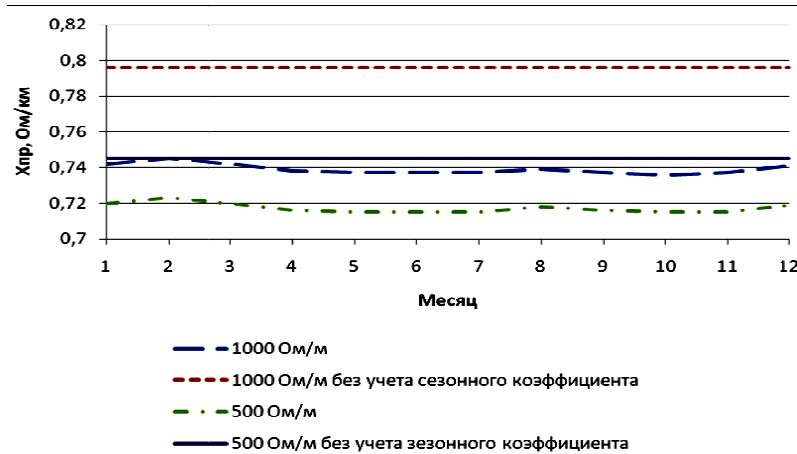


Рис. 4. Зависимости реактивного сопротивления провода при сопротивлениях грунта 1000 Ом/м и 500 Ом/м без учета сезонного коэффициента и с его учетом

При взаимном проецировании зависимостей, графически представленных на рис. 4, наблюдается совпадение трендов кривых от изменения по месяцам, следовательно, независимо от структуры грунта, сохраняется четкая сезонная зависимость, которую необходимо учитывать при расчете сопротивления провода.

Составление схемы замещения

Составим схему замещения трехфазной воздушной линии электропередачи, конечную проводимость земли учтем через активное сопротивление, пропорциональное частоте и индуктивное сопротивление, определяющееся магнитным потоком, замыкающимся в земле [3] (рис. 5).

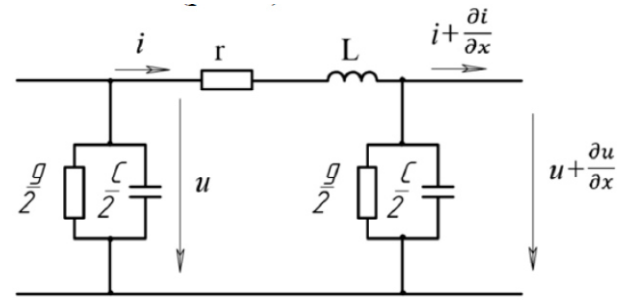


Рис. 5. П – образная схема замещения ВЛЭП

Уравнения распределения токов и напряжений вдоль ВЛЭП:

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial u_A}{\partial x} &= L_A \frac{\partial i_A}{\partial t} + L_{AB} \frac{\partial i_B}{\partial t} + L_{AC} \frac{\partial i_C}{\partial t} + r_A i_A + R_3 i_3 \\
 -\frac{\partial u_B}{\partial x} &= L_{BA} \frac{\partial i_A}{\partial t} + L_B \frac{\partial i_B}{\partial t} + L_{BC} \frac{\partial i_C}{\partial t} + r_B i_B + R_3 i_3 \\
 -\frac{\partial u_C}{\partial x} &= L_{CA} \frac{\partial i_A}{\partial t} + L_{CB} \frac{\partial i_B}{\partial t} + L_C \frac{\partial i_C}{\partial t} + r_C i_C + R_3 i_3
 \end{aligned} \tag{9}$$

Уравнения, описывающие емкостную связь, примут вид:

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial i_A}{\partial x} &= \frac{C_A}{2} \frac{\partial u_A}{\partial t} + \frac{C_{AB}}{2} \frac{\partial (u_A - u_B)}{\partial t} + \frac{C_{AC}}{2} \frac{\partial (u_A - u_C)}{\partial t} \\
 -\frac{\partial i_B}{\partial x} &= \frac{C_{BA}}{2} \frac{\partial (u_B - u_A)}{\partial t} + \frac{C_B}{2} \frac{\partial u_B}{\partial t} + \frac{C_{BC}}{2} \frac{\partial (u_B - u_C)}{\partial t}, \\
 -\frac{\partial i_C}{\partial x} &= \frac{C_{CA}}{2} \frac{\partial (u_C - u_A)}{\partial t} + \frac{C_{CB}}{2} \frac{\partial (u_C - u_B)}{\partial t} + \frac{C_C}{2} \frac{\partial u_C}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{10}$$

где $L_{ii}, L_{ij}, C_{ii}, C_{ij}$ – собственные и взаимные индуктивности и емкости проводов ВЛЭП соответственно.

Разница в индуктивных сопротивлениях и емкостных проводимостях фаз обусловлена влиянием конечной проводимости земли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Поспелов, Г. Е.* Влияние температуры проводов на потери электроэнергии в активных сопротивлениях проводов воздушных линиях электропередачи / Г. Е. Поспелов, В. В. Ершечев // *Электричество*. – 1973. – № 10. – С. 81–83.

2. *Герасименко, А. А.* Передача и распределение электрической энергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Ростов-н/Д.: Феникс, 2006. – 720 с.

3. *Мирошник, А. А.* Уточненные алгоритмы расчета потерь электроэнергии в сетях 0,38 кВ в реальном времени // *Problemele energeticii regionale*. – 2010. – № 2(13). – С. 35–42.

4. Ollendorf. *Erdstromme*. Berlin 1928.

5. *Марголин, Н. Ф.* Сопротивление воздушных линий передачи / Н. Ф. Марголин. – М.: Мособлполиграф, 1937. – 61 с.

6. *Долин, П. А.* Основы техники безопасности в электроустановках / П. А. Долин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.

УДК 620.1

О. С. Атрашенко, Е. М. Скорикова

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ

Камышинский технологический институт (филиал) ВолгГТУ

e-mail: olgapasmenko@yande.ru

Современные системы электроснабжения достаточно сложные, но при этом должны осуществлять необходимую надежность электроснабжения. Состояние кабельных линий до недавнего времени диагностировались с помощью традиционных методов, которые под действием повышенного напряжения ускоряли старение изоляции. В последние годы ведутся исследования по разработке и внедрению неразрушающих методов диагностики кабельных линий. В статье приведены способы и современного оборудования, необходимое для контроля кабелей.

Ключевые слова: неразрушающие методы, система OWTS, изоляция кабелей.

O. S. Atrashenko, E. M. Skorikova

THE MODERN CONTROL METHODS OF INSULATION OF CABLES

**Kamyshin institute of technology (branch)
of FGBOU VO «Volgograd State Technical University»**

The modern systems of electrical power supply rather difficult, but at the same time shall realize necessary reliability of electrical power supply. A status of cable lines were diagnosed until recently by means of traditional methods which under the influence of the increased tension accelerated insulation aging. In recent years researches on development and deployment of nondestructive methods of diagnostics of cable lines are carried. Methods and the modern equipment, necessary for monitoring of cables are given in article.

Keywords: nondestructive methods, OWTS system, insulation of cables.

В наши дни нормальная работа транспорта, систем электроснабжения промышленных предприятий, сельского, коммунального и других отраслей хозяйства невозможна без надежной работы силовых кабелей низких и средних классов напряжения. Для того чтобы кабельные линии связи и электроустановки нормально функционировали нужно непрерывно контролировать состояние изоляционного покрытия. В этом процессе необходимо использовать устройство контроля качества изоляции, оно предназначено для проведения измерений состояния изоляции сети, которая находится под постоянным напряжением и для оценки результатов проведенных измерений. Устройства, кото-

рые используют для контроля изоляции, ведут непрерывный контроль ее состояния путем проведения измерений сопротивления изоляции для обеспечения условий электробезопасности.

На настоящее время существуют различные методы контроля состояния изоляции. Все методы можно разделить на две группы:

- разрушающие;
- неразрушающие.

Своевременная и достоверная диагностика состояния изоляции силовых КЛ с использованием неразрушающих методов позволит отказаться от профилактических испытаний изоляции разрушающими методами.

Разрушающие методы контроля изоляции предполагают использования для испытаний повышенного напряжения, а неразрушающие не требуют его использования. Все неразрушающие методы являются в какой-то степени косвенными, а разрушающие могут вызвать возникновения повреждения там, где его не было.

В последние годы ведутся интенсивные исследования с целью разработки и внедрения эффективных неразрушающих методов испытаний и диагностики силовых кабельных линий среднего класса напряжения в условиях эксплуатации. Наибольшие успехи в этом направлении достигли в Германии, США, Японии и в ряде других стран.

К настоящему времени на основе применения современных технологий были созданы достаточно компактные диагностические системы и приборы для неразрушающей диагностики силовых КЛ в условиях эксплуатации, которые могут использоваться либо как отдельные переносные системы, либо могут быть встроены в передвижение кабельно-измерительные лаборатории.

Из разработанных методов можно выделить следующие неразрушающие методы диагностики силовых КЛ напряжением до 35 кВ, которые широко используются за рубежом:

- метод измерения и локации частичных разрядов в силовых КЛ;
- метод измерения и анализа возвратного напряжения в изоляции силовых кабелей;
- метод измерения тока релаксации в изоляции СПЭ-кабелей;
- метод измерения диэлектрических характеристик изоляции кабелей;
- метод импульсной рефлектометрии для предварительной локализации низкоомных повреждений в силовых КЛ;
- метод контроля целостности оболочки силовых кабелей и определения мест неисправности в оболочках.

Наиболее эффективными методами являются метод измерения и локации частичных разрядов в КЛ и метод измерения и анализа возвратного напряжения в изоляции кабелей.

Метод измерения и локации частичных разрядов в КЛ

В силовых кабелях номинальным КЛ напряжением до 35 кВ включительно основными причинами снижения электрической прочности изоляции в процессе длительной эксплуатации (т. е. старения изоляции) являются воздействие

частичных разрядов (ЧР) и воздействие повышенных температур. Физические процессы в изоляции силовых кабелей под воздействием ЧР, т. е. микроразрядов, возникающих в местах неоднородности изоляции, к настоящему времени изучены достаточно хорошо.

В кабелях с пластмассовой изоляцией при длительном приложении напряжения ЧР развиваются в газовых включениях и микротрещинах (в возможных технологических дефектах). ЧР в большинстве случаев являются причинами зарождения ветвистых побегов – электрических триингов, приводящих к пробое изоляции. При попадании влаги возникают водные триинги в полиэтиленовой изоляции.

Внешними проявлениями процессов развития ЧР являются электрические и акустические явления, выделение газов, свечение, нагрев изоляции. Наиболее эффективными являются электрические методы измерений характеристик ЧР, которые и получили наиболее широкое распространение.

При проведении диагностики КЛ методом измерения характеристик ЧР существует два основных подхода. Диагностика под рабочим напряжением может осуществляться как дистанционно (например, с использованием ультразвуковых локаторов), так и с помощью датчиков, непосредственно подключенных к диагностируемой КЛ (между оболочкой кабеля и землей). Однако этот метод имеет ряд недостатков, в том числе такие, как сложность фильтрации ЧР от другого работающего оборудования и невозможность фиксации ЧР, возникающих между фазами трехжильных кабелей в общей оболочке. При измерениях характеристик ЧР на КЛ, отключенной с двух сторон, измерительная схема электрически не связана с внешней сетью, что значительно уменьшает уровень помех.

К настоящему времени различные способы измерения характеристик ЧР как на отключенных от сети КЛ, так и под рабочим напряжением без отключения КЛ от сети, реализованы в зарубежных и отечественных приборах и установках разных конструкций.

Метод измерения и локализации частичных разрядов осциллирующим затухающим напряжением

В настоящее время одним из самых современных и эффективных методов измерений ЧР в условиях эксплуатации диагностических систем для оценки состояния изоляции всех типов

кабелей напряжением до 35 кВ методом контроля характеристик ЧР является метод измерения и локализации ЧР в силовых КЛ затухающим осциллирующим напряжением с использованием диагностической системы OWTS (Oscillating Wave Test System – система диагностики колебательным напряжением) разработки и производства фирмы «Seba KMT» (Германия). Диагностирование силовых КЛ с использованием системы OWTS позволяет определять величину и место расположения ЧР, количество ЧР в локальных местах КЛ, величину напряжения возникновения и гашения ЧР, а также тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции, электрическую емкость и ряд других величин. По совокупности этих параметров может быть сделано обоснованное заключение о техническом

состоянии изоляции диагностируемой КЛ.

Системы OWTS последних разработок (OWTS M 28 и OWTS M 60) (рис. 1) состоят из высоковольтного блока, блока обработки сигнала и ноутбука с адаптером для беспроводной связи с высоковольтным блоком. Высоковольтный блок также состоит из источника высокого постоянного напряжения и резонансной катушки с интегрированным высоковольтным переключателем для создания переменного испытательного напряжения. Туда же встроен высоковольтный делитель и контроллер для цифровой обработки данных и сигналов ЧР. Управление системой, сохранение, анализ и оценка результатов измерения характеристик ЧР производится с использованием специального программного обеспечения.

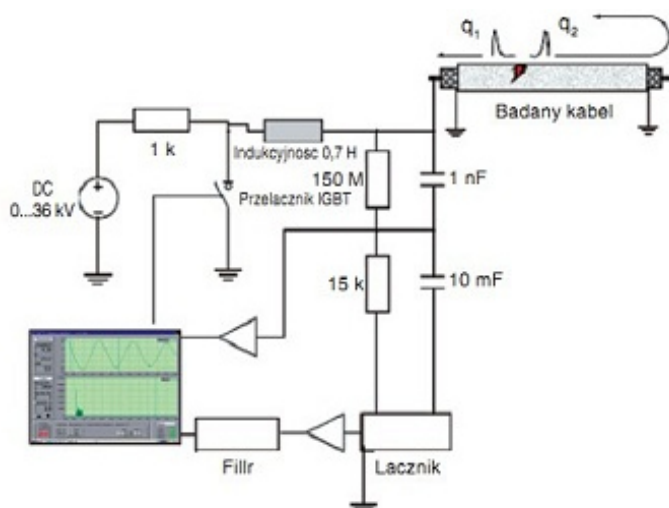


Рис. 1. Система OWTS MM 28 / OWTS MM 60 и схема системы измерения и локализации ЧР

Диагностика КЛ с помощью системы OWTS выполняется на КЛ, отсоединенной с двух сторон КЛ. Перед началом диагностирования производится калибровка системы с помощью калибратора, входящего в комплект поставки системы, с целью уточнения длины КЛ и определе-

ния ожидаемой амплитуды ЧР. После калибровки каждая фаза КЛ (Сх) последовательно заряжается в течение нескольких секунд постоянным напряжением до выбранной величины, не превышающей амплитуду номинального линейного напряжения КЛ (см. рис. 2).

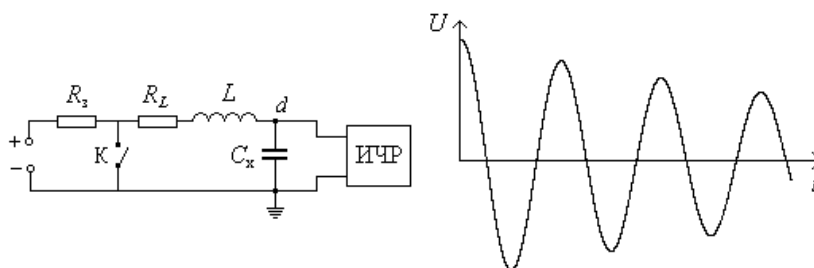


Рис. 2. Схема измерения ЧР при затухающем осциллирующем напряжении: R_3 – зарядное сопротивление; L – катушка индуктивности; R_L – активное сопротивление обмотки катушки индуктивности; K – высоковольтный ключ; ИЧР – измеритель ЧР

После зарядки фаза КЛ с помощью электронного переключателя (К) подключается через индуктивность L (резонансную катушку) к заземленному экрану кабеля. В процессе разрядки кабеля возникают затухающие синусоидальные колебания, частота которых зависит от емкости диагностируемого объекта. Бегущая волна инициирует ЧР в изоляции КЛ, которые фиксируются и сохраняются в памяти компьютера системы OWTS для последующей обработки с целью определения амплитуды и местоположения ЧР по длине КЛ. Так как амплитуда испытательного напряжения является затухающей, то можно точно определить напряжение, при котором возникают и погасают ЧР. Колебательное напряжение прикладывается к объекту диагностики в течение нескольких сот миллисекунд (0,8 с) и поэтому не нагружает кабель и не повреждает его. Локализация ЧР осуществляется с использованием метода рефлектометрии по результатам регистрации двух импульсов от одного и того же ЧР – первичного импульса и импульса, отраженного от конца КЛ.

Эффективность диагностики с использованием системы OWTS в значительной мере определяется качеством обработки данных диагностики, которая производится с использованием специального программного обеспечения. При обработке записанных в памяти компьютера данных диагностики оператором должны быть выделены и учтены первичные и отраженные импульсы ЧР на фоне возможных помех и шумов. Обработанные импульсы ЧР представляются на карте дефектных мест КЛ, а также на гистограмме распределения ЧР по длине КЛ, как для трех фаз КЛ, так и для каждой фазы КЛ в отдельности.

Длительность проведения измерений ЧР на всех трех фазах одной КЛ не превышает одного часа. Длительность обработки результатов измерений составляет 1–2 часа (зависит от опыта оператора и числа измерений на каждом уровне испытательного напряжения).

Система OWTS достаточно длительное время широко применяется в ряде стран Европы (Германия, Швейцария, Великобритания, Италия, Норвегия и др.) и хорошо себя зарекомендовала.

В России также имеется опыт ее применения (около 3 лет). Например, в Пермском регионе ее успешно использует предприятие ООО «Тест» при диагностике КЛ, эксплуатирующихся на ряде ведущих предприятий. В настоящее время с использованием системы OWTS

продиагностировано более 2000 КЛ напряжением от 6 до 35 кВ

Из других зарубежных разработок в области измерения и локализации ЧР в силовых КЛ можно выделить разработанную фирмой «InterEng Messtechnik GmbH» систему испытаний и диагностики PHG PD, которая представляет собой сочетание высоковольтной СНЧ-системы (PHG) с системой измерения ЧР в кабеле.

Метод измерения и анализа возвратного напряжения в изоляции кабелей

Метод измерения и анализа возвратного напряжения основан на измерении и анализе зависимостей от времени тока зарядки в процессе зарядки емкости диагностируемого кабеля постоянным напряжением небольшой величины (1 и 2 кВ), не оказывающей влияния на изоляцию кабеля, и восстанавливающегося (возвратного) напряжения в изоляции кабеля после его кратковременной разрядки. Эти зависимости характеризуют состояние, степень старения и содержание влаги в изоляции силовых КЛ.

Одним из лидеров в разработке этого метода и установок для проведения диагностики методом анализа возвратного напряжения в условиях эксплуатации является фирма Seba KMT. Этой фирмой была создана диагностическая система CD 31, предназначенная для диагностики силовых КЛ напряжением до 35 кВ как с полиэтиленовой, так и с бумажной пропитанной изоляцией.



Рис. 3. CD 31

Диагностическая система CD 31 (рис. 3) состоит из высоковольтного блока (включающего генератор высокого постоянного напряжения, высоковольтный выключатель и разрядное устройство), блока управления и высоковольтных соединительных кабелей. Система CD 31 под-

ключается к портативному компьютеру через интерфейс для управления процессом диагностики, записи, обработки и архивирования результатов измерения.

Достоинства системы CD 31:

- возможность проведения диагностики одновременно на трех фазах КЛ (трехканальная измерительная аппаратура);
- незначительное влияние посторонних помех (по сравнению с другими диэлектрическими методами) на результаты измерений;
- упрощенная процедура подключения кабеля к диагностической системе.

Недостаток метода системы CD 31:

- позволяет оценивать только общее состояние изоляции всей КЛ, а не отдельных ее участков.

При проведении диагностики результаты измерений и анализа возвратного напряжения для каждой фазы КЛ и для каждого цикла измерений (двукратный цикл измерений при зарядном напряжении 1 и 2 кВ для КЛ с бумажной пропитанной изоляцией) отображаются на мониторе компьютера в цифровом, графическом и табличном виде.

Результатом диагностирования КЛ с использованием системы CD 31 является протокол измерений и анализа возвратного напряжения для каждой фазы диагностируемой КЛ, который автоматически составляется системой CD 31, записывается в память портативного компьютера и может быть распечатан на принтере.

При переходе на систему технического обслуживания, контроля технического состояния и ремонта силовых КЛ по их техническому состоянию может быть получен существенный экономический эффект за счет:

- снижения количества аварий на КЛ и соответственно затрат на их устранение;
- исключения затрат на проведение необоснованных ремонтов КЛ;
- повышения качества монтажных работ за счет проведения диагностики на КЛ после их ремонта или при вводе КЛ в эксплуатацию;
- выявления и устранения дефектов в КЛ на ранней стадии из развития;
- продления срока эксплуатации КЛ с невыработанным ресурсом изоляции;
- рационального планирования действительно необходимых ремонтов КЛ в обоснованные сроки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клюев, В. В. Неразрушающий контроль. Справочник в 8 томах. (том 1, книга 1). Визуальный и измерительный контроль / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин. – Изд. 2-е, испр. – М.: Машиностроение, 2008.
2. Привалов, И. Н. Современные методы и технические средства для испытаний и диагностики силовых кабельных линий номинальным напряжением до 35 кВ включительно / И. Н. Привалов. – Санкт-Петербург: Петербургский энергетический институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов, 2008. – 82 с.
3. СТО 70238424.29.240.20.009-2009 Силовые кабельные линии напряжением 0,4-35 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования.

УДК 621.314.21

Л. В. Хоперскова

ТЕПЛОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЖИДКОГО ДИЭЛЕКТРИКА В СИЛОВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: khoperskova@mail.ru

Рассмотрены особенности теплового охлаждения силовых трансформаторов. Основываясь на нестационарном уравнении переноса тепла в неоднородной среде с источниками, исследована динамика малых возмущений температуры, и получено дисперсионное уравнение для неоднородной среды в ВКБ-приближении. Показано, что при изменении режима работы силового трансформатора между секциями в жидком диэлектрике возможно развитие тепловой неустойчивости. Получены ограничения на длину волны возмущений, при которых возможен рост амплитуды возмущений. Показано, что неустойчивость, которая на нелинейной стадии может приводить к турбулизации и эффективному охлаждению, зависит от профилей температуры, коэффициентов переноса тепла и теплового потока между секциями.

Ключевые слова: трансформатор, теплопередача, жидкий диэлектрик, тепловая неустойчивость

L. V. Khoperskova

THERMAL INSTABILITY OF LIQUID DIELECTRIC IN POWER TRANSFORMER

Volgograd State Technical University

Features of thermal cooling of power transformers are considered. Based on the nonstationary heat transfer equation in an inhomogeneous medium with sources, the dynamics of small temperature perturbations was studied and a dispersion equation for an inhomogeneous medium in the WKB approximation was obtained. We have shown the possibility of developing thermal instability when the operating mode of a power transformer changes between sections in a liquid dielectric. We have obtained restrictions on the wavelength of the perturbations, at which the perturbation amplitude can grow. The instability increment depends on the temperature profiles, the heat transfer coefficients and the heat flux between the sections and at the nonlinear stage this instability can lead to turbulence and effective cooling.

Keywords: transformer, heat transfer, fluid insulator, thermal instability

Для обеспечения отвода тепла от токоведущих элементов силовых трансформаторов с системами охлаждения типа Н и НД используются синтетические жидкие диэлектрики [1]. В этих конструкциях не предусматривается принудительная циркуляция рабочей жидкости. Теплопередача внутри и вне трансформатора происходит только конвекцией, и с ростом мощности трансформатора приобретает главное значение. Применяемые фторсодержащие диэлектрики обладают термической стабильностью и высокой теплопроводностью [2]. Для охлаждения внутри и вне трансформатора должны быть обеспечены наиболее благоприятные условия для движения изолирующей

жидкости внутри бака и воздуха снаружи. С этой целью, начиная с мощности 630–1000 кВА между частями обмоток (секциями) делают специальные каналы для увеличения поверхности охлаждения [3]. Наилучшие условия для движения жидкости внутри обмоток и теплоотдачи от обмоток к диэлектрику представляет сочетание вертикальных и горизонтальных каналов (рис. 1).

Целью работы является определение условий, приводящих к турбулизации жидкого диэлектрика между секциями в горизонтальных каналах, что, как представляется, улучшает теплообмен в системах без принудительной циркуляции [4].

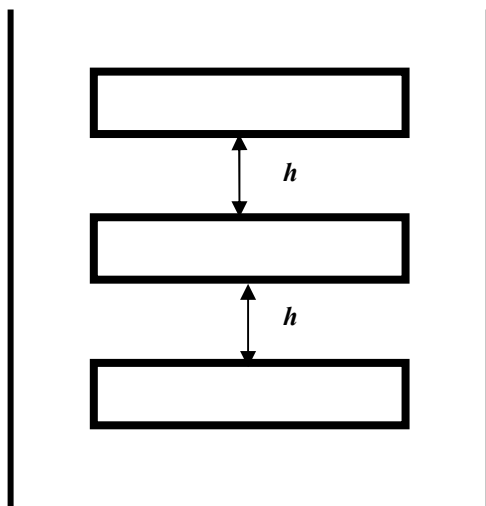


Рис. 1. Секции обмоток трансформатора

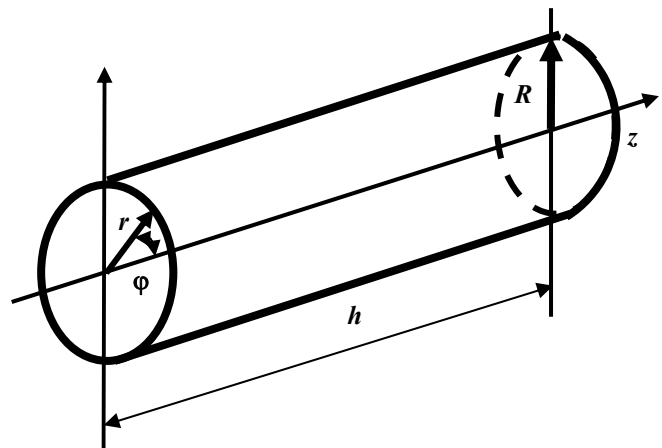


Рис. 2. Геометрия модели

Для анализа воспользуемся уравнением теплопроводности:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T) \text{grad} T) + Q, \quad (1)$$

где Q – функция источников тепла на границах секций; c_v , λ – удельные теплоемкость и теплопроводность жидкого диэлектрика. Будем счи-

тать, что диэлектрик на границе с секцией в каждый момент времени находится в тепловом равновесии, успевая подстраиваться под изменение его температуры. Воспользуемся подходом для анализа дисперсионных свойств неоднородной среды при наличии зависимости коэффициента теплопроводности от температуры [5].

Введем цилиндрическую систему координат с осью z , совпадающей с осью симметрии (рис. 2). Будем считать выделенный объем бесконечно малым, так что расчеты могут быть проведены только по z -координате. Тогда уравнение теплопроводности в данной геометрии будет иметь вид:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q. \quad (2)$$

Рассмотрим функцию источников тепла Q . Примем следующие допущения:

- жидкий диэлектрик обладает высокими электроизолирующими свойствами, и нагрев диэлектрика токами проводимости не происходит;
- выделенный объем располагается в области, где потоки тепла со стороны продольных каналов не оказывают влияние на теплообмен между секциями;
- циркуляция жидкости в горизонтальном направлении отсутствует;
- поток тепла между секциями определяется их разностью температур.

Таким образом, функция источника Q определяется лишь плотностью потока тепла между секциями

$$Q = q(z, T). \quad (3)$$

Изучим устойчивость такой модели по отношению к малым возмущениям в низкочастотном пределе, ограничившись тепловыми возмущениями в рамках ВКБ-приближения.

Линеаризуем уравнение (2), представив все функции в виде:

$$f(z, t) = f_0(z) + \tilde{f}(z, t), \quad (4)$$

где f_0 – равновесные распределения, $\tilde{f}$ – малое возмущение. Обозначим возмущенные величины проводимости, плотности и температуры соответственно $\tilde{\sigma}$, $\tilde{\lambda}$, $\tilde{T}$. Индексом «0» будем отмечать параметры, характеризующие равновесное состояние. В итоге имеем:

$$\begin{aligned} \rho_0 c_{v0} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_0 \frac{\partial \tilde{T}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\tilde{\lambda} \frac{\partial T_0}{\partial z} \right) + \tilde{q} = \\ &= \frac{d\lambda_0}{dz} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial z} + \lambda_0 \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial z^2} + \frac{d\tilde{\lambda}}{dz} \frac{\partial T_0}{\partial z} + \tilde{\lambda} \frac{\partial^2 T_0}{\partial z^2} + \tilde{q}. \end{aligned} \quad (5)$$

Выразим возмущенные параметры через возмущение температуры. В частности, для возмущения коэффициента теплопроводности имеем:

$$\tilde{\lambda} = \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T} \right)_0 \frac{\tilde{T}_0}{T_0} \lambda_0 = \left(\frac{d \ln \lambda}{d \ln T} \right)_0 \lambda_0 \frac{\tilde{T}}{T_0} = \delta_\lambda \lambda_0 \frac{\tilde{T}}{T_0}, \quad (6)$$

где

$$\delta_\lambda = \left(\frac{d \ln \lambda}{d \ln T} \right)_0. \quad (7)$$

Проводя аналогичные выкладки для плотности теплового потока, получаем:

$$\tilde{q} = \delta_q q_0 \frac{\tilde{T}}{T_0}, \quad (8)$$

где

$$\delta_q = \left(\frac{d \ln q}{d \ln T} \right)_0 = \frac{T_0}{q_0} \left(\frac{\partial q}{\partial T} \right)_0. \quad (9)$$

Дифференцируя $\tilde{\lambda}$ по z , получаем:

$$\frac{\partial \tilde{\lambda}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T} \Big|_0 \tilde{T} \right) = \left(\frac{\partial^2 \lambda}{\partial T^2} \right)_0 \frac{\partial T_0}{\partial z} \cdot \tilde{T} + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T} \right)_0 \frac{\partial \tilde{T}}{\partial z}. \quad (10)$$

В итоге уравнение (5) для решений вида $\propto \exp(-j\omega t + jkz)$ принимает вид:

$$\begin{aligned} -\omega \rho_0 c_{v0} \tilde{T} &= -\delta_\lambda \frac{\lambda_0}{T_0} \frac{dT_0}{dz} k \tilde{T} - j \lambda_0 k^2 \tilde{T} + \\ &+ \frac{dT_0}{dz} \left[j \left(\frac{d^2 \lambda}{dT^2} \right)_0 \frac{dT_0}{dz} - k \left(\frac{d\lambda_0}{dT_0} \right)_0 \right] \cdot \tilde{T} + \\ &+ j \frac{d^2 T_0}{dz^2} \delta_\lambda \lambda_0 \frac{\tilde{T}}{T_0} + j \delta_q q_0 \frac{\tilde{T}}{T_0}. \end{aligned} \quad (11)$$

Для мнимой части частоты ω имеем соотношение:

$$\rho_0 c_{v0} \operatorname{Im} \omega = -\lambda_0 k^2 + \left(\frac{dT_0}{dz} \right)^2 \frac{d^2 \lambda_0}{dT_0^2} + \frac{d^2 T_0}{dz^2} \delta_\lambda \frac{\lambda_0}{T_0} + \frac{\delta_q q_0}{T_0}. \quad (12)$$

Проанализируем выражение (12). Выясним условия, при которых мнимая часть частоты ω положительна ($\operatorname{Im} \omega > 0$), что свидетельствует о неустойчивых решениях уравнения (2). Данное обстоятельство имеет место при

$$k^2 < k_{crit}^2 = \frac{1}{\lambda_0} \left(\frac{dT_0}{dz} \right)^2 \left(\frac{d^2 \lambda_0}{dT_0^2} \right) + \frac{\delta_\lambda}{T_0} \frac{d^2 T_0}{dz^2} + \frac{\delta_q q_0}{\lambda_0 T_0}. \quad (13)$$

В коротковолновом пределе (при достаточно больших k), любые возмущения затухают с дек-

рементом $\operatorname{Im} \omega = -\frac{\lambda k^2}{\rho_0 c_{v0}}$. Следует отметить, что

рассматриваемая модель предполагает ограничения $kR \leq 1$.

Таким образом, устойчивость линейных возмущений в существенной мере определяется тепловым потоком между секциями и знаком величины $\frac{d^2 T_0}{dz^2}$. В частности, наиболее благоприятными для роста возмущений оказываются области, где имеют место соотношения $\frac{d^2 T}{dz^2} < 0$ и $(\delta_q \cdot q) < 0$, так как в этом случае имеем неустойчивые решения в соответствии с (13).

Предложенный в работе метод малых возмущений позволяет определить условия развития тепловой неустойчивости в зависимости от профиля температуры и теплового потока между секциями обмоток силового трансформатора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 52719-2007 «Трансформаторы силовые. Общие технические условия» Введ. 2007, №60-ст. – М.: Стандартинформ, 2007. – 45 с.
2. Рахимов, А. И. Способ повышения эксплуатационных характеристик высоковольтного электротехнического оборудования / А. И. Рахимов, В. П. Заярный, Л. В. Хоперскова // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 18 (145) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки»; вып. 6). – С. 66–68.
3. Киш, Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Л. Киш; пер. с венг. М. А. Бики. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.
4. Ванин, Б. В. Физические аспекты локального повышения температуры в охлаждающих каналах силовых трансформаторов с принудительной циркуляцией масла // Б. В. Ванин и др. – Электричество. – 2007. – № 1.
5. Хоперскова, Л. В. Устойчивость низкотемпературного плазменного шнура с учетом диссипации / Л. В. Хоперскова // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика, 2005. – № 9. – С. 157–160.

УДК 621.317

А. И. Нефедьев, А. В. Исаев, Д. К. Азарян

ЕМКОСТНОЙ ДЕЛИТЕЛЬ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: nefediev@rambler.ru

Рассмотрены свойства, достоинства, недостатки и области применения высоковольтных емкостных делителей напряжения. Приведена схема разработанного высоковольтного емкостного делителя напряжения. Представлено описание конструкции, принципа работы и результаты экспериментального исследования высоковольтного емкостного делителя напряжения.

Ключевые слова: емкостной делитель напряжения, конденсатор; экранирование, масштабный преобразователь, измерительная цепь, ФГТ-И, эквипотенциальная цепь, поверка.

A. I. Nefed'ev, A. V. Isaev, D. K. Azaryan

CAPACITIVE HIGH VOLTAGE DIVIDER ON GAS FILLED CAPACITORS

Volgograd State Technical University

The properties, advantages, disadvantages and fields of application of high-voltage capacitive voltage divider was 000000000. The scheme of the developed high-voltage capacitive voltage divider was presented. The description of the construction, principle of operation and experimental results on high-voltage capacitive voltage divider was.

Keywords: capacitive voltage divider, capacitor; shielding, large-scale transducer, measuring circuit, FGT-I, equipotential circuit, calibration.

Одной из актуальных проблем в настоящее время является повышение точности измерения высокого переменного напряжения, что обусловлено ростом потребления электроэнергии, поиском новых источников электроэнергии, внедрением мер по экономии энергоресурсов и повышением точности измерений энергетических величин при научных исследованиях и в промышленности. Для решения этой задачи часто используются емкостные делители на-

пряжения (ЕДН), которые по сравнению с активными делителями напряжения имеют меньшие размеры и стоимость [1].

Важным достоинством емкостных делителей является незначительное влияние на их коэффициент деления паразитных емкостей и ничтожное потребление активной энергии. Также преимуществом ЕДН является возможность их применения при измерениях высоких и сверхвысоких напряжений [2].

В качестве примера можно привести делитель высоких напряжений Н 861/400 производства фирмы *Haefely Test AG* (Швейцария), который предназначен для масштабного преобразования высоких напряжений переменного тока промышленной частоты в диапазоне действующих значений от $20\sqrt{3}$ до $500\sqrt{3}$ кВ и применяется для проведения проверок измерительных трансформаторов [3]. Также в качестве примера можно привести компактный емкостной делитель напряжения, предназначенный для работы с напряжениями амплитудой до 70 кВ [4].

ЕДН также применяются в составе емкостных трансформаторов напряжения. Такое решение позволяет использовать трансформаторы напряжения емкостного типа как масштабные преобразователи напряжения, а также и для подачи стандартных, пригодных к использованию напряжений в различных установках для мониторинга, измерения и защиты, и в то же время для изоляции защитного и измерительного оборудования от высокого напряжения системы. Их также используют и для обеспечения высокочастотной связи в электрических системах [5].

Преимуществом ЕДН является достаточно высокая температурная стабильность, которая достигается при условии равной температуры конденсаторов делителя [6].

Существующие ЕДН условно можно разделить на две группы: делители напряжения с сосредоточенными и распределенными емкостями на стороне высокого напряжения [7].

ЕДН с сосредоточенными емкостями содержат высоковольтный измерительный газонаполненный конденсатор в плече высокого напряжения, изоляция которого рассчитана на полное измеряемое напряжение, и плечо низкого напряжения. Преимуществом ЕДН с использованием высоковольтных измерительных газонаполненных конденсаторов является их линейность, постоянство коэффициента деления независимо от состояния окружающей среды и незначительное обратное влияние на источник напряжения.

Однако существенным недостатком ЕДН такого рода является сложность экспериментального определения коэффициента деления ЕДН при рабочем напряжении. ЕДН второго типа состоят из ряда последовательно соединенных конденсаторов в высоковольтном плече. Применение такого рода ЕДН предпочтительнее, так как их конструктивное исполнение позволяет осуществлять автономную (независимую) по-

верку, т. е. определять коэффициент деления ЕДН при рабочих напряжениях на каждом из конденсаторов, входящих в делитель [8].

Для проверки высоковольтных измерительных трансформаторов напряжения был разработан и построен высоковольтный емкостной делитель напряжения (ЕДН) на напряжения до $220/\sqrt{3}$ кВ с использованием газонаполненных конденсаторов типа ФГТ-И емкостью 0,1 мкФ [9].

Особенности построения разработанного ЕДН состоят в наличии одной измерительной и двух эквипотенциальных цепей (см. рисунок). Измерительная цепь состоит из n номинально равных и последовательно соединенных газонаполненных конденсаторов типа ФГТ-И емкостью 0,1 мкФ на напряжение 2 кВ, имеющих весьма малые потери и зависимость емкости от приложенного напряжения. Эквипотенциальные цепи состоят из n номинально равных и последовательно соединенных конденсаторов К74-14 емкостью 0,1 мкФ на напряжение 4 кВ.

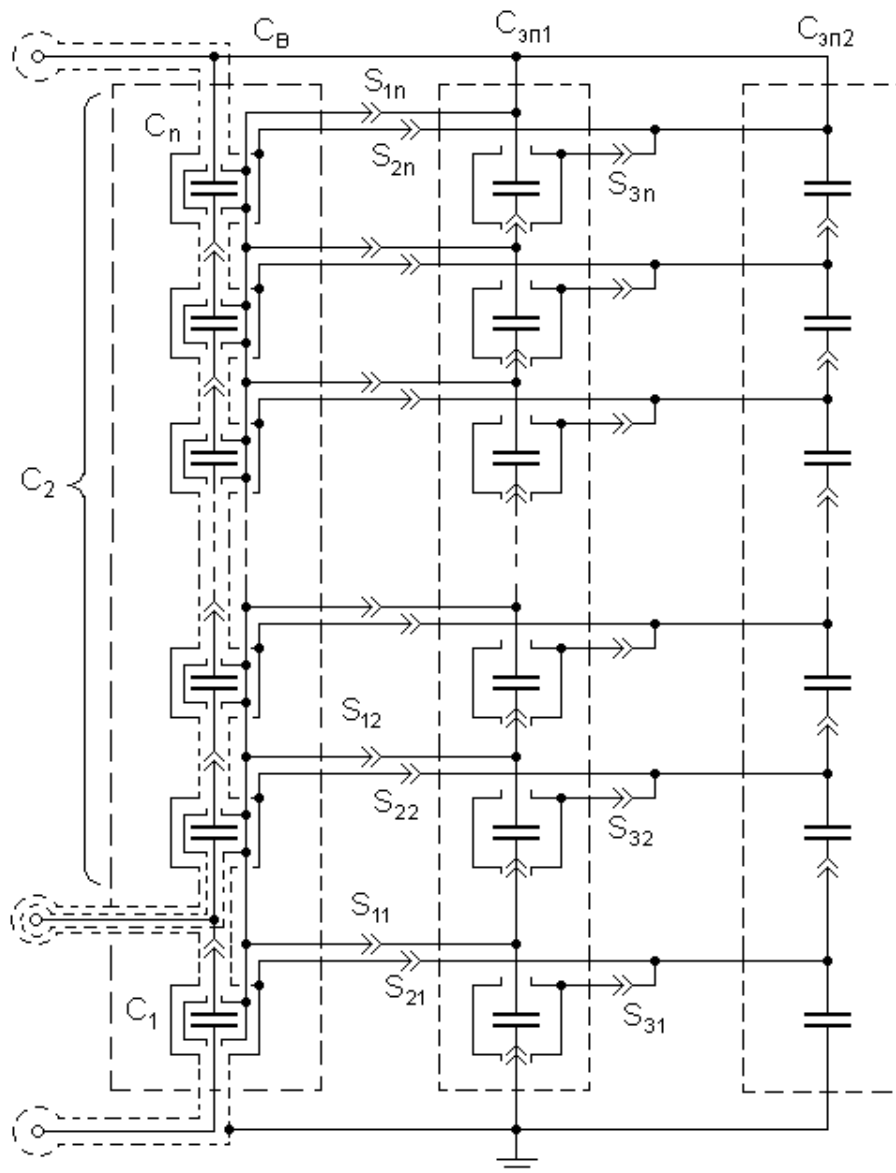
Высоковольтное плечо C_2 делителя C_B составлено из $(n-1)$ последовательно соединенных конденсаторов, помещенных в экраны, а низковольтное выходное плечо C_1 делителя состоит из одного конденсатора ФГТ-И, также помещенного в экран.

Конструктивно ЕДН выполнен в виде колонны из изоляционного материала, где конденсаторы измерительной и эквипотенциальной цепей размещены по окружности колонны в виде винтовой линии. Для защиты от пыли ЕДН помещен в кожух из винипласта.

Высоковольтный и низковольтный выводы ЕДН выполнены некоронирующими и изолированными. На высоковольтном выводе имеется зажим для подключения соединительного провода.

Эквипотенциальные цепи $C_{ЭП1}$ и $C_{ЭП2}$ выполнены аналогично измерительной цепи C_B . При этом защитный потенциал электродов измерительного ЕДН определяется соответствующим потенциалом эквипотенциального делителя $C_{Э1}$, а защитный потенциал экрана определяется соответствующим потенциалом эквипотенциального делителя $C_{ЭП2}$.

Конденсаторы измерительной цепи ЕДН с системой экранов соединены между собой при помощи коаксиальных разъемов, а к первой эквипотенциальной цепи они присоединены при помощи контактных гнезд $S_{11} \dots S_{1n}$, что обеспечивает возможность проведения независимой калибровки ЕДН.



Принципиальная схема составного емкостного делителя высокого напряжения

Измерительная цепь ЕДН содержит конденсаторы ФГТ-И в изолированном цилиндрическом корпусе с двумя выводами на общей оси. Конденсаторы измерительной цепи выполнены трехжжимными с двойным экранированием. Каждый из конденсаторов измерительной цепи помещен в металлические экраны в виде цилиндров разной высоты, которые электрически соединены с выводами конденсатора.

Размеры экранов подобраны таким образом, что первый экран охватывает один вывод и обкладку конденсатора, а второй экран охватывает второй вывод конденсатора. Экраны разделены при помощи фторопластового кольца. Защитный потенциал электродов каждой ступени измерительной цепи ЕДН определяется потенциалом первой эквипотенциальной цепи,

экраны которой укреплены на корпусе конденсатора через изолирующие втулки.

Соединение конденсаторов измерительной цепи ЕДН производится при помощи коаксиальных разъемов типа СР-50. Конденсаторы первой эквипотенциальной цепи ЕДН выполнены трехжжимными с одинарным экранированием и подключены к внешним экранам конденсаторов измерительной цепи посредством разъемов $S_{21} \dots S_{2n}$ и $S_{31} \dots S_{3n}$. Экраны второй эквипотенциальной цепи (на рисунке не показаны) представляют собой плоские металлические пластины на кожухе ЕДН и разделены между собой кольцом из изоляционного материала, а их потенциал определяется параметрами конденсаторов второй эквипотенциальной цепи.

Соединение конденсаторов измерительной и эквипотенциальных цепей при помощи коаксиальных разъемов обеспечивает возможность калибровки ЕДН методом независимой калибровки.

Следует отметить, что обеспечение постоянства коэффициента деления ЕДН в широком диапазоне измеряемых напряжений в решающей степени зависит от стабильности емкости конденсаторов, составляющих измерительную цепь C_B ЕДН.

Было проведено экспериментальное исследование зависимости примененных в измерительной цепи делителя емкости газонаполненных конденсаторов ФГТ-И от приложенного напряжения. Исследование производилось при помощи мостовой схемы с использованием электромагнитного компаратора токов, воздушного конденсатора емкостью 0,1 мкФ, источника напряжения и нулевого индикатора путем измерения разности емкости конденсаторов ФГТ-И при напряжении 100 В и в диапазоне напряжений 20...500 В. Изменение емкости конденсаторов ФГТ-И не превысило $\pm 0,002$ % при изменении напряжения на конденсаторах в указанном диапазоне.

Разработанный высоковольтный ЕДН предназначен для использования в составе средства проверки высоковольтных измерительных трансформаторов напряжения [4]. Небольшие размеры ЕДН позволили сделать данное средство проверки мобильным, что обеспечивает возможность проводить проверку трансформа-

торов напряжения при рабочем напряжении на месте их эксплуатации без демонтажа, что снижает затраты на их поверку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hickey, J. Survey identifies key trends in measurement systems / Instrumentation and Control Systems. – 1998, November, pp.155-158.
2. Киселев, В. В. Государственный первичный специальный эталон электрического напряжения стандартизованных грозовых и коммутационных импульсов в диапазоне от 1 до 1000 кВ / В. В. Киселев, С. А. Кононов // Законодательная и прикладная метрология. – 2013. – № 3. – С. 8–14.
3. Справочник средств измерения: [Электронный ресурс]. <http://www.kip-guide.ru/info/34826-07> (Дата обращения: 12.04.2017).
4. Бойко, Н. И. Компактный емкостной делитель напряжения на 70 кВ с экранированным промежуточным электродом / Н. И. Бойко, Л. С. Евдошенко, В. М. Иванов, О. А. Христенко // ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. – 2012. – № 6. – С. 41–46.
5. Каталог VCU: [Электронный ресурс]. URL: http://trafo-group.com/attachments/Каталог_VCU.pdf. (Дата обращения: 12.04.2017).
6. Волович, Г. И. Оценка температурной нестабильности высоковольтного емкостного делителя напряжения / Г. И. Волович, С. Н. Мунтянов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 152–158.
7. Scharle, C. R. A compact high-precision guarded volt box / C. R. Scharle // IEEE Trans. Instrum. And Means. – 1971. – Vol. 20, № 4. – P. 152–160.
8. Ломтев, Е. А. Принципы построения и конструкции высоковольтных емкостных делителей напряжения / Е. А. Ломтев, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 4 (10). – С. 4–8.
9. Полезная модель РФ №7209, МПК G01R35/02. Устройство для проверки высоковольтных измерительных трансформаторов напряжения / А. И. Нефедьев. Опубл. 16.07.1998.

УДК 623.44

Т. В. Копейкина

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ДОСТОИНСТВ И НЕДОСТАТКОВ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УСТРОЙСТВ ПЛАВНОГО ПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: kopeikina.tania@yandex.ru

В настоящей статье приведена информация по анализу существующих достоинств и недостатков при применении устройства плавного пуска электродвигателей. Рассматривается факт необходимости применения в современной технике данных устройств и в обязательном порядке использование устройства плавного пуска УПП электродвигателя. Отмечается, что за счет использования этого несложного электронного устройства снижается пусковая нагрузка на двигательные механизмы, а следовательно, увеличивается срок их службы. Обозначена проблема негативного влияния пускового тока на работу механизма. Отражены основные достоинства применения устройств плавного пуска электродвигателей, а также указаны мало известные неблагоприятные явления, возникающие при использовании устройств плавного пуска в маломощных сетях. Сделан вывод о целесообразности применения УПП в маломощных сетях, так как при острой необходимости предпочтение следует отдать более дорогим устройствам частотного пуска ЭД. Также уделяется внимание тому, что необходимо продолжить исследования малоизученных вопросов о появлении в сети переменного тока постоянных токов при возникновении пофазных несимметрий управления тиристорными ключами УПП, способов распознавания таких токов и построения соответствующих защит.

Ключевые слова: Устройство плавного пуска электродвигателя, пусковой ток, напряжение, ротор, сеть, достоинства, недостатки.

T. V. Kopeikina

ANALYSIS OF EXISTING STRENGTHS AND WEAKNESSES IN THE APPLICATION OF SOFT STARTERS OF ELECTRIC MOTORS

Volgograd State Technical University

This article presents information on the analysis of existing strengths and weaknesses in the application of soft starters of electric motors. Discusses the fact that the need for the application of modern technology in these devices and the mandatory use of the soft starter the soft starter of the motor. It is noted that by using this simple electronic device reduces starting load on motor mechanisms, and, hence, increases their lifespan. Outlines the problem of the negative impact of inrush current on the operation of the mechanism. Describes the main advantages of the use of soft start devices electric motors, and includes little-known adverse events arising from the use of soft start devices for low-power networks. The conclusion about inexpediency of application of the UPP in low-power networks, because when absolutely necessary, preference should be given to more expensive devices frequency launch ED. Attention is also paid to the fact that it is necessary to continue the study of the neglected issues of the emergence in the AC constant currents during the occurrence of asymmetry phase control thyristor keys SCP methods of detection of such currents and build appropriate protections.

Keywords: the soft starter motor starting current, voltage, rotor, chain, advantages and disadvantages.

В современной технике практически везде и в обязательном порядке используется устройство плавного пуска УПП электродвигателя. За счет использования этого несложного электронного устройства снижается пусковая нагрузка на двигательные механизмы, а следовательно увеличивается срок их службы.

При запуске любого электродвигателя, не оснащенного устройством плавного пуска, возникает пусковой ток, величина которого в несколько раз больше стандартного рабочего режима. В результате возникает просадка питающего напряжения, что нехорошо как для эксплуатируемого прибора, так и для остальных пользователей сети. Пуск занимает длительное время, что теоретически и практически (с течением времени) приводит к перегреву обмоток, разрушению их изоляции и отказу.

Использование простого по схеме устройства плавного пуска электродвигателя или электроинструмента позволяет избавиться от этого недостатка. Более того, при использовании для питания автономного генератора или нестабильного источника напряжения плавный пуск строго обязателен.

Цель исследования

Электропривод на основе асинхронного электродвигателя с частотным регулированием является одним из самых распространенных на сегодняшний момент. Это объясняется его повышенной надежностью, простой конструкцией и легкостью в обслуживании. Но несмотря на преимущества частотного регулирования, распространен и прямой пуск асинхронного двигателя (подключение к сети питания), имеющий существенные недостатки.

Одним из самых главных недостатков асинхронных электродвигателей с короткозамкну-

тым ротором, как отмечалось ранее, является наличие больших пусковых токов. Жесткие удары, происходящие в результате частых прямых пусков, влекут за собой электродинамические разрушения обмоток двигателя, а также увеличивают износ передаточного звена и исполнительного механизма. Ток, возникающий в момент прямого пуска, во много раз превышает номинальный, а это способствует просадке напряжения в сети, которая может вывести из строя или повредить различные электро-механизмы.

В том случае, если электродвигатель работает по алгоритму, в котором не задано регулирование скорости вращения, а подразумевается лишь выход на номинальную скорость, решение данных проблем заключается в установке устройства плавного пуска. Такое устройство характеризуется простотой в настройке, надежностью, функциональностью и удобством эксплуатации.

Все резко изменилось в наше время, так как благодаря прогрессу силовой электроники и микропроцессорной техники на рынке появились компактные, удобные и эффективные устройства плавного пуска электродвигателей (софтстартеры).

Устройства плавного пуска двигателей – это устройства, которые значительно увеличивают срок эксплуатации электродвигателей и исполнительных устройств, работающих от вала этого двигателя. При подаче напряжения питания обычным способом происходят процессы, разрушающие электродвигатель.

Результаты исследования

Пусковой ток и напряжение на обмотках двигателей в момент переходных процессов значительно превышают допустимые значения.

Это приводит к износу и пробое изоляции обмоток, «подгоранию» контактов, значительно сокращает срок службы подшипников как самого двигателя, так и устройств, «сидящих» на валу электродвигателя.

Для обеспечения необходимой пусковой мощности приходится увеличивать номинальную мощность питающих электрических сетей, что приводит к значительному удорожанию оборудования и перерасходу электроэнергии.

Кроме того, «просадка» напряжения питания в момент пуска электродвигателя может привести к порче оборудования, задействованного от этих же источников питания, эта же «просадка» наносит серьезный ущерб оборудованию электропитания, уменьшает срок его службы.

В момент пуска электродвигатель является серьезным источником электромагнитных помех, нарушающих работу электронного оборудования, запитанного от этих же электрических сетей или находящихся в непосредственной близости от двигателя.

Если произошла аварийная ситуация и двигатель перегрелся или сгорел, то в результате нагрева параметры трансформаторной стали изменятся настолько, что номинальная мощность отремонтированного двигателя может снизиться на величину до 30 %. В результате этот электродвигатель окажется непригодным к использованию на прежнем месте.

Устройство плавного пуска электродвигателей объединяет функции плавного пуска и торможения, защиты механизмов и электродвигателей, а также связи с системами автоматизации.

Плавный пуск с помощью софтстартера реализуется медленным подъемом напряжения для плавного разгона двигателя и снижения пусковых токов. Регулируемыми параметрами обычно являются: начальное напряжение, время разгона и время торможения электродвигателя. Очень маленькое значение начального напряжения может очень сильно уменьшить пусковой момент электродвигателя, поэтому оно обычно устанавливается 30–60 % от значения номинального напряжения.

При запуске напряжения скачком увеличивается до установленного значения начального напряжения, а потом плавно за заданное время разгона поднимается до номинального значения. Электродвигатель будет при этом плавно и быстро разгоняться до номинальной скорости.

Применение софтстартеров позволяет уменьшить пусковой «бросок» тока до минимальных

значений, уменьшает количество применяемых реле и контакторов, выключателей. Обеспечивает надежную защиту электродвигателей от аварийной перегрузки, перегрева, заклинивания, обрыва фазы, снижает уровень электромагнитных помех.

Преимущества использования устройства плавного пуска:

- снижение бросков тока в статоре электродвигателя в момент его запуска;
- обеспечение полного контроля перегрузок двигателя;
- устранение рывков в приводном механизме, что повышает эксплуатационный срок всего оборудования;
- устранение гидравлических ударов в трубопроводах при запуске насосных агрегатов;
- управление остановкой электродвигателя в заданный момент времени;
- при отключении в аварийной ситуации такое устройство обеспечивает предельное быстродействие.

Устройства плавного пуска электродвигателей просты в устройстве, монтаже и эксплуатации.

Наряду с многочисленными преимуществами использования УПП, существует ряд неблагоприятных факторов, возникающих при использовании данного устройства. Как показали результаты исследований, полученные петербургскими учеными [1], имеются случаи, когда применение УПП сопровождается появлением побочных негативных эффектов. Устройства плавного пуска (УПП) содержат включенные в каждой фазе попарно встречно-параллельно тиристорные ключи, позволяющие за счет фазового регулирования влиять на действующее значение первой гармоники напряжения на выводах ЭД. Выбором соответствующей программы изменения напряжения на статорной обмотке ЭД достигается желаемое уменьшение пусковых токов и связанных с ними величин провалов напряжения в питающей сети. Снижаются ударные воздействия на механические части электроприводов.

Но всегда следует иметь в виду, что реализуемый в УПП принцип подачи на ЭД пониженного напряжения неприемлем в случаях, когда пуски при прямой подаче номинального напряжения проходят недостаточно надежно и сопровождаются большими посадками напряжения.

Таким образом, несмотря на всю значимость использования УПП существует ряд не-

достатков технического решения при использовании данных устройств:

- возникновение при пусках больших гармонических искажений напряжений в питающей сети и особенно на выводах пускаемого ЭД. Вероятность появления резонансных усилений гармоник до неприемлемых уровней при наличии в сети емкостных элементов, например конденсаторных батарей;

- появление при пусках значительных по величине колебаний электромагнитных моментов на валу ЭД на частоте 300 Гц;

- появление в сети переменного тока постоянных составляющих токов при реально возможных несимметриях в углах регулирования тиристорных УПП [3].

Все вышесказанное свидетельствует о нецелесообразности применения УПП в маломощных сетях. При острой необходимости предпочтение следует отдать более дорогим устройствам частотного пуска ЭД.

Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Область применения относительно дешевых устройств УПП для осуществления плав-

ных пусков электродвигателей ограничена, поскольку реализуемый в данном случае принцип понижения напряжения на выводах СД возможен и эффективен только на объектах, на которых имеются легкие условия при прямых пусках.

2. Применению УПП в каждом конкретном случае должен предшествовать анализ допустимости появления в сети, хотя и кратковременных, но чрезвычайно мощных источников гармонических возмущений в напряжениях, токах и воздействующих на вал электромагнитных моментах.

3. Необходимо продолжить исследования малоизученных вопросов о появлении в сети переменного тока постоянных токов при возникновении пофазных несимметрий управления тиристорными ключами УПП, способов распознавания таких токов и построения соответствующих защит.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кучумов, Л. Устройства плавного пуска электродвигателей. Неоднозначность протекающих процессов / Л. Кучумов, А. Кузнецов, Д. Червочков // Новости ЭлектроТехники. – 2016. – № 3(99).

2. <http://malahit-irk.ru/index.php/2011-01-13-09-04-43/120-2011-05-08-03-41-19.html?fontstyle=f-larger>.

УДК 621.577

А. В. Бондаренко, А. В. Стрижиченко

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ПАРОКОМПРЕССИОННОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА

Филиал НИУ МЭИ в г. Волжском

e-mail: Strijichenko@yandex.ru

В работе рассмотрено влияние температуры низкопотенциального теплоносителя на показатели энергетической эффективности различных схем работы теплового насоса.

Ключевые слова: тепловой насос, температура грунта, энергетическая эффективность.

A. V. Bondarenko, A. V. Strizhichenko

ASSESSMENT OF POWER EFFECTIVENESS OF VARIOUS SCHEMES OF A VAPOR-COMPRESSION HEAT PUMP

Branch of national research university MPEI in Volzhsky

In work temperature effect of the low-potential heat carrier on indicators of power effectiveness of various schemes of work of a heat pump is considered.

Keywords: head pump, soil temperature, power effectiveness.

Введение

Необходимость повышения энергетической эффективности является неотъемлемой частью энергетической стратегии развития России до

2030 года. Тепловые насосы (ТН) используют возобновляемую энергию окружающей среды и затрачивают в 3–7 раз меньше первичной энергии, чем при использовании топлива тради-

ционными способами. Повышение энергетической эффективности ТН при совершенствовании схем и циклов является актуальной задачей исследований.

Работу парокompрессионного теплового насоса (ТН) характеризуют ряд энергетических показателей:

q_u – удельная тепловая нагрузка испарителя или холодильная мощность (удельная теплота, подводимая в испарителе к рабочему агенту на температурном уровне $T_o = const$ от объекта охлаждения):

$$q_u = h_1 - h_5 \quad (1)$$

На T, S -диаграмме (рис. 1) q_u определяется площадью 1-5-б-д-1.

q_k – удельная тепловая нагрузка конденсатора (удельное количество тепла, отведенное от агента в конденсаторе):

$$q_k = h_2 - h_3 \quad (2)$$

Величину q_k определяет площадь 2-3-в-е-2.

q_{no} – удельное тепло, отводимое в переохладителе:

$$q_{no} = h_3 - h_4 \quad (3)$$

Площадь 4-а-в-3-4 определяет величину q_{no} .

$l_{сж}$ – удельная внутренняя работа компрессора:

$$l_{сж} = h_2 - h_1 \quad (4)$$

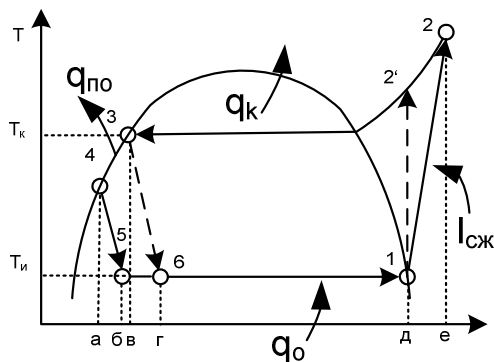


Рис. 1. Цикл парокompрессионного теплового насоса

Работа, которую нужно затратить для сжатия 1 кг агента, определяется площадью 1-5-4-3-2-1.

$\tau_{e,B}$ – эксергетическая температурная функция (коэффициент работоспособности тепла) в обратном цикле – величина, показывающая, какое количество работы необходимо было бы затратить на производство единицы тепла в температурном интервале $T_{o,c}/T$, если бы процесс трансформации осуществлялся посредством обратного цикла Карно:

$$\tau_{e,B} = 1 - \frac{T_{o,c}}{T} = \varepsilon_B \quad (5)$$

где ε_B – удельная затрата работы на производство тепла, $\varepsilon_B = \tau_{e,B}$. В реальных циклах ТН расход работы на единицу трансформируемого тепла зависит не только от температурного интервала цикла, но и от типа и технического совершенства установки.

μ – коэффициент трансформации показывает, какое количество тепла вырабатывается ТН к работе, затраченной на сжатие. Коэффициент трансформации тепла почти всегда больше 1:

$$\mu = \frac{q_{mn}}{l_{сж}} \quad (6)$$

μ_ε – коэффициент преобразования электроэнергии – отношение теплоты, переданной горячему теплоносителю к электроэнергии, подведенной к приводу:

$$\mu_\varepsilon = \frac{q_{mn}}{W} = \mu \cdot \eta_{эм} \cdot \eta_\varepsilon \quad (7)$$

ε_{mn} – удельный расход электроэнергии на единицу полученного тепла в теплонасосном цикле:

$$\varepsilon_{mn} = \frac{1}{\mu} = \frac{l_{сж}}{q} \quad (8)$$

Величина ε_{mn} показывает удельный расход электрической энергии (работы) на единицу подученного тепла в реальном теплонасосном цикле.

При равенстве ε_{mn} единице теплота вырабатываемая тепловым насосом, становится равной теплоте выработанной теплоте при прямом использовании электроэнергии на обогрев. Чем выше ε_{mn} , тем менее эффективна работа ТН.

Значения удельных расходов энергии и значения коэффициента μ могут служить исчерпывающими показателями технического совершенства ТН, так как не учитывают качество энергии (температурный потенциал производимого холода или тепла).

Более объективным показателем совершенства ТН служит эксергетический КПД установки η_e . Он позволяет сравнивать различные ТН, работающие в разных температурных режимах, или сравнивать эффективность одной и той же установки, работающей в различных режимах, выявляя тем самым оптимальный режим работы. Эксергетический КПД установки – отношение полезно использованной (отводимой) эксергии $ex_{вых}$ к подведенной эксергии $ex_{вх}$:

$$\eta_e = \frac{ex_{вых}}{ex_{вх}} = \frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_{mn}} \quad (9)$$

Оценка эффективности ТН посредством эксергетического КПД основана на сравнении удельной затраты работы на получение единицы тепла в данной реальной установке с затратами работа на производство единицы тепла

в идеальной установке, работающей по обратному циклу Карно.

Схема 1 (рис. 2, а). Процесс 1–2 – необратимый политропный процесс сжатия паров хладагента в компрессоре. Процесс 2–3 – изотермическая конденсация хладагента в конденсаторе и отдача теплоты высокопотенциальному теплоносителю. Процесс 3–4 – необратимый адиабатический процесс расширения хладагента в дроссельном вентиле. Процесс 4–1 – изотермическое испарение хладагента в испарителе за счет теплоты, отобранной у холодного теплоносителя.

Схема 2 (рис. 2, б). При большой разнице температур воды на входе и на выходе конденсатора в тепловых насосах перед дросселем ус-

танавливают дополнительный теплообменник – переохладитель (процесс 3–3а). При этом снижаются потери от дросселирования необратимость теплообмена. В схемах 1 и 2 для удаления остатков влаги после испарителя включает сепаратор.

Схема 3 (рис. 2, в). В некоторых случаях в схему парожидкостного теплового насоса включают регенеративный теплообменник. Его устанавливают таким образом, чтобы осуществить теплообмен между потоком горячего агента, направляющегося из конденсатора в дроссельное устройство, и потоком холодного агента, поступающего из испарителя в компрессор (процесс 3–3б, 1–1а).

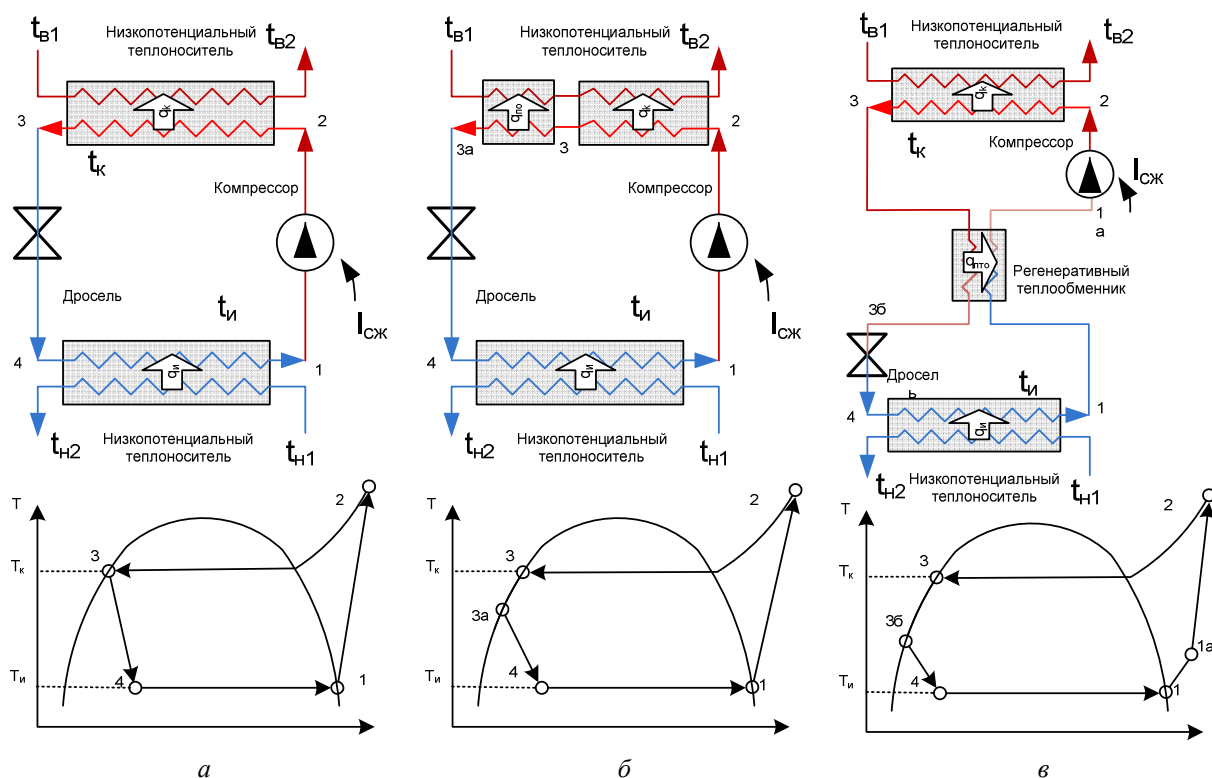


Рис. 2. Схемы и циклы работы парокompрессионного теплового насоса

В опыте проводилось численное моделирование работы различных схем ТН грунт–вода, при изменении температуры грунта.

Исходные данные: температура грунта (температура холодного теплоносителя на входе в ТН) $t_{н1} = -16 \dots -12$ °C; температура горячей воды после ТН $t_{в1} = 45$ °C; температура окружающей среды $t_0 = -10$ °C; перепады температуры на выходе из теплообменников: испарителя $\Delta t_{и} = 4$ °C, конденсатора $\Delta t_{к} = 5$ °C, переохладителя $\Delta t_{по} = 5$ °C; температура перегрева пара в промежуточном теплообменнике $\Delta t_{п} = 20$ °C.

Расчет схемы 1.

1. Температура испарения фреона:

$$t_u = t_{н2} - \Delta t_u;$$

температура конденсации:

$$t_k = \Delta t_{г1} + t_k.$$

2. Электромеханический КПД компрессора $\eta_{эм} = 0,9$, внутренний относительный КПД компрессора по приближенной формуле: $\eta_i = \frac{T_u}{T_k}$.

3. Параметры агента в характерных точках:

точка 1: $t_1 = t_{и}$. По температуре t_1 по таблицам термодинамических свойств хладагента

определяется энтальпия h_1 , давление p_1 , энтропия s_1 в точке 1.

точка 2': из точки 1 по линии постоянной энтропии спускаемся вверх до пересечения с изобарой p_2 , которая ответвляется от пограничной кривой насыщенного пара на уровне ее пересечения с изотермой t_k . Определяем параметры в точке 2'.

точка 2: энтальпия хладагента в точке 2 отличается от энтальпии хладагента в точке 1 на величину работы, совершенной компрессором, то: $h_2 = h_1 + \frac{h_{2'} - h_1}{\eta_i}$. Местоположение точки 2 определяется пересечением линии с энтальпией h_2 и изобары p_2 .

точка 3: $t_3 = t_k$; местоположение точки 3 определяется как результат пересечения изотермы t_3 и пограничной кривой кипящего хладагента

точка 4: $t_4 = t_u$. Процесс дросселирования изоэнтальпийный, поэтому $h_4 = h_3$.

Определяются удельные тепловые нагрузки в узлах насоса: q_u , q_k , $l_{сж}$, показатели энергетической эффективности μ , $\mathcal{E}_{\text{тн}}$, η_e .

Расчет схемы 2 с переохладителем отличается тем, что дополнительно необходимо найти

точку 3а. Температура фреона хладагента перед переохладителем:

$$t_{3a} = \frac{c'_{p3} \cdot t_k + c_g (\Delta t_{no} + t_{e1})}{c'_{p3} + c_g}, \quad (9)$$

где c'_{p3} – теплоемкость фреона после конденсатора, определяется по свойствам насыщенной жидкости и давлению p_k , c_g – теплоемкость воды.

Остальные параметры точки определяются по свойствам жидкого фреона при температуре t_{3a} и давлению p_k .

Расчет схемы 3 с регенеративным теплообменником. Отличие данной схемы в дополнительном определении точек 1а и 3б. По температуре в промежуточном теплообменнике Δt_n и температуре испарения t_u рассчитывается температура хладагента в точке 1а перед компрессором: $t_{1a} = t_u + \Delta t_n$. Параметры точки 1а определяются по давлению p_u и температуре t_{1a} . Энтропия $h_{3б}$ определяется из уравнения теплового баланса:

$$h_{3б} = h_3 - (h_{1a} - h_1) \quad (10)$$

Точка 4 определяется по значению энтальпии $h_{3б}$ и давлению p_k .

По результатам моделирования работы различных схем ТН построены графики зависимости $\mu_3 = f(t_u)$, $\mathcal{E}_{\text{тн}} = f(t_u)$, $\eta_e = f(t_u)$

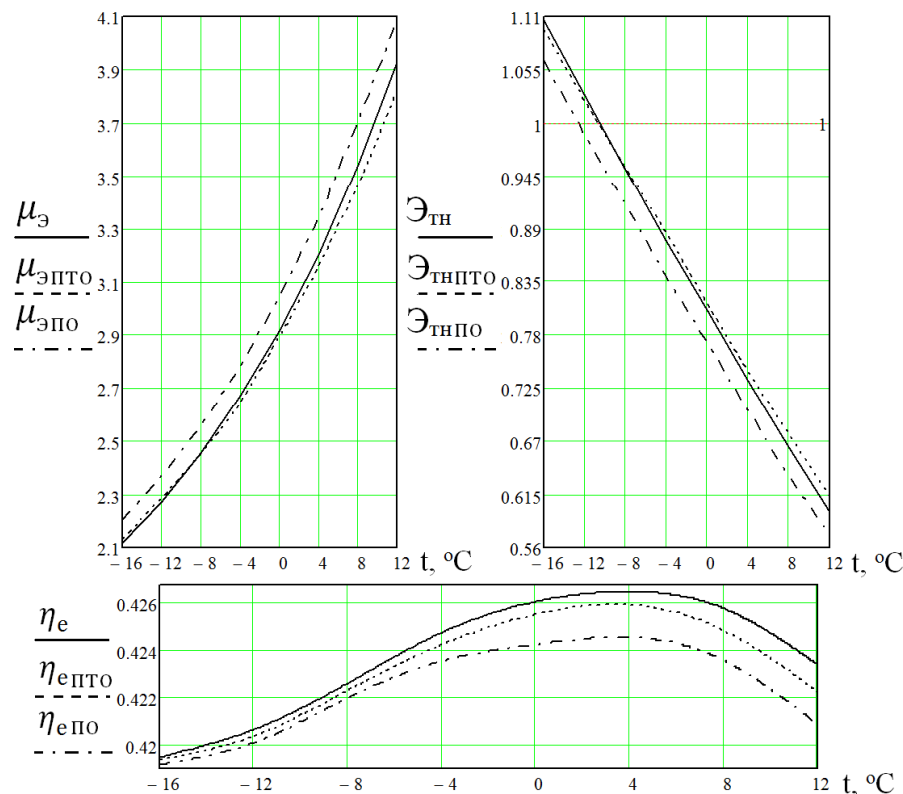


Рис. 3. Графики зависимости показателей энергетической эффективности ТН от температуры низкопотенциального источника тепла:

а – зависимость $\mu_3 = f(t_u)$; б – зависимость $\mathcal{E}_{\text{тн}} = f(t_u)$; в – зависимость $\eta_e = f(t_u)$. Индексы: пто – схема с промежуточным теплообменником, по – схема с переохладителем, без индекса – схема без дополнительных теплообменников

Выводы

Анализ графиков показывает: наибольший коэффициент трансформации во всем диапазоне температур в схеме с переохладителем. Введение в схему промежуточного теплообменника отрицательно сказывается на μ , при высоких температурах грунта; также скорость прироста μ , для схемы регенерацией при высоких температурах снижается по сравнению с другими схемами. При снижении температуры низкопотенциального источника $\varepsilon_{тн}$ растет, и при равенстве $\varepsilon_{тн}$ единице теплота, вырабатываемая тепловым насосом, становится равной теплоте, выработанной при прямом использовании электроэнергии на обогрев. Для схемы с переохла-

дителем эта температура имеет наименьшее значение. Эксергетический КПД для всех схем имеет ярко выраженный экстремум, это обстоятельство позволяет использовать η_e в качестве критерия оптимизации ТН. Для схемы без дополнительных теплообменников η_e имеет максимальное значение. Это объясняется большей близостью схемы 1 к идеальному циклу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гришин, С. С. Основы трансформации тепла: Курс лекций. Часть 2 / С. С. Гришин. – Волжский : ВФ МЭИ, 2008. – 65 с.
2. Трубаев, П. А. Тепловые насосы : учеб. пособие / П. А. Трубаев. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2009. – 142 с.

УДК 621.311

А. Н. Шилин, Д. Г. Сницарук, А. А. Степанов

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ДАЛЬНОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРИБОР КОНТРОЛЯ ПРОФИЛОГРАММ ОБЕЧАЕК

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: norzes@mail.ru

Рассмотрен оптико-электронный дальнометрический прибор контроля профилограмм обечаек, использующий в качестве метода поиска центра измеряемой детали спектральный метод, при котором снимается предварительная профилограмма, разлагаемая в ряд Фурье и по первой гармонике определяется смещение от центра. Для проверки выбранного метода было проведено математическое моделирование и реализован прототип профилографа, которые показали положительные результаты.

Ключевые слова: обечайка, труба, профилограмма, контроль профилограмм, оптико-электронные системы контроля, спектральный анализ профилограмм.

A. N. Shilin, D. G. Snitsaruk, A. A. Stepanov

OPTICAL-ELECTRONIC RANGEFINDER INSTRUMENT OF MONITORING PROFILOGRAMMS OF SHELLS

Volgograd State Technical University

An optical-electronic rangefinder device for monitoring the profilograms of shells is used. The spectral method is used as a method of searching for the center of the measured part. This method removes the preliminary profilogram that is decomposable into a Fourier transformation and the displacement from the center is determined from the first harmonic. To test the chosen method, mathematical modeling was carried out and a prototype of the profilograph was implemented, which showed positive results.

Keywords: shell, pipe, profilogram, profilograms control, opto-electronic control systems, spectral analysis of profilograms.

Введение

Основной базовой деталью аэрокосмической техники, нефтегазового, химического и энергетического оборудования является полая цилиндрическая деталь – обечайка. Размер диаметров обечаек может достигать сравнительно больших размеров (до 10 м). На заводах обечайки изготавливаются из листового материала

в валковых листогибочных машинах, а затем для придания заготовке формы замкнутой оболочки выполняется сварка листа по образующей. После сварки обечайки выполняется операция ее правки также в валковых листогибочных машинах. Технологическая точность производства обечаек оказывает существенное влияние на производительность работ при сборке

и монтаже оборудования, а также на эксплуатационные характеристики готовой продукции. Поэтому при производстве обечаек необходим контроль их геометрических параметров, определяемых отклонением реальной поверхности от базовой цилиндрической поверхности. Необходимо отметить, что качество обечаек оказывает существенное влияние на производительность сборочных и монтажных операций, а также на качество выпускаемого оборудования и его эксплуатационные характеристики. Основной геометрической характеристикой обечайки является профилограмма поперечного ее сечения.

В настоящее время на предприятиях отраслей, выпускающих крупногабаритное корпусное оборудование, в качестве средств контроля используются контактные средства и реже оптические на базе теодолита [1]. Необходимо отметить, что эти средства не обеспечивают необходимой точности и оперативности контроля, а в процессе формообразования в нагретом состоянии их невозможно использовать. Поэтому для повышения качества выпускаемой продукции необходимо внедрение современных приборов контроля геометрических параметров обечаек в процессе их формообразования. Для реализации операции контроля профилограммы необходимо предварительно определить центр поперечного сечения обечайки.

Из механики известен точный метод определения центра масс, применяемый для описания положения системы рассредоточенных масс в пространстве [2]. Однако для определения центра поперечного сечения крупногабаритных оболочек этот метод сложно применить из-за технической реализации.

В нефтегазовом машиностроении в качестве центра профилограммы, относительно которого осуществляют расчет отклонений [3], рекомендуют выбирать центр прилегающей окружности. Этот метод широко применяется при анализе профилограмм деталей машиностроения при токарной и шлифовальной обработке. Для крупногабаритных деталей, в форме поперечного сечения преобладает вторая гармоническая составляющая (эллипс), этот метод сложно алгоритмизировать и соответственно автоматизировать.

Для определения центра детали, в форме поперечного сечения которой преобладает эллипс, разработан метод прямоугольника [5], в котором в качестве центра профилограммы

выбирают центр прямоугольника. Этот метод сравнительно легко реализуется с помощью механических и оптико-электронных устройств, но для его реализации необходимы громоздкие конструкции [6, 7], что является недостатком этого метода.

Для решения этой задачи разработан спектральный метод контроля профилограмм [8], в котором центр выбирается произвольно, а затем из профилограммы алгоритмически исключается эксцентриситет. Недостатком этого метода погрешность вычисления большого значения эксцентриситета соизмерима с погрешностью контроля профилограммы.

Из проведенного анализа существующих методов и средств определения центра профиля поперечного сечения обечаек, относительно которого должен осуществляться контроль профилограммы, следует, что за основу целесообразно использовать спектральный метод.

Разработанное устройство

На рис. 1 изображена структурно-функциональная схема прибора для контроля профилограммы с лазерным дальномером.

Анализ процесса контроля поясняется схемой измерения (рис. 1). При анализе приняты следующие допущения:

- 1) поскольку размер допуска детали значительно превышает длину волны лазерного излучателя, то при анализе использованы законы геометрической оптики;
- 2) угол расхождения лазерного излучателя не учитывается;
- 3) при анализе методических погрешностей в качестве инструментальной погрешности использована основная составляющая – аддитивная погрешность.

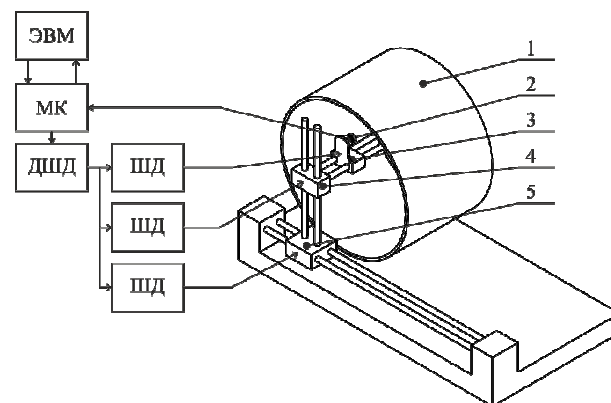


Рис. 1. Структурно-функциональная схема устройства: 1 – обечайка; 2 – профилограф; 3 – каретка профилографа; 4, 5 – каретки вертикального и горизонтального перемещения; ШД – шаговый двигатель; ДШД – драйвер шагового двигателя; МК – микроконтроллер; ЭВМ – электронно-вычислительная машина

Принципиальная электрическая схема устройства изображена на рис. 2.

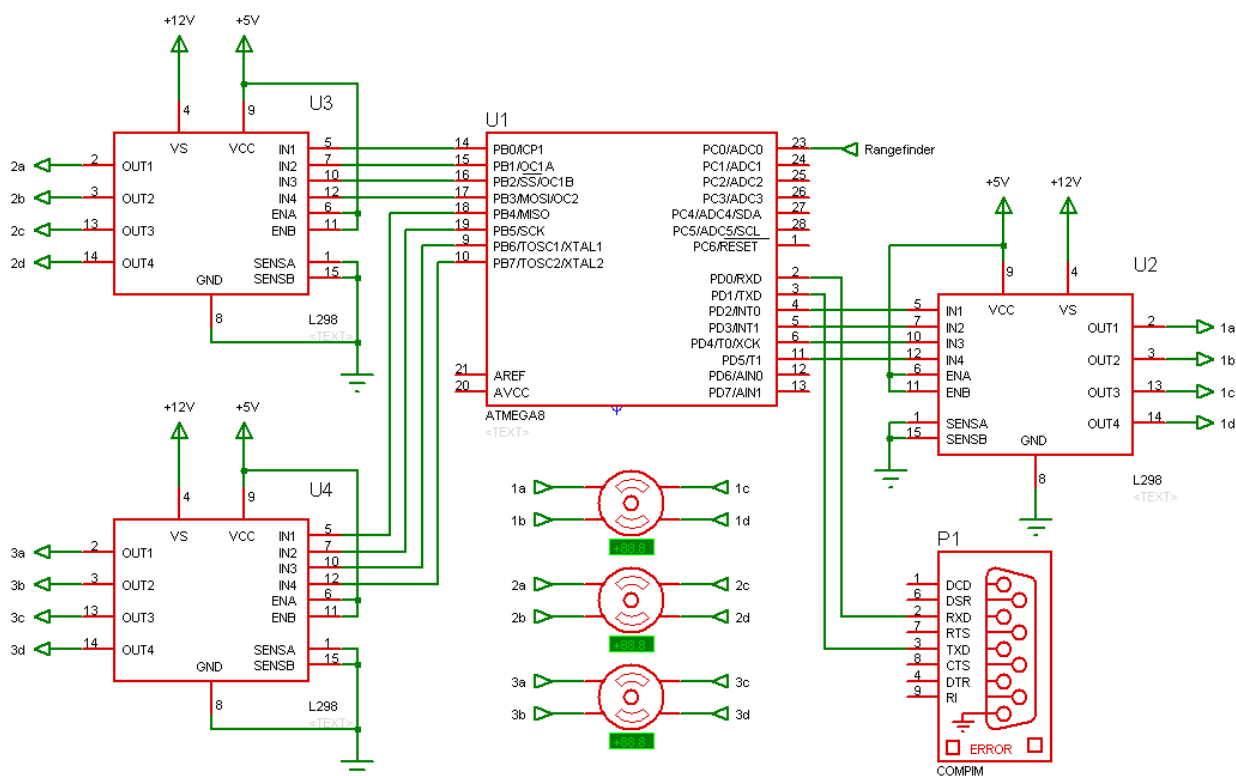


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема устройства

В устройстве используется лазерный дальномер с аналоговым выходом, подключенный к одному из каналов АЦП микроконтроллера. Биполярные шаговые двигатели управляются с помощью микросхем *L298M*, по одной на каждый из двигателей. Выходы *RXD* и *TXD* микроконтроллера подключены к *USB*-входу компьютера через преобразователь интерфейсов *UART-USB*. Выбор двигателя профилографа зависит от массы лазерного дальномера, двигателя перемещения профилографа – от массы и типа механизмов перемещения кареток, на которых установлен профилограф.

Устройство работает следующим образом. На первом шаге происходит предварительное снятие профилограммы по алгоритму, изображенному на рис. 3.

На втором шаге вычисляется значение смещения профилографа относительно текущих координат, на которое необходимо переместить профилограф для того, чтобы его координаты совпадали с координатами центра детали (рис. 4). Для этого сначала вычисляется комплексное значение первой гармоники по следующей формуле (1):

$$Re = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} r_n \cdot \sin \varphi_n ;$$

$$Im = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} r_n \cdot \cos \varphi_n , \quad (1)$$

где N – число отсчетов профилограммы, r_n – радиус вектор отсчета, φ_n – угол отсчета.

После чего вычисляется амплитуда и фаза гармоник (2):

$$M = \sqrt{Re^2 + Im^2}; P = \arctg\left(\frac{Im}{Re}\right) \quad (2)$$

По найденным значениям амплитуды и фазы первой гармоники определяется значение смещения (3):

$$dx = -M \cdot \frac{\sin P}{2}; dy = -M \cdot \frac{\cos P}{2} \quad (3)$$

На третьем шаге профилограф, с помощью шаговых двигателей смещается на величину найденного смещения, и на заключительном четвертом шаге мы вновь снимаем профилограмму с помощью алгоритма на первом шаге. После снятия профилограммы она сохраняется для дальнейшей обработки.

Для проверки разработанных алгоритмов была создана лабораторная установка, представляющая собой профилограф, состоящий из драйвера шагового двигателя, шагового двигателя и дальномера, подключенных к микрокон-

троллеру, который занимается передачей и приемом данных из ЭВМ. Для микроконтроллера была разработана программа, реализующая снятие профилограммы, для ЭВМ была разработана программа, отвечающая за сбор и анализ данных, а именно – вычисление величины смещения профилографа и сохранение профилограммы.

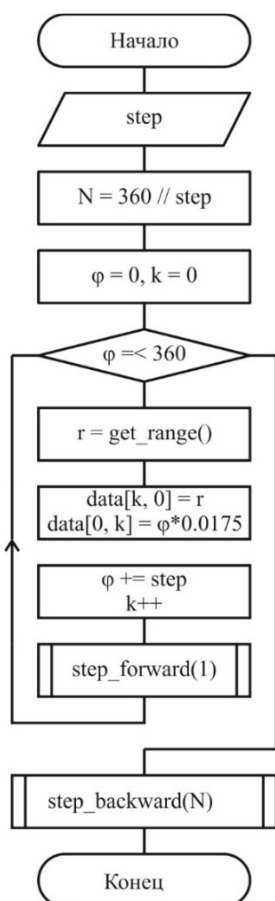


Рис. 3. Алгоритм снятия профилограммы

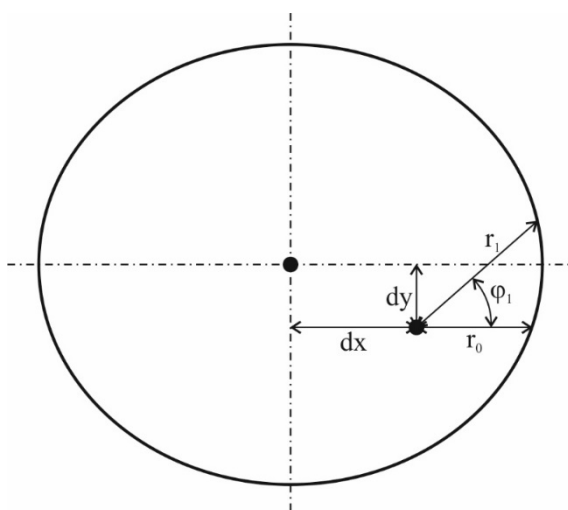


Рис. 4. Иллюстрация поиска значения смещения

Для проверки алгоритма поиска величины смещения профилографа в программе для ЭВМ был добавлен модуль, генерирующий эллипс со смещенным центром и случайно генерируемыми неровностями профиля, из которого измеряются величины радиус векторов и углов поворота. Экранная форма программы для ЭВМ изображена на рис. 5, б. Вторым модулем программы является модуль снятия профилограммы, с помощью которых происходит обмен данными с микроконтроллером, а после завершения процесса измерения профилограмма сохраняется для последующего отображения ее на дисплее ЭВМ и сохранения. Экранная форма данного модуля изображена на рис. 5, а (для тестирования программы данные о радиус-векторе с микроконтроллера поступали случайные).

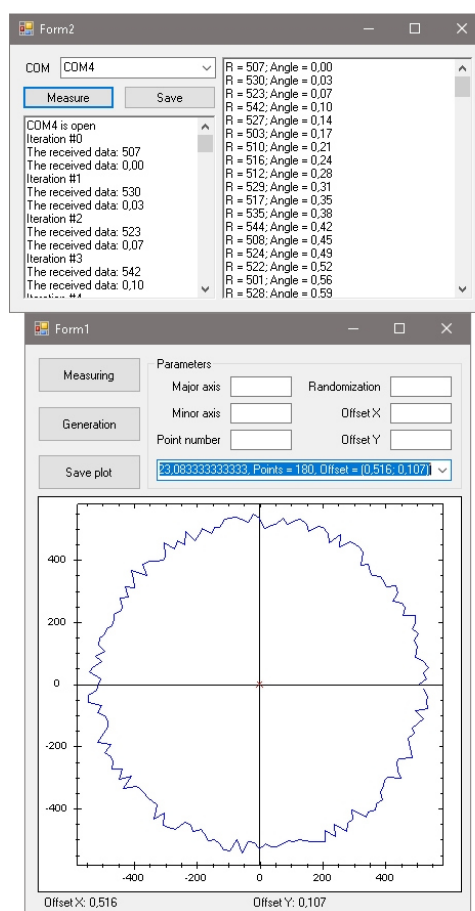


Рис. 5. Модуль снятия профилограммы: а – окно снятия профилограммы, б – построенная профилограмма

Заключение

Внедрение прибора в промышленность позволит повысить качество выпускаемой продукции, за счет использования информации о геометрических параметрах основных базовых деталей – обечаек. Эта информация позво-

лит реализовать оптимальную сборку оборудования с минимальными отклонениями сопрягаемых поверхностей. В результате такой сборки снижаются трудовые затраты и повышаются эксплуатационные характеристики выпускаемой продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шилин, А. Н. Анализ измерительных схем контроля формы и размера поперечного сечения обечаек в процессе правки / А. Н. Шилин, А. Б. Качоровский, А. И. Сутин // Технология и автоматизация машиностроения: науч. тр. Волгогр. политехн. ин-та. – Волгоград, 1975. – Вып. VI. – С. 126–131.
2. Шилин, А. Н. Определение центров профилограмм обечаек при сборке корпусов нефтеаппаратуры / А. Н. Шилин, С. А. Петров // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – № 9. – С. 15–19.
3. ГОСТ 28187-89. Основные нормы взаимозаменяемости. Отклонения формы и расположения поверхностей.

Общие требования к методам измерений. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1996. – 19 с.

4. Шилин, А. Н. Анализ методов и схем измерения геометрических параметров обечаек в процессе их формообразования / А. Н. Шилин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – № 9. – С. 44–52.

5. Шилин, А. Н. Анализ методических погрешностей определения геометрических параметров оболочек вращения дальнометрическим способом / А. Н. Шилин, С. А. Петров // Приборы. – 2011. – № 1. – С. 52–57.

6. Пат. 159150 РФ, МПК G01B11/00. Оптико-электронное устройство для измерения размеров обечаек / Д. Г. Сницарук, А. Н. Шилин; ВолгГТУ. – 2016.

7. Шилин, А. Н. Оптико-электронная система контроля профилограмм внутренних поверхностей обечаек / А. Н. Шилин, Д. Г. Сницарук // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 11 (176) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь»; вып. 12). – С. 74.

8. Пат. 2426067 РФ, МПК G 01 B 5/00. Способ измерения геометрических параметров оболочки вращения / С. А. Петров, А. Н. Шилин; ВолгГТУ. – 2011.

УДК 53.088

А. Н. Шилин, А. М. Булаев

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ГОРЮЧЕСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ С ПОЛИМЕРНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: eltech@vstu.ru

В статье приведен анализ процессов горения полимерных материалов, методов и средств контроля горючести и токсичности полимерных материалов. На основе анализа выявлены недостатки существующих методов и средств контроля и сформулированы задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова. Электрические кабели. Полимерная оболочка. Горючесть полимерных материалов. Токсичность полимерных материалов. Стенды контроля горючести.

A. N. Shilin, A. M. Bulaev

THE ANALYSIS OF METHODS AND CONTROL DEVICES OF COMBUSTIBILITY OF ELECTRIC CABLES WITH THE POLYMERIC COVER

Volgograd State Technical University

The article contains analysis of processes of burning of polymer materials, methods, and means of controlling flammability and toxicity of polymer materials. Based on the analysis of the identified shortcomings of the existing methods and means of control and formulated the problem for further research.

Keywords: Electric cables. Shell polymer. Flammability of polymeric materials. The toxicity of polymer materials. Stands control flammability.

В настоящее время в энергетике широко внедряются полимерные материалы в качестве оболочек изоляции для проводов, так как это экономически выгодно.

Основным требованием к таким материалам является их негорючесть, поскольку именно кабели являются источниками пожаров. В отличие от натуральных строительных материалов при горении полимерных материалов выделяются токсичные вещества, которые могут вызвать у человека отравление угарными газами.

Поэтому необходимо данные материалы нормировать при производстве – требования гарантий безопасности.

Для решения этих задач были разработаны ГОСТы и соответствующие испытательные стенды (ГОСТ Р МЭК 60331-11-2012, ГОСТ ИЕС 60331-12-2011, ГОСТ ИЕС 60332-3-25-2011 и др.).

Необходимо отметить, что в основном ГОСТы были разработаны около 30 лет назад и в настоящее время не удовлетворяют современным требованиям. Поэтому ГОСТы должны периодически совершенствоваться, а соответствующие стенды разрабатываться с учетом требований новых ГОСТов. На текущий момент в РФ практически не выпускались стенды для исследования и анализа полимерных материалов.

По этой причине продукция часто выпускалась без контроля на горючесть и токсичность. Поступление зарубежных средств контроля ограничено из-за санкций, поэтому для решения актуальной задачи, а именно повышения уровня безопасности полимерных материалов, необходимо разрабатывать и внедрять современные стенды контроля горючести и токсичности материалов.

Физические и химические основы горения полимерных материалов

Основным условием, ограничивающим внедрение различных полимерных материалов, выражается их пожарная опасность, вызванная горючестью и сопутствующими процессами. Пожарная опасность материалов и изделий из них обуславливается в технике характеристиками, такими как *горючесть*, то есть способность материалов загораться, поддерживать и распространять процесс горения; *дымовыделение*; *токсичность продуктов горения и пиролиза* – разложения вещества под действием высоких температур; *огнестойкость конструкции*, то есть функция по сохранению физико-механических (прочность, жесткость) и функциональных свойств изделия при контакте с открытым источником огня. В свою очередь, горючесть – это комплексная характеристика материала или конструкции. Она состоит из следующих величин: температуры воспламенения или самовоспламенения; скорости выгорания и распространения пламени по плоскости; предельные конфигурации, описывающие условия, при которых возможен самоподдерживающийся процесс горения [1].

Горение полимеров является по сути очень сложным физико-химическим процессом, включающим в себя как химические реакции деструкции, сшивания и карбонизации полимера в конденсированной фазе (а также реакции метаморфоза и окисления), так и физические процессы интенсивных тепло- и массопередачи. Реакции в конденсированной фазе в основ-

ном приводят к двум главным типам продуктов: 1) газообразным веществам (горючим и негорючим) и 2) твердым продуктам (углеродсодержащим и минеральным). При протекании реакции в газовой фазе в предпламенной области образуются топливо для пламени, сажа и пр.

Ярко выраженной особенностью химии пламени проявляется присутствие сложного пространственного распределения температуры и концентраций исходных и промежуточных веществ и продуктов, а также для большинства полимеров (а тем более полимерных материалов) – наличие немалого количества разнообразных продуктов деструкции как в конденсированной, так и в газовой, предпламенной области. Все это чрезвычайно затрудняет проведение исследований опытным путем и создание строгих количественных теорий процессов горения полимеров, которые бы учитывали все химические и другие особенности конкретных систем. Тем не менее, для взаимодействия открытого источника пламени и полимерных материалов в большинстве случаев характерны некоторые общие качественные закономерности [2].

Процессы горения полимеров можно разделить на обычное газовое и гетерогенное горение, или тление. В первом случае большая часть тепла, влияющего на поддержание самостоятельного химического превращения, выделяется в газовой фазе при окислении газообразных веществ деструкции полимера. При этом область максимальной скорости выделения тепла (газовое пламя) как правило на расстоянии порядка миллиметра и более от поверхности в зависимости от конкретных условий горения. В этом случае как правило поверхность полимера имеет значительно более низкую температуру нежели область непосредственно газового пламени. Температуры поверхности составляют 400–650 °C, а максимальные температуры в газовой фазе достигают 1100–1200 °C и более. При тлении же все наоборот основная часть тепла выделяется именно в поверхностном слое конденсированной фазы, где и наблюдаются максимальные температуры (800–900 °C).

При горении органических полимерных материалов окислителем является кислород воздуха, а горючим – водород и углеродсодержащие газообразные продукты деструкции полимера, которые посредством окисления превращаются в воду и углекислый газ или – при

неполном окислении – в угарный газ (СО). Потоки горючего и окислителя в таком случае пространственно разделены, и химическая реакция их взаимодействия обычно лимитируется подачей реагентов к пламени диффузией или конвекцией. Газовое пламя носит тепловой характер, то есть его существование определяется наличием достаточно большого теплового эффекта при сгорании продуктов деструкции полимера и сильной температурной зависимостью скорости реакции окисления (большого значения эффективной энергии активации).

Воспламеняемость и дымообразование

Воспламеняемости материалов определяют по ГОСТу 30402-96 «Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость», который соответствует международному стандарту ISO 5657-86. При этом испытании поверхность образца подвергают воздействию лучистого теплового потока и воздействию пламени от источника зажигания. При этом измеряют поверхностную плотность теплового потока (ППТП), то есть величину лучистого теплового потока, воздействующего на единицу площади поверхности образца. В конечном итоге определяют Критическую поверхностную плотность теплового потока (КППТП) – минимальное значение поверхностной плотности теплового потока (ППТП), при котором возникает устойчивое пламенное горение образца после воздействия на него пламени.

В зависимости от значений КППТП материалы подразделяют на три группы воспламеняемости, указанные в таблице [3].

Группы воспламеняемости материалов

Группа воспламеняемости по ГОСТ 30402-96	Название по СНиП 21-01-97	КППТП кВт/м ²
B1	Трудно воспламеняемые	>35
B2	Умеренно воспламеняемые	20...30
B3	Легко воспламеняемые	<20

Группа по токсичности продуктов горения полимерных материалов определяется по ГОСТ 12.1.044. Продукты горения образца материала направляются в специальную камеру, где находятся подопытные животные (мыши). В зависимости от состояния подопытных животных после воздействия на них продуктов горения (включая летальный случай) материалы подразделяются на четыре группы:

- T1 – мало опасные;
- T2 – умеренно опасные;
- T3 – высоко опасные;
- T4 – чрезвычайно опасные.

Для классификации материалов по дымообразующей способности используют значение коэффициента дымообразования, который определяется по ГОСТ 12.1.044.

Коэффициент дымообразования – показатель, характеризующий оптическую плотность дыма, образующегося при пламенном горении или термоокислительной деструкции (тлении) определенного количества твердого вещества (материала) в условиях специальных испытаний.

В зависимости от величины относительной плотности дыма материалы подразделяются на три группы:

Д1 – с малой дымообразующей способностью – коэффициент дымообразования до 50 м²/кг включительно;

Д2 – с умеренной дымообразующей способностью – коэффициент дымообразования от 50 до 500 м²/кг включительно;

Д3 – с высокой дымообразующей способностью – коэффициент дымообразования свыше 500 м²/кг.

Современные методы испытаний кабельных изделий из полимерных материалов

Известен способ определения горючести электрических кабелей, заключающийся в размещении образца в камере с подводом к образцу тепла в течение установленного времени. После прекращения воздействия тепла о горючести образца судят по длине обгоревшего участка.

Однако этот метод не позволяет количественно оценить горючесть кабелей, так как он не обеспечивает хорошей воспроизводимости результатов и дает только качественную оценку.

Известен также способ определения горючести электрических кабелей, заключающийся в размещении в камере эталона с подводом в камеру тепла, обеспечивающего в ней заданный температурный режим с последующим помещением в указанную камеру образца и подведением в камеру тепла идентично подведению тепла в камеру с помещенным в ней эталоном, с замером суммарного количества тепла в камере и определением степени горючести по соотношению выделившегося количества тепла к подводимому.

Однако при таком способе не учитываются реальные условия развития пожара в кабельных сооружениях, что не дает возможности оценить

горючесть кабелей различного конструктивно-го исполнения и приводит к большому разбросу экспериментальных данных [4].

Дымообразование можно определить с помощью дымомера. Обычно дымомеры требуют искусственного подвода анализируемого газа. Анализируемый дым засасывается из дымохода 5 в измерительную часть прибора и сбрасывается опять в дымоход.

Дымомер состоит из трубки и размещенных в ней источника света 1, линз 3 и 4 и детектора светового излучения 2. В дымомерах в качестве детекторов излучения применяются, как правило, селеновые фоторезисторы или фотоэлементы. Схема одного из приборов приведена на рисунке.

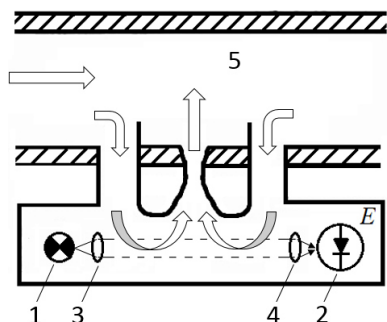


Схема дымомера с искусственным подводом анализируемого дыма

Расположение чувствительного фотоэлемента вне потока анализируемого потока дыма наиболее целесообразно при определении интенсивности дыма в топочных газах, поскольку при этом исключается неблагоприятное влияние высокой температуры. Кроме того, устройство можно легко очистить от сажи и других механических примесей.

Недостатком является то, что дымомер содержит сложную конструкцию и имеет ограниченную точность, связанную с тем, что концентрация взвешенных частиц в побочном ответвлении, где находится чувствительный фотоэлемент немного отличается от действительной концентрации в основном дымоходе. Это отличие проявляется как источник погрешности измерения плотности дыма.

Большинство применяемых дымомеров используют сравнительно простую схему измере-

ния без компенсации влияния внешних факторов. Эти устройства содержат источника света, оптическую часть, фотоприемник и индикатор. Источником света является, как правило, лампа накаливания с рефлектором, питающаяся через стабилизатор напряжения. В качестве фотоприемника используется селеновый фотоэлемент.

Шкала дымомера обычно разделена на несколько делений, характеризующих степень загрязнения дыма. Отклонение указателя измерительного прибора весьма ориентировочно дает представление о концентрации взвешенных частиц в анализируемой среде. При определенных условиях шкалу можно проградуировать в весовых или объемных процентах.

Всем дымомерам присущ один недостаток – на результат измерения оказывает влияние фон, который попадает в дымоход, и дрейф нуля фотоприемника. Кроме того, при малых размерах канала измерения оказывает влияние неравномерность задымленности.

Из проведенного анализа следуют дальнейшие задачи развития методов и средств контроля горючести полимерных материалов: разработка управляемых и стабилизированных источников нагрева, усовершенствование источников освещения с целью обеспечения равномерного и стабильного светового потока, модуляция светового потока, разработка фотоприемников с автоматической коррекцией погрешности, внедрение микроконтроллеров для обработки результатов измерения и управление процессом контроля и исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берлин, А. Л. Горение полимеров и полимерные материалы пониженной горючести / А. Л. Берлин. – Москва : Энергоатомиздат, 1996. – 80 с.
2. Асеева, Р. М. Горение полимерных материалов / Р. М. Асеева, Г. Е. Заиков. – Москва : Химия, 1981. – 272 с.
3. Группы горючести и группы воспламеняемости [Электронный ресурс] / ВЛКЗ «Олива. – 2017. – Режим доступа: <http://aquamast-rt.ru/gruppy-goryuchesti-i-gruppy-vosplam/> (дата обращения: 26.03.2017).
4. Описание изобретения к авторскому свидетельству 871048 (61) [Электронный ресурс] / Способ определения горючести электрических кабелей. – 2014. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/87/871048.html/> (дата обращения: 28.03.2017).

УДК 617.57-77, 617-7

*А. Е. Городецкий, И. Л. Тарасова, В. Г. Курбанов***АДАПТИВНАЯ ИСКУССТВЕННАЯ КИСТЬ РУКИ*****Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, РФ**

e-mail: g27764@yandex.ru

При решении современных задач протезирования актуально создание адаптивных бионических захватов, имитирующих работу кисти рук. Цель данной работы – разработать новую структуру адаптивного захвата, приспособляющегося к захватываемому предмету за счет изменения формы и жесткости пальцев захвата. Предложен новый тип бионического адаптивного захвата, имитирующего работу кисти руки и позволяющего адаптироваться к окружающей среде за счет управления жесткостью, размерами и формой фаланг пальцев. Предложенный адаптивный бионический захват с управляемой жесткостью и формой снабжен соответствующей системой автоматического управления и может использоваться в медицинском протезировании.

Ключевые слова: биологические системы, адаптивный захват, бионический захват, искусственная кисть руки, протезирование кисти рук, ладонь, пальцы, фаланги.

*A. E. Gorodetskiy, I. L. Tarasova, V. G. Kurbanov***ADAPTIVE ARTIFICIAL HAND****Institute of Problems of Mechanical Engineering of RAS**

In solving modern problems of prosthetics actual creation of adaptive bionic grippers, simulating work hands. The purpose of this work – to develop a new structure of adaptive gripping, adapting to the fascinating subject by changing the shape and rigidity of the gripping fingers. Results: A new type of bionic adaptive capture, simulating the operation of the brush hands allowing to adapt to the environment by controlling rigidity and shape of phalanges. Practical significance: proposed bionic adaptive capture from controllable rigidity and shape is provided with a corresponding automatic control system and can be used in medical prosthetics.

Keywords: biological systems, adaptive capture, bionic capture, artificial hand, prosthetic hand brush, palm, fingers, phalanges

Введение

В последние годы огромное внимание уделяется созданию функциональных протезов кисти руки, которые имитируют сложность и адаптивность биологических систем. Исследование и разработка подобных робототехнических систем, становятся одной из главных целей исследований в области робототехники [1, 2], в том числе и для медицинского назначения, например, медицинские микророботы, способные перемещаться по кровеносным сосудам [3].

Значительный прогресс достигнут в области создания систем управления протезами кисти руки. В частности, фирма Touch Bionics выпустила на мировой рынок стационарные и полностью съемные электронные роботизированные протезы кистей рук и отдельных пальцев [4]. Они имеют унифицированные взаимозаменяемые узлы, в том числе и фаланги пальцев, которые питаются от аккумуляторов и программируются через интерфейс Bluetooth.

Наиболее продвинутый из всех существующих на сегодняшний день протезов кистей рук с точки зрения ее управляемости является бионическая кисть британской компании BeBionic

[5]. В ней используется миоэлектрическая система управления, дополненная возможностью тонкой донастройки устройства пользователем. При этом человек сам может установить силу захвата, а также реакцию протеза на те, либо иные предметы, скорость реагирования устройства и ряд других параметров. Затем передать данную информацию по беспроводному каналу в миоэлектрическую систему управления кистью. Миоэлектрическая система, в свою очередь, считывая мышечные импульсы на сохранном участке конечности, позволяет пользователю легко распоряжаться бионической кистью, как своей собственной рукой.

В то же время эффективность функционирования таких устройств существенно зависит от способности адаптироваться к размерам и форме захватываемых объектов. В этом отношении одной, из наиболее сложной и трудно решаемой проблемой, является создание управляемых миниатюрных и энергоэффективных механизмов, обеспечивающих захват и адаптацию.

Известны адаптивные хватные устройства, например, описанные в [6], которые включают систему управления и корпус с установлен-

© Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Курбанов В. Г., 2017

* Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 16-29-04424.

ными на нем пальцами. Пальцы захвата [7] содержат множество фаланг, каждая из которых приводится в действие управляемым электроприводом. Они имеют сенсоры касания, которые включены в систему управления электроприводами в качестве датчиков обратной связи. При этом используются два уровня датчиков, обеспечивающих получение информации об ориентации захватываемого объекта. В качестве индивидуальных приводов в фалангах обычно используются сервоприводы с встроенным моментным очувствлением, а контактные поверхности фаланг оснащены тактильными датчиками (ТД).

Основным недостатком подобных устройств является низкая надежность захвата объектов из-за отсутствия адаптации формы поверхности пальца к форме захватываемого объекта, что обусловлено невозможностью изменения размеров ладони и пальцев устройства, что также ограничивает размеры захватываемого объекта. При решении этой проблемы в устройствах ладони и пальцев кисти могут быть использованы модули SEMS, имитирующие работу мышц животных и человека [8]. Адаптивность подобных захватов может быть осуществлена за счет управления формой платформ модулей SM5 SEMS [9], образующих ладонь и фаланги пальцев кисти, а также за счет управления жесткостью специальных модулей жесткости [10], помещаемых между фалангами пальцев захвата.

Устройство адаптивной искусственной кисти

Предлагаемая конструкция адаптивной искусственной кисти содержит систему управления и электромеханическую систему, имитирующую ладонь с установленными на ней паль-

цами. Каждый палец состоит из фаланг с индивидуальными приводами, с контроллерами и тактильными датчиками (ТД) на контактных поверхностях. Но в отличие от рассмотренных выше, ладонь и фаланги пальцев выполнены в виде однотипных модулей SM5 SEMS.

Модули SEMS [9] содержат (рис. 1) верхнюю и нижнюю платформы, которые через шарниры соединены между собой шестью ногами, позволяющими перемещать одну платформу относительно другой по трем линейным и трем угловым координатам за счет управляемого изменения длин ног.



Рис. 1. Внешний вид модуля SEMS

Платформы модулей SM5 SEMS содержат (рис. 2) опорные и крепежные площадки, соединенные между собой телескопическими и управляемыми стержнями, позволяющими изменять размер и форму платформ за счет управления приводами управляемых стержней. Управление перемещениями, изменением размеров и форм платформ осуществляется встроенной нейропроцессорной системой управления.

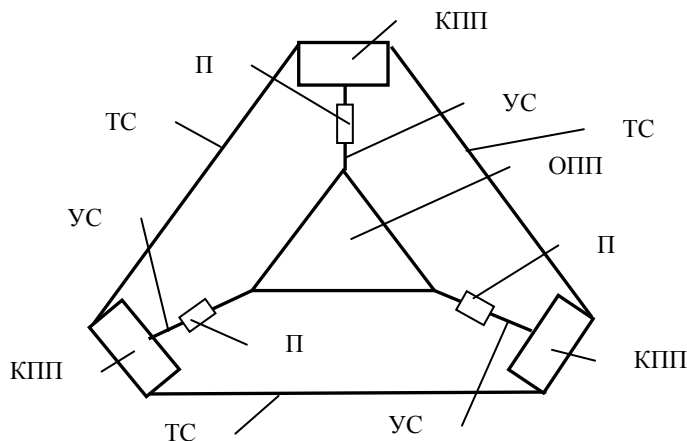


Рис. 2. Схема конструкции платформы модуля SM5 SEMS:
ОПП – опорная площадка платформы, КПП – крепежная площадка платформы,
ТС – телескопические стержни, УС – управляемые стержни, П – привода

Пальцы могут содержать минимум три фаланги (Ф1, Ф2, Ф3) (рис. 3). Тогда к крепежным площадкам (КП) верхних платформ модулей третьих фаланг пальцев присоединяются КП нижних платформ модулей вторых фаланг, а к КП верхних платформ модулей вторых фаланг присоединяются КП нижних платформ

модулей первых фаланг. На внешних поверхностях КП модулей фаланг пальцев расположены тактильные датчики. Между фалангами пальцев могут устанавливаться блоки с управляемой жесткостью (БУЖ). Количество фаланг и пальцев при необходимости может меняться как в большую, так в меньшую сторону.

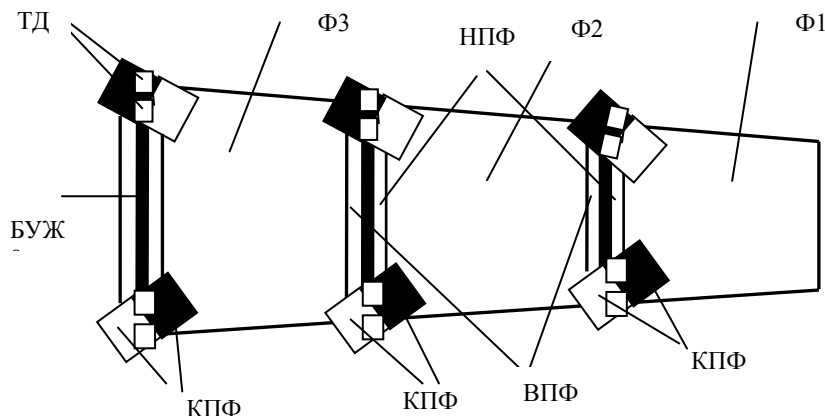


Рис. 3. Общий вид пальца:

Ф1, Ф2, Ф3 – модули первой, второй, третьей фаланг пальцев, КПФ – крепежные площадки модулей фаланг, ВПФ – верхняя платформа модулей фаланг, НПФ – нижняя платформа модулей фаланг, ТД – тактильные датчики, БУЖ – блоки с управляемой жесткостью модулей фаланг

Крепление пальцев к ладони может быть двух типов: независимым и зависимым. При независимом креплении фаланг пальцев крепежные площадки верхней платформы модуля ладони, закрепляются с крепежными площадками нижней платформы модулей третьих фаланг пальцев. При зависимом креплении фаланг пальцев две крепежные площадки нижних платформ модулей третьих фаланг пальцев, закрепляются сразу с двумя крепежными площадками верхней платформы модуля ладони. На опорной площадке верхней платформы модуля ладони с внутренней стороны расположен блок управления (БУ), а на внешней поверхности расположены ТД.

Функционирование адаптивной искусственной кисти

Блок управления оценивает размеры и форму объекта захвата. Затем по командам из БУ с помощью приводов управляемых стержней ВП модуля ладони изменяется ее размер в соответствии с размером транспортируемого объекта; с помощью приводов ног модулей фаланг пальцев изменяется длина пальцев в соответствии с размером захватываемого объекта; с помощью приводов управляемых стержней платформ модулей фаланг пальцев изменяются их ширина и форма в соответствии с размером и

формой захватываемого объекта. Таким образом, происходит адаптация ладони под размер и форму захватываемого объекта.

Далее по командам из системы управления производится перемещение ладони в точку захвата. Затем по командам из БУ с помощью приводов ног модуля ладони центр верхней платформы ладони с использованием корректирующих сигналов от ТД этой платформы вводится в соприкосновение с захватываемым объектом. Наконец, по командам из системы управления с помощью приводов ног модулей фаланг пальцев последние, с использованием корректирующих сигналов от ТД платформ модулей фаланг пальцев, вводятся в соприкосновение с захватываемым объектом.

Требуемое усилие захвата осуществляется приводами ног-актуаторов и приводами управляемых стержней платформ модулей фаланг пальцев в соответствии с сигналами из системы управления, с корректирующими сигналами от датчиков силы в ногах-актуаторах и управляемых стержнях платформ модулей фаланг пальцев. Далее по командам из системы управления может производиться увеличение жесткости пальцев с помощью БУЖ. После этого схваченный объект может подниматься и перемещаться в требуемую точку.

Таким образом, производится захват и перемещение объектов в заданную точку.

Заключение

Анализ существующих конструктивных решений захватов и манипуляторов, имитирующих работу кисти рук, показал, что их эффективность может быть существенно повышена за счет обеспечения возможности изменения размеров ладони и фаланг пальцев, а также за счет их адаптации под форму захватываемого объекта. Для этого ладонь и фаланги пальцев целесообразно строить на основе структур из стандартных модулей SM5 SEMS.

Пути дальнейшего развития рассмотренной адаптивной искусственной кисти связано, прежде всего, с использованием миоэлектрической системы управления кистью, дополненной возможностью тонкой донастройки устройства пользователем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang Li, Abbott J., Dong L., Kratochvil B., Bell D., Nelson B. Artificial bacterial flagella: Fabrication and magnetic control // *Applied Physics Letters*. 2009. 94. 064107
2. Modular design of electro-magnetic mechatronic microrobots Внутритрубный миниатюрный робот перемещения / Gradetsky V., Solovtsov V., Kniazkov M., Rizzotto G., Amato P. // *Proceedings of the 6-th International Conference CLAWAR 2003, Catania, Italy, 2003*, p. 651–658
3. Пат. 2469752. Российская Федерация. Медицинский микроробот / Агапов В. А., Городецкий А. Е., Кучмин А. Ю., Селиванова Е. Н. Опубликовано 20.12.2012. Бюл. № 35.
4. Каталог продуктов фирмы «Touch Bionics». / http://touchbionics.ru/Touch_Bionics_Product_Catalog.pdf
5. Бионический протез «BeBionic 3». / <http://service-med.com/orthopedy/hand-prosthesis/>
6. Пат. № 2481942. Российская Федерация. Адаптивное трехпальцевое захватное устройство / Прядко А. И., Рогов А. В., Модягин А. И., Ушаков Ф. Г., Котова Е. Л. Опубликовано 20.05.2013. Бюл. № 14.
7. Eduardo R. Torres-Jara. Dexterous and compliant robotic finger / Патент США № US2012013139 (A1). Опубликовано 16.02.2012.
8. Gorodetskiy A. E., Kurbanov V. G. (ed.) Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System. / *Studies in Systems, Decision and Control 95*. // Springer International Publishing Switzerland. DOI 10.1007/978-3-319-53327-8, 2017. 266 p.
9. Gorodetskiy A. E. Smart Electromechanical Systems Modules. / *Smart Electromechanical Systems*. Editor Andrey E. Gorodetskiy. // *Studies in Systems, Decision and Control 49*, Springer International Publishing, DOI 10.1007/978-3-319-27547-5, 2016, 277 p.
10. Пат. 1749056. Российская Федерация. Слоистый материал с изменяемой жесткостью / Бойков В. И., Быстров С. В., Смирнов А. В., Чежин М. С. Опубликовано 23.07.1992. Бюл. № 27.

Редактор
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)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 23-00-76
E-mail: rector@vstu.ru

Темплан 2017 г. Поз. № 24ж. Подписано в печать 30.06.2017 г. Формат 60 x 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 7,44. Уч.-изд. л. 7,36. Тираж 100 экз. Заказ №
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО ИУНЛ ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.
Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.