



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 – чл.-корр. 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., ИПИМаш
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
О.Г. Котиев – д. т. н., проф., МВТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. А. Львов – д. т. н., проф., СГТУ
им. Гагарина Ю.А., г. Саратов
Мертен Клеменс – д. т. н., проф.,
университет г. Штутгарт, Германия
В. А. Марков – д. т. н., проф., МВТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. 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
А.Н. Шилин – д.т.н., проф., ВолгГТУ

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

№ 3 (15)
Август
2016

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) 24-81-05
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.

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

ISSN 2500-0586

Journal is registered in the Federal Service for supervision
of communications, information technology and mass media
(Roscomnadzor) registration certificate:
ПИ .N° (ФЦ77-64543, registration date: 22 January 2016

Editor-in-chief

V. I. Lysak – Corresponding
Member 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
O. G. Kotiev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU., Saratov
M. Clemens – D. Sc. (Engineering), Prof.,
University of Stuttgart, Germany
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. 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
A. N. Shilin – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd

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+OK).

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- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport », 2016

**№ 3 (15)
August
2016**

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) 24-81-05 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

Артюшенко Н. С. 14

Ахмедова О. О. 19, 31

Дементьев С. С. 27

Деянов Д. С. 49

Копейкина Т. В. 31

Ле Ф. С. 22

Ляпичев С. В. 41

Мадаров А. Б. 52

Макартичан С. В. 41, 45

Нгуен Ф. Т. 7

Нефедьев А. И. 38, 49

Панасенко М. В. 31, 34

Самсонова А. А. 45

Сошинов А. Г. 31

Стрижиченко А. В. 52

Филиппов А. Н. 41

Шилин А. А. 7, 14, 27

Шилин А. Н. 7

AUTHOR INDEX

Akhmedova O. O. *19, 31*

Artyushenko N. S. *14*

Dementyev S. S. *27*

Deyanov D. S. *49*

Filippov A. N. *41*

Kopeikina T. V. *31*

Le F. S. *22*

Lyapichev S. V. *41*

Madarov A. B. *52*

Makartichyan S. V. *41, 45*

Nefed'ev A. I. *38, 39*

Nguen F. T. *7*

Panasenko M. V. *31, 34*

Samsonova A. A. *45*

Shilin A. A. *7, 14, 27*

Shilin A. N. *7*

Soshinov A. G. *31*

Strizhichenko A. V. *52*

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Шилин А. Н., Шилин А. А., Нгуен Ф. Т.</i>	
Погрешности измерения электрического поля воздушных линий электропередачи в системе контроля аварий.....	7
<i>Шилин А. А., Артюшенко Н. С.</i>	
Анализ дистанционных методов определения мест повреждений линий электропередачи.....	14
<i>Ахмедова О. О.</i>	
Анализ ошибок срабатывания систем релейной защиты в энергетике.....	19
<i>Ле Ф. С.</i>	
Применение метода дерева отказов для оценки надежности системы регистрации аварийных режимов воздушных линий электропередачи.....	22
<i>Шилин А. А., Дементьев С. С.</i>	
Магнитометрическая диагностика гололедообразования на воздушных линиях электропередачи.....	27
<i>Панасенко М. В., Сошинов А. Г., Копейкина Т. В., Ахмедова О. О.</i>	
Технические и организационные мероприятия по снижению гололедно-ветровых аварий в электросетях.....	31
<i>Панасенко М. В.</i>	
Устройство отбора мощности для питания систем мониторинга линий электропередачи.....	34
<i>Нефедьев А. И.</i>	
Высокоточный трансформаторный делитель напряжения.....	38
<i>Макартичан С. В., Филиппов А. Н., Ляпичев С. В.</i>	
Автоматическая система капельного орошения с дистанционным управлением.....	41
<i>Макартичан С. В., Самсонова А. А.</i>	
Устройство для тарировки приборов косвенного измерения влажности материалов.....	45
<i>Деянов Д. С., Нефедьев А. И.</i>	
Цифровой прибор для измерения радиации	49
<i>Мадаров А. Б., Стрижиченко А. В.</i>	
Оптико-электронный метод определения температуры теплоносителя.....	52

CONTENTS

<i>Shilin A. N., Shilin A. A., Nguen F. T.</i> ERROR OF MEASUREMENT THE ELECTRIC FIELD OF OVERHEAD POWER LINE IN THE ALARM SYSTEM.....	7
<i>Shilin A. A., Artyushenko N. S.</i> ANALYSIS OF REMOTE METHODS OF FAULT LOCATION OF POWER LINES.....	14
<i>Akhmedova O. O.</i> ERROR ANALYSIS OF RELAY PROTECTION OPERATION IN POWER.....	19
<i>Le F. S.</i> APPLICATION OF THE METHOD OF FAULT TREE FOR RELIABILITY ASSESSMENT OF REGISTRATION EMERGENCY MODE OF OVERHEAD POWER LINES.....	22
<i>Shilin A. A., Dementyev S. S.</i> MAGNETOMETRIC DIAGNOSTICS OF THE ICE ACCRETION PROCESS ON OVERHEAD POWER LINES.....	27
<i>Panchenko M. V., Soshina A. G., Kopeikin T. V., Akhmedova O. O.</i> TECHNICAL AND ORGANIZATIONAL MEASURES TO REDUCE THE GLAZE-WIND ACCIDENTS IN ELECTRICITY SUPPLY NETWORKS.	31
<i>Panchenko M. V.</i> DEVICE FOR SELECTION POWER SUPPLY MONITORING SYSTEMS POWER LINES.....	34
<i>Nefed'ev A. I.</i> PRECISION TRANSFORMER VOLTAGE DIVIDER.....	38
<i>Makartichyan S. V., Filippov A. N., Lyapichev S. V.</i> AUTOMATIC DRIP IRRIGATION SYSTEM WITH REMOTE CONTROL.....	41
<i>Makartichyan S. V., Samsonova A. A.</i> THE DEVICE FOR INDIRECT HUMIDITY MEASUREMENT INSTRUMENTS CALIBRATION.....	45
<i>Deyanov D. S., Nefed'ev A. I.</i> DIGITAL MEASUREMENT DEVICE OF RADIATION.....	49
<i>Madarov A. B., Strizhichenko A. V.</i> THE OPTICAL ELECTRONIC METHOD FOR DETERMINING TEMPERATURE OF THE COOLANT.....	52

А. Н. Шилин, А. А. Шилин, Ф. Т. Нгуен

**ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ АВАРИЙ**

Волгоградский государственный технический университет

В статье приведен анализ погрешности измерения электрического поля воздушных линий электропередачи в системе контроля аварий. Рассмотрено влияние влажности и температуры окружающей среды на погрешности измерения. Анализ погрешности позволяет обоснованно определять технические характеристики системы контроля.

Ключевые слова: электрическое поле воздушных линий (ВЛ) электропередачи, аварийные режимы ВЛ, датчики электрических полей, мониторинг ВЛ.

A. N. Shilin, A. A. Shilin, F. T. Nguen

**ERROR OF MEASUREMENT THE ELECTRIC FIELD OF OVERHEAD
POWER LINE IN THE ALARM SYSTEM**

Volgograd State Technical University

(e-mail: eltech@vstu.ru)

The article analyzes the measurement error of the electric field of overhead power lines in the control system failures. The article examines the influence of humidity and ambient temperature on measurement errors. Analysis of the error can reasonably define the technical characteristics of the control system failures.

Keywords: electric field of overhead power lines, power lines fault, electric field sensors, monitoring of overhead power lines

Введение

Одной из актуальных проблем в энергетике является сравнительно низкая надежность систем электроснабжения. Из анализа надежности систем электроснабжения следует, что самым ненадежным элементом являются воздушные линии электропередачи. Для повышения их надежности разработана информационно-измерительная система (ИИС) контроля аварийных режимов воздушных линий электропередачи [1–2]. Основной технической характеристикой ИИС является погрешность результатов контроля. Погрешность может являться источником принятия ошибочного решения об аварии, а именно ИИС может не зарегистрировать аварию или выдать ложную информацию об аварии нормально функционирующей сети. Поэтому необходим анализ погрешностей ИИС с учетом

всех факторов, влияющих на точность контроля в реальных режимах работы ИИС. В статье приведен анализ погрешности контроля напряженности электрического поля, создаваемого проводами линии.

В качестве датчика напряженности электрического поля в ИИС используется плоский конденсатор, представляющий собой две плоские параллельные пластины одинаковой площади S , расположенные на расстоянии d друг относительно друга. Если пространство между пластинами заполнено средой с относительной диэлектрической проницаемостью ε , то при сообщении им заряда q напряженность электрического поля между пластинами и емкость плоского конденсатора равны соответственно

$$E = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0 S} \text{ и } C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}.$$

Разность потенциалов между пластинами определяется выражением:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{qd}{\varepsilon\varepsilon_0 S}. \quad (1)$$

Напряженность поля E зависит от электрических свойств среды и поэтому напряженность удобно выразить через ε :

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon} \quad (2)$$

Диэлектрическая проницаемость воздуха равна $\varepsilon = 1$ и в этом случае $E = E_0$.

Таким образом, напряженность электрического поля E_0 , создаваемого проводами линии, определяется по напряжению на конденсаторе

$$U = E_0 d. \quad (3)$$

На рис. 1 представлена функциональная схема канала для измерения напряженности электрического поля, по которому идентифицируется режим работы линии. Конденсатор является довольно простым элементом и поэтому практически не вносит погрешность в результат измерения. Однако напряженность электрического поля, создаваемого проводами линии, зависит от диэлектрической проницаемости среды ε . В то же время диэлектрическая проницаемость среды ε зависит от влажности среды и температуры. Поэтому необходим анализ погрешностей, вызванных зависимостью ε от влажности воздуха и температуры среды и, особенно, в дождливую погоду и снегопад. Так, например, диэлектрическая проницаемость воды равна $\varepsilon = 81$. Поэтому, если эти факторы вносят значительную погрешность в результат измерения, то необходимо в системе осуществлять коррекцию этих факторов по уравнению:

$$E_0 = \varepsilon \frac{U}{d} \quad (4)$$

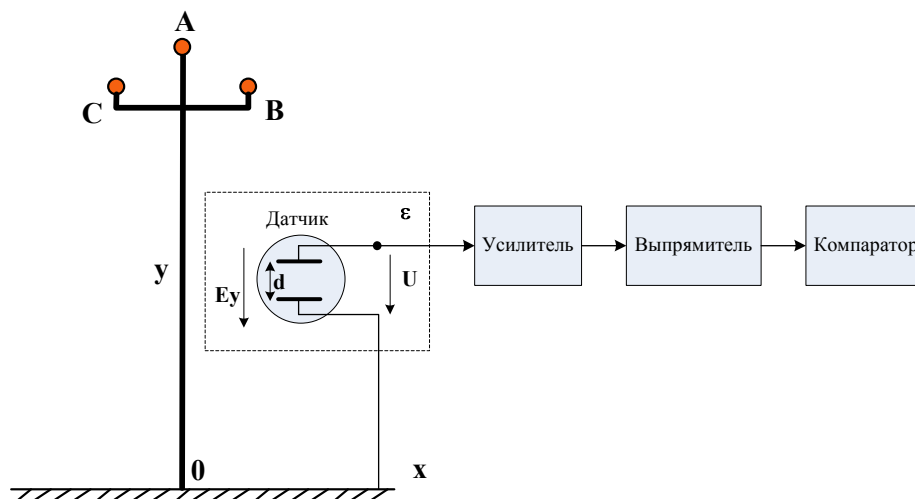


Рис. 1. Структурная схема канала для измерения напряженности электрического поля

Анализ влияния внешних факторов на диэлектрическую проницаемость воздуха

В состав воздуха входят молекулы азота (N_2), кислорода (O_2) и воды (H_2O). Небольшое количество других газов (аргон, водород, углекислый газ) практически не влияет на параметры воздуха.

Относительная диэлектрическая проницаемость тропосферы равна

$$\varepsilon = 1 + \Delta\varepsilon, \quad (5)$$

где положительная добавка $\Delta\varepsilon$ к диэлектрической проницаемости вакуума, обусловленная поляризацией молекул азота, кислорода и водяного пара.

Молекулы азота и кислорода не имеют собственного дипольного момента. Поляризация этих молекул возникает только под действием внешнего электрического поля и обусловлена смещением электрических зарядов в молекулах относительно равновесного положения. Поэтому вклад азота и кислорода в диэлектрическую восприимчивость воздуха пропорционален только числу молекул каждого сорта a [3]:

$$N_a = p_a / kT, \quad (6)$$

где p_a – парциальное давление молекул сорта a ; k – постоянная Больцмана.

Молекулы водяного пара имеют собственный дипольный момент, поэтому их поляриза-

ция зависит не только от смещения зарядов, но и от углового положения молекулы во внешнем электрическом поле. С ростом температуры увеличивается скорость движения молекул водяного пара во внешнем поле, что затрудняет их ориентацию в поле. По этой причине вклад собственного дипольного момента молекул водяного пара в диэлектрическую восприимчивость воздуха оказывается пропорциональным величине [3]

$$N_B/T = p_B/kT^2. \quad (7)$$

С учетом вышеизложенных рассуждений относительная диэлектрическая проницаемость воздуха определяется формулой [3]

$$\varepsilon = 1 + \Delta\varepsilon = 1 + \frac{\chi p}{kT} + \frac{\chi_B p_B}{kT^2}, \quad (8)$$

где χ – коэффициент поляризации молекул газов воздуха, обусловленный смещением зарядов молекул под действием внешнего электрического поля; χ_B – коэффициент, учитывающий изменение собственного дипольного момента водяного пара; p – давление воздуха; p_B – парциальное давление водяного пара; T – абсолютная температура воздуха.

Коэффициенты χ и χ_B определяются экспериментально. Если давление воздуха p и парциальное давление p_B выражены в Паскалях, а температура T – в Кельвинах, то относительная диэлектрическая проницаемость воздуха определяется формулой [3]

$$\varepsilon = 1 + \frac{157}{T} \left(p + \frac{4800 p_B}{T} \right) \cdot 10^{-8} \quad (9)$$

Парциальное давление водяного пара p_B зависит от абсолютной температуры T [3]

$$p_B = p_s(T) \cdot S, \quad (10)$$

где S – относительная влажность, $p_s(T)$ – давление насыщенного пара при заданной температуре T , определяемое по следующей формуле [5]

$$p_s = 10^3 \exp \frac{16,57t - 115,72}{233,77 + 0,997t}, \quad (11)$$

где t выражена в градусах Цельсия, а p_s в Паскалях. Из (9) и (10) относительная диэлектрическая проницаемость воздуха зависит от давления p , температуры T и относительной влажности S . Для упрощения анализа атмосферное давление p у поверхности Земли принимается равным $p_0 = 10^5$ Па. При оценке зависимости диэлектрической проницаемости от температуры влажность сохраняется постоянной и наоборот.

Зависимость диэлектрической проницаемости от влажности

Зависимость диэлектрической проницаемости воздуха от влажности при температуре воздуха $T_0 = 288$ К ($t = 15$ °С) представлена в форме графика (рис. 2). Эта зависимость является линейной, что упрощает анализ погрешностей. Далее определим погрешность измерения напряженности электрического поля, обусловленную влиянием изменения влажности.

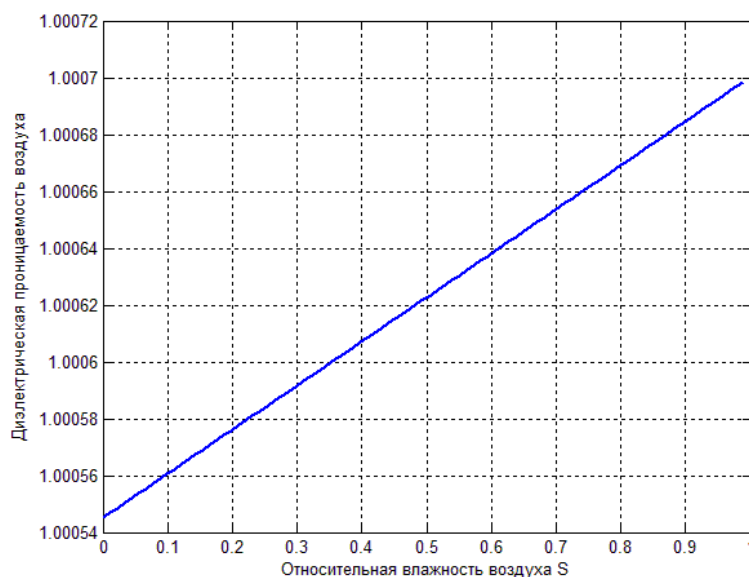


Рис. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости от влажности

Зависимость напряжения на конденсаторе от напряженности электрического поля выра-

жается следующей формулой [4]

$$U = Ed \text{ или } U = \frac{E_0 d}{\varepsilon}. \quad (12)$$

На основе этой формулы получено выражение для относительной погрешности, источником которой является непостоянство значения диэлектрической проницаемости, и вычислена максимальная погрешность

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{U_2 - U_1}{U_1} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} - 1 = \frac{1,000545}{1,000700} - 1 = -0,000155 = -0,0155\%, \quad (13)$$

где $\varepsilon_1 = 1,000545$ – диэлектрическая проницаемость при влажности 0 %; $\varepsilon_2 = 1,000700$ – диэлектрическая проницаемость при влажности 100 %.

Эта погрешность имеет сравнительно малое значение. Поэтому определим значение относительной погрешности при диэлектрической проницаемости, принимаемой в практических

инженерных расчетах $\varepsilon_1 = 1$. Для этого случая максимальная погрешность измерения напряженности электрического поля равна 0,07 %.

Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры

Зависимость диэлектрической проницаемости воздуха от температуры при влажности воздуха $S = 0,6$ вычислена и представлена в форме графика (рис. 3). Эта зависимость является нелинейной.

При диэлектрической проницаемости воздуха равной 1 значение максимальной погрешности измерения напряженности электрического поля E_0 , вызванной изменением температуры во всем диапазоне графика, равно 0,1 %. Значение этой погрешности является сравнительно малым.

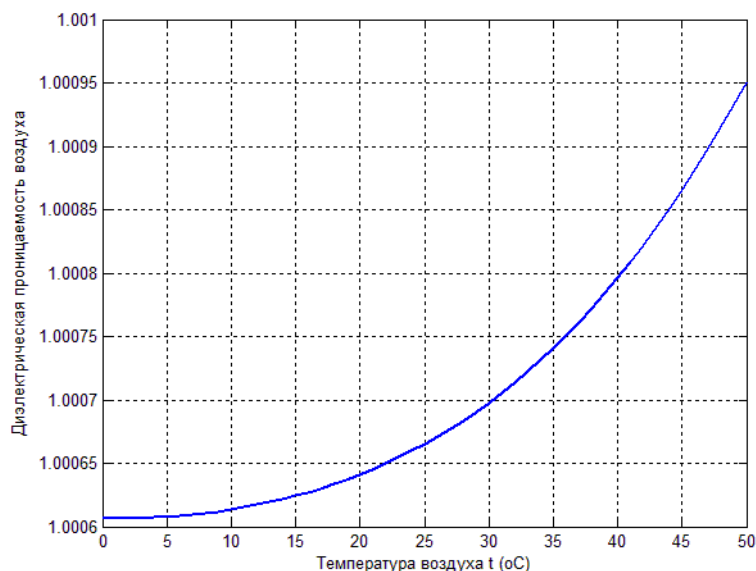


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры

Зависимость диэлектрической проницаемости воздуха от дождя и снега

Из вышеприведенного анализа следует, что влажность и температура воздуха не оказывают существенного влияния на погрешность измерения напряженности электрического поля E_0 , создаваемого проводами линии. Однако вода с довольно высокой диэлектрической проницаемостью может оказывать влияние на погрешность измерения при дожде и снеге. Поэтому анализ влияния этих погодных факторов на точность измерения напряженности электрического поля E_0 .

Среднее поле и правило Максвелл-Гарнетта. На рис. 4 представлена смешанная среда со сферическими включениями, которые имеют

диэлектрическую проницаемость ε_2 и случайные координаты в среде с диэлектрической проницаемостью ε_1 . Смешанная среда может быть представлена эквивалентно однородной средой с эффективной диэлектрической проницаемостью ε^* . Эффективная диэлектрическая проницаемость зависит от диэлектрических проницаемостей ε_1 и ε_2 , а также от объемных концентраций компонентов и определяется формулой Максвелла-Гарнетта [6]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 + 3f\varepsilon_1 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1 - f(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}, \quad (14)$$

где f и $(1 - f)$ – объемные концентрации включения и среды соответственно.

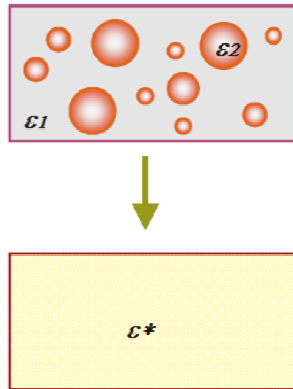


Рис. 4. Смешанная и эквивалентная среды

Зависимость диэлектрической проницаемости воздуха от дождя. В дожде смешанная среда состоит из воздуха с диэлектрической проницаемостью ε_1 и воды с диэлектрической проницаемостью ε_2 . Для определения эффективной диэлектрической проницаемости необходимо знать объемную концентрацию воды f .

Размеры и количество капель дождя в определенном объеме имеет случайный характер. Объемная концентрация воды f зависит от интенсивности дождя и определяется формулой [6]:

$$f = 8,894 \cdot 10^{-8} R_r^{0,84}, \quad (15)$$

где R_r – интенсивность дождя в единицах мм/ч.

Интенсивность дождя характеризуется слоем или объемом дождевых осадков, которые выпадают за определенную единицу времени. Данный показатель может иметь значение в пределах от 0,25 мм/ч до 100 мм/ч [7].

На рис. 5 изображена зависимость диэлектрической проницаемости от дождя, а на рис. 6 совмещены зависимости диэлектрической проницаемости от влажности и дождя. Из совмещенных зависимостей (рис. 6) следует, что дождь оказывает еще меньшее влияние, чем влажность.

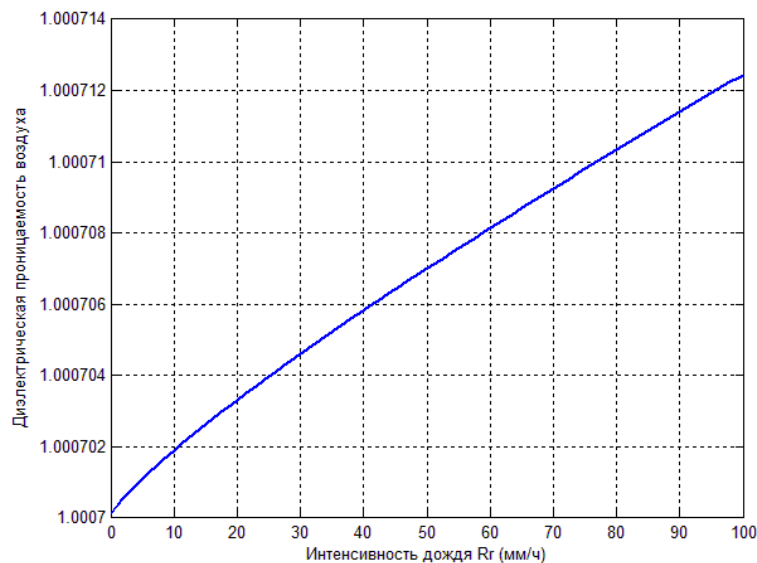


Рис. 5. Зависимость диэлектрической проницаемости от дождя

Зависимость диэлектрической проницаемости воздуха при снегопаде и слоя снега. Снег – форма атмосферных осадков, состоящая из мелких кристаллов льда. По статистическим данным [9], средняя интенсивность снегопадов на Камчатке изменяется от 0,9 до 1,8 см/ч, а максимальное значение интенсивности достигает 5–12 см/ч. Интенсивность снегопада приблизительно похожа на интенсивность дождя. Диэлектрическая проницаемость воздуха при снегопаде зависит от его интенсивности. Диэлектрическая проницаемость льда меньше проницаемости воды. Поэтому влияние снега

в воздухе действует на диэлектрическую проницаемость воздуха меньше, чем влияние воды в дожде. Так что погрешность измерения напряженности электрического поля, вызванная изменением диэлектрической проницаемости из-за снегопада незначительна.

Объемная концентрация снега f определяется формулой [6]:

$$f = \frac{\rho_c}{\rho_l}, \quad (16)$$

где ρ_c – плотность сухого снега очень редко превышает значения 0,4 г/см³; $\rho_l \approx 0,917$ г/см³ – плотность льда.

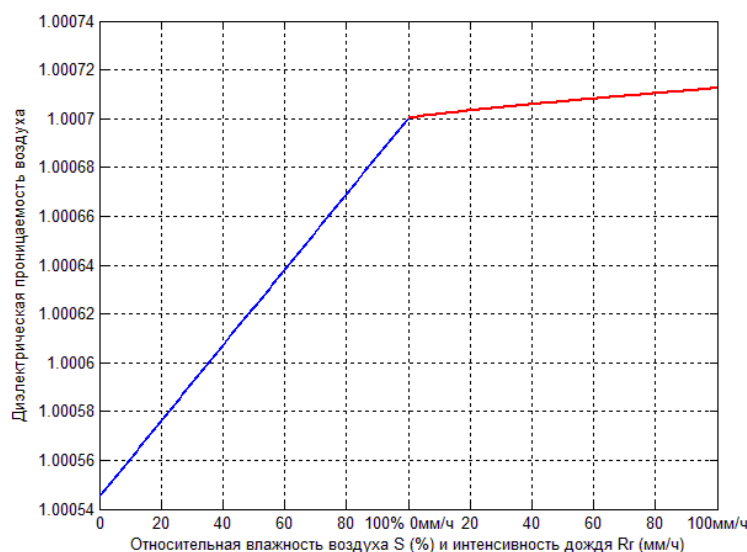


Рис. 6. Зависимость диэлектрической проницаемости от влажности и дождя

Диэлектрическая проницаемость льда $\epsilon_2 \approx 3,2$. Диэлектрическая проницаемость воздуха в расчетах принимается равной единице ($\epsilon_1 \approx 1$).

Модель сферы тестировалась помощью Matzler [8] и следует отметить, что полученные результаты с помощью модель сферы значи-

тельно отличаются от экспериментов. Кроме моделей смешения существуют эмпирические отношения для диэлектрической проницаемости сухого снега [8]

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_1} = 1 + 1,5995\rho_c + 1,861\rho_c^3. \quad (17)$$

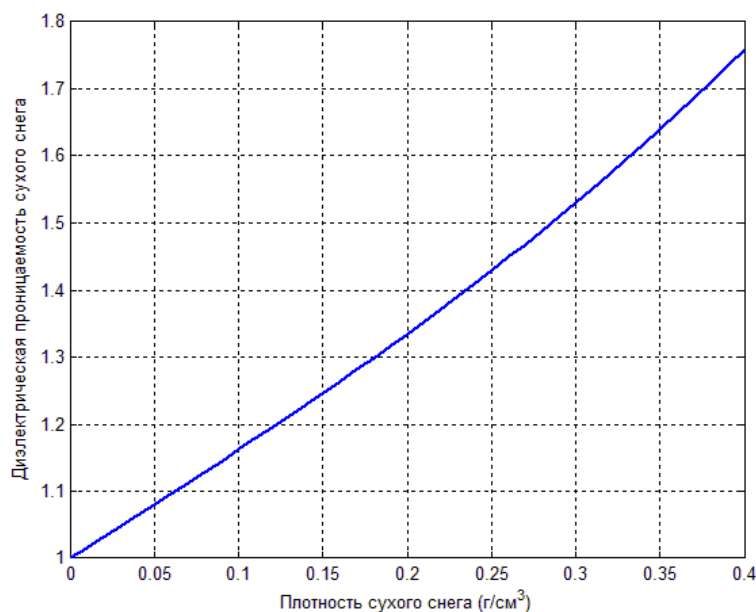


Рис. 7. Зависимость диэлектрической проницаемости от сухого снега

Мокрый снег состоит из сухого снега и воды. Диэлектрическая проницаемость мокрого снега больше чем сухого снега [6] и зависит от количества воды в мокром снеге

$$\epsilon_m = \epsilon_c + \Delta\epsilon; \quad (18)$$

$$\Delta\epsilon = (0,1W + 0,8W^2)\epsilon_w, \quad (19)$$

где $W = \rho_m - \rho_c$ – влажность мокрого снега; ρ_m –

плотность мокрого снега. ϵ_w – диэлектрическая проницаемость воды.

На рис. 8 представлены зависимости диэлектрической проницаемости слоя для сухого и мокрого снега. Диэлектрическая проницаемость слоя снега сравнительно высокая и особенно для мокрого снега. Проницаемость слоя снега увеличивается, когда снег плавится и соответственно плотность его увеличивается.

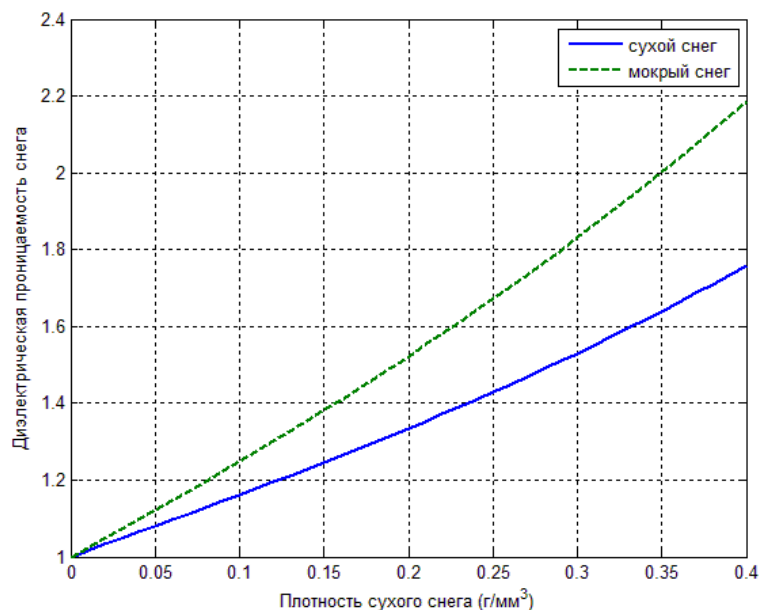


Рис. 8. Зависимость диэлектрической проницаемости от сухого снега и мокрого снега при $W = 0.1\rho_c$

Выводы

Из проведенного анализа следует, что влажность и температура воздуха не оказывают существенного влияния на точность измерения напряженности электрического поля. На основе проведенного анализа может быть получена полная погрешность датчика ИИС, поскольку остальные блоки являются стандартными и их характеристики известны. Существенное влияние на погрешность измерения оказывает слой снега и поэтому конденсаторный датчик напряженности электрического поля должен быть установлен на высоте, которая превышает возможную высоту снежного покрова. Кроме того, датчик должен быть защищен от попадания воды и снега, поскольку может быть нарушена нормальная работа датчика из-за высокой диэлектрической проницаемости воды и снега.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шилин, А. Н. Информационно-измерительная система определения повреждений воздушной линии электропередачи / А. Н. Шилин, А. А. Шилин // Приборы. — 2011. — № 5. — С. 23–29.
2. П.м. 100632 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/08. Устройство для определения местоположения и вида повреждения на воздушной линии электропередачи / А. А. Шилин, А. Н. Шилин, В. С. Лукьянов ; ГОУ ВПО ВолгГТУ. — 2010.
3. Пермяков, В. А. Распространение радиоволн : учеб. пособие / В. А. Пермяков, В. В. Солодухов, В. В. Бодров, М. В. Исаков. — Изд-во: МЭИ. — 2006. — 185 с.
4. Дмитриева, В. Ф. Физика / В. Ф. Дмитриева. — М. : Изд-во: Академия. — 2003. — 464 с.
5. Тарабанов, М. Г. Влажный воздух / М. Г. Тарабанов. Справочное пособие АВОК. — 2004. — 42 с.
6. Sihvola, A. H. Electromagnetic mixing formulas and applications / A. H. Sihvola. — Изд-во: IEEE. — 1999. — 296 с.
7. Дождь и его характеристики [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://odogde.ru/interesnoe-o-dozhde/intensivnost-dozhda.html>, дата обращения 25.01.2014
8. Matzler, C. Microwave permittivity of dry snow / C. Matzler, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34, (2), pp. 573–581
9. Анапольская, Л. Н. Климатические параметры Восточно-Сибирского и Дальневосточного Экономических районов / Л. Н. Анапольская, И. Д. Копзнева — 1979. — 389 с.

УДК 621.311

*А. А. Шилин, Н. С. Артюшенко***АНАЛИЗ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ****Волгоградский государственный технический университет**

В статье приведен анализ существующих методов определения мест повреждений линий электропередачи и предложены классификационные признаки. Результаты анализа методов представлены в табличной форме. И позволяют для конкретного случая обоснованно выбирать метод.

Ключевые слова: аварийные режимы воздушных линий (ВЛ), мониторинг ВЛ, средства определения мест повреждений ВЛ, линии с распределенными параметрами, рефлектометры.

*A. A. Shilin, N. S. Artyushenko***ANALYSIS OF REMOTE METHODS OF FAULT LOCATION OF POWER LINES****Volgograd State Technical University**

(e-mail: Artex23@yandex.ru)

The article analyzes the existing methods of fault location of power lines and the proposed classification features. The results of analysis methods are presented in tabular form. And allow reasonably choose a method for a particular case.

Keywords: emergency modes overhead power lines, monitoring overhead power lines, line with distributed parameters, tools for fault location of overhead power lines, reflectometer.

Одной из основных проблем обеспечения надежной работы систем электроснабжения является оперативное определение мест повреждения воздушных линий (ВЛ) электропередачи и проведение ремонтно-восстановительных работ. В настоящее время для определения мест повреждения (ОМП) воздушных линий электропередачи и кабельных линий в России и за рубежом разработано большое количество приборов, основанных на различных физических принципах действия. При

выборе прибора для конкретной задачи необходим анализ потенциальных возможностей этих приборов. Поэтому необходим анализ методов и средств определения вида и мест аварии по некоторым классификационным признакам.

Классификация методов

В настоящее время практически во всех источниках по методам и приборам ОМП приводится одна классификационная схема (рис. 1) [1].

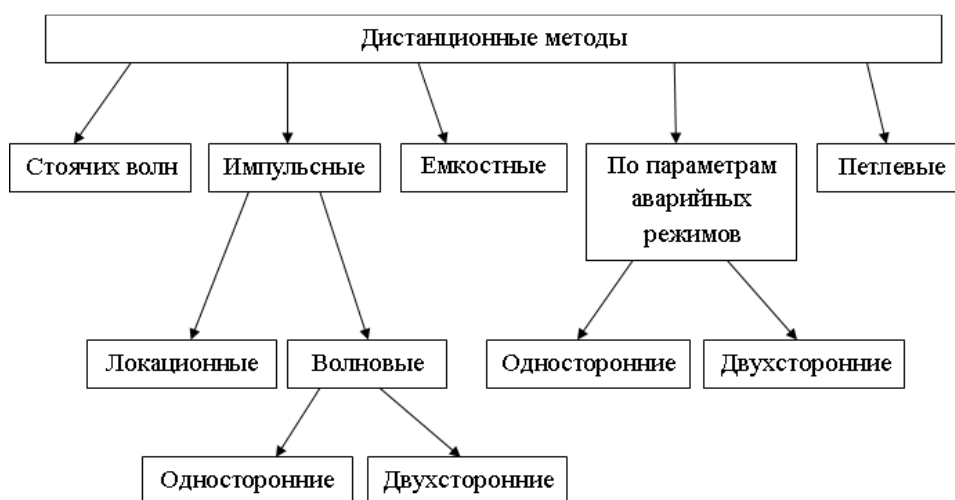


Рис. 1. Схема классификации методов ОМП

Все методы ОМП в зависимости от организации контроля аварийных режимов делятся на дистанционные и топографические методы. В дистанционных методах используются физические принципы, которые основаны на изменении параметров физических величин на одном конце линии, вызванном аварийными режимами на участке линии. При топографических методах место повреждения определяется визуально или с помощью электромагнитных устройств непосредственно при перемещении ремонтной бригады по трассе вдоль линии. Перемещение поисковой бригады по трассе может осуществляться с помощью различных транспортных средств: автомобилей, вертолетов, дирижаблей. Необходимо отметить, что в последнее время для решения этих задач предлагается использовать беспилотные летательные аппараты, которые уже используются при контроле нефте- и газопроводов. Методы ОМП также классифицируются по используемым моделям электрических цепей: цепи с распределенными параметрами и цепи с сосредоточенными параметрами. На практике эти методы соответственно называются высокочастотными и низкочастотными. Низкочастотные методы используют частоты от нуля до нескольких килогерц, а в качестве моделей используются уравнения цепей переменного тока, составленные по законам Кирхгофа. Высокочастотные – десятки килогерц, а в качестве моделей используются уравнения в частных производных, которые на практике часто заменяются упрощенными схемами замещения.

Физические основы методов

При анализе методов ОМП и их потенциальных возможностей необходима информация о физических принципах действия, на которых основаны методы. Большинство методов ОМП используют математические модели линий с распределенными параметрами. Нормальные и переходные режимы линий электропередач характеризуются особенностями, которые обусловлены волновым характером распределения электромагнитной энергии и соотношением удельных параметров линии. Одним из средств, упрощающих представление о процессах, протекающих в энергетической системе, являются схемы замещения линии электропередачи. В зависимости от требуемой точности эти модели представляются в виде различных электрических схем, которые значительно упрощают задачу и вносят погрешность в модель сред-

ства контроля. Упрощение схемы может привести к неверным выводам об аварийных режимах. Поэтому для проведения анализа необходимы основные сведения о линиях с распределенными параметрами.

К первичным параметрам единицы длины двухпроводной линии относятся: C_0 – поперечная емкость между прямыми и обратными проводами, L_0 – индуктивность петли, образованной прямыми обратным проводами, R_0 – продольное активное сопротивление прямого и обратного проводов, G_0 – поперечная активная проводимость утечки изоляции между прямыми и обратными проводами. Для расчета этих параметров необходимы исходные данные: номинальное напряжение линии, количество цепей линии, марка и сечение провода, расположение проводов на опоре и расстояние между проводами.

К вторичным параметрам в операторной форме относятся волновое сопротивление:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R_0 + pL_0}{G_0 + pC_0}}, \quad (1)$$

и коэффициент распространения:

$$\gamma(p) = \sqrt{(R_0 + pL_0)(G_0 + pC_0)}. \quad (2)$$

Наиболее распространенная схема замещения бесконечно малого элемента двухпроводной линии показана на рис. 2 [3].

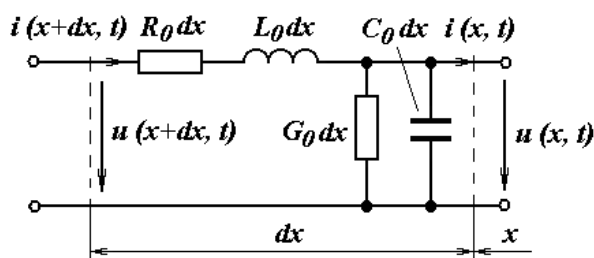


Рис. 2. Схема замещения элементарного участка линии

Анализ установившихся и переходных режимов в однородных длинных линиях основан на решении дифференциальных уравнений в частных производных, полученных с помощью законов Кирхгофа для элемента линии длиной dx (рис. 2):

$$\partial u / \partial x = R_0 i + L_0 \partial i / \partial t, \quad (3)$$

$$\partial i / \partial x = G_0 u + C_0 \partial u / \partial t. \quad (4)$$

Уравнения (3, 4) аналитически могут быть решены только для частного случая, а именно для гармонических воздействий. При более сложных, в том числе и ступенчатых воздейст-

виях, используются численные методы расчета и разработанные на их основе программы.

При синусоидальном напряжении источника питания однородной линии и постоянных параметрах уравнения (3, 4) записываются в комплексной форме:

$$d\dot{U}/dx = (R_0 + j\omega L_0)\dot{I} = Z_0\dot{I}, \quad (5)$$

$$d\dot{I}/dx = (G_0 + j\omega C_0)\dot{U} = Y_0\dot{U}, \quad (6)$$

где $Z_0 = R_0 + jX_0$, Ом/м, $Y_0 = G_0 - jB_0$, См/м – комплексные продольные и поперечные параметры линии на единицу длины.

Общее решение уравнений (5, 6) представляет собой сумму прямых и обратных бегущих волн с напряжением и током:

$$\dot{U} = \dot{A}_1 e^{\gamma x} + \dot{A}_2 e^{-\gamma x} \quad (7)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{A}_2}{Z_B} e^{-\gamma x} - \frac{\dot{A}_1}{Z_B} e^{\gamma x}, \quad (8)$$

где $\dot{A}_1$ и $\dot{A}_2$ – постоянные интегрирования, Z_B – волновое сопротивление. Постоянные интегрирования определяются с использованием граничных значений тока и напряжения.

Для гармонических сигналов выражение для коэффициента распространения (2) имеет следующий вид:

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (9)$$

где α – коэффициент затухания, характеризующий затухание падающей волны на единицу длины линии (на 1 км); β – коэффициент фазы, характеризующий изменение фазы падающей волны на единицу длины линии (на 1 км или м).

Отношение напряжения отраженной волны в конце линии к напряжению падающей волны в конце линии есть коэффициент отражения по напряжению

$$K_U = \frac{\dot{A}_1 e^{\gamma l}}{\dot{A}_2 e^{-\gamma l}} = \frac{Z_H - Z_B}{Z_H + Z_B}, \quad (10)$$

где Z_H – сопротивление нагрузки; l – длина линии.

При согласованной нагрузке $K_U = 0$, при холостом ходе $K_U = 1$. Коэффициент отражения по току $K_I = K_U$.

Фазовая скорость волны

$$v_\phi = \omega / \beta. \quad (11)$$

В практике инженерных расчетов каждая фаза линии электропередач представляется в виде четырехполюсника, который, в свою очередь, заменяется простой схемой электрической цепи с сосредоточенными параметрами. Следует отметить, что представление линии

упрощенными схемами замещения позволяет учитывать искажение формы входного воздействия, но при этом не учитывается задержка сигнала во времени.

Высокочастотные дистанционные методы

Метод стоячих волн основан на измерении полного входного сопротивления поврежденной линии в широком диапазоне частот. Известно [1], что расстояние между резонансными частотами (максимумами и минимумами входного сопротивления) зависит от расстояния до места КЗ или обрыва.

Локационные методы основаны на измерении времени между моментом послышки в линию зондирующего электрического импульса и моментом прихода к началу линии импульса, отраженного от места повреждения. За это время импульс проходит путь, равный двойному расстоянию до места повреждения. Распространение сигнала по линии – сложный процесс, зависящий от числа, взаимного расположения, материала и размера проводов и тросов, их удаленности от поверхности земли, от ее электропроводности. Скорость перемещения волны (фазовая скорость) в линии без потерь, расположенной в вакууме и над идеально проводящей поверхностью равна скорости света (300 м/мкс). В реальной воздушной линии волна перемещается по петле «фаза–земля» со скоростью $v = 275$ м/мкс и по петле «фаза–фаза» со скоростью $v = 296$ м/мкс. В кабельной линии скорость распространения волны значительно ниже – 160 м/мкс и примерно одинакова для любой петли. В качестве преимуществ рефлектометров необходимо отметить следующее: сравнительно прост монтаж измерительного оборудования. В качестве недостатков таких приборов необходимо отметить следующее: сложность регистрации отраженного сигнала, который может отражаться не только от места аварии, но и от других неоднородностей линии. Рефлектометры реализуют косвенный метод измерения, на точность которого оказывают отрицательное влияние различные внешние факторы. Кроме того, отраженный сигнал всегда ослаблен и искажен, что является источником дополнительной погрешности измерения.

Волновые методы определяют моменты прихода на подстанцию возникающих в месте повреждения линии электромагнитных волн (волн разряда замкнувшейся на землю фазы). Этот метод отличается от локационного тем,

что источником информационного сигнала является аварийный участок линии. Форма сигнала, возникающая в месте короткого замыкания или обрыва, может иметь сложную форму, что отрицательно влияет на точность определения времени прихода сигнала. Приведенные ниже методы отличаются методиками регистрации времени прихода сигнала.

Волновой метод двусторонних измерений основан на измерении времени между моментами достижения двух концов линии фронтами электромагнитных волн, возникающих в месте повреждения. Необходимым условием реализации метода является синхронизированный счет времени на двух концах с высокой точностью (до микросекунд). Для реализации этого метода необходим источник синхронных сигналов, что является сложной технической задачей.

Волновые методы односторонних измерений основаны на измерении времени между приходами волн первого и второго отражений от места повреждения, либо разность времен прихода волн по каналу «фаза–фаза» и по каналу «фаза–земля».

Низкочастотные дистанционные методы

Петлевой метод основан на измерении сопротивления постоянному току жил кабеля, отключенного из-за пробоя фазы на землю. Переходное сопротивление в месте повреждения предварительно уменьшается с помощью операции прожигания изоляции от специального источника тока. Для измерения используется мостовая схема, плечами которой являются сопротивления жил, в одну диагональ моста включен измерительный прибор (для контроля условий равновесия), а в другую – источник питания и переходное сопротивление. По измеренным сопротивлениям косвенно определяется расстояние от места контроля до места пробоя.

Фиксирующие омметры. Фиксирующие омметры обеспечивают измерение и длительное хранение значений сопротивления петли КЗ при всех междупазных повреждениях в сети. По удельному сопротивлению линии шкала прибора градуируется непосредственно в километрах. Для исключения влияния на результат измерения расстояния переходного сопротивления $R_{\text{пер}}$ в месте КЗ, которое обычно имеет чисто активный характер, фиксирующие омметры измеряют не полное сопротивление петли КЗ ($Z_{\text{кз}}$), а только его индуктивную составляющую $X_{\text{кз}}$. Значение $Z_{\text{кз}}$ определяется актив-

ным сопротивлением участка линии до места КЗ ($R_{\text{кз}}$), переходным сопротивлением в месте КЗ ($R_{\text{пер}}$) и индуктивным сопротивлением участка линии $X_{\text{кз}}$ до места КЗ. Основными недостатками измерительных приборов фиксации сопротивления являются:

- погрешности ОМП от токов и нагрузок, подключенных в конце, а также на ответвлениях поврежденной ВЛ;
- значительное увеличение количества подводимых к фиксатору входных величин: два (три) фазных тока и три фазных напряжения;
- сложность фиксаторов сопротивления по сравнению с фиксаторами токов и напряжений обратной последовательности.

Емкостной метод основан на измерении емкости жилы от места контроля до места обрыва. По измеренной емкости косвенно определяется расстояние от места контроля до места пробоя.

По параметрам аварийного режима. Этот метод основан на измерении токов и напряжений обратной последовательности. Фиксация токов и напряжений обратной последовательности осуществляется с помощью специальных приборов, измеряющих и запоминающих значения токов и напряжений обратной последовательности в режиме замыкания двух фаз. Выделение составляющей тока или напряжения обратной последовательности производится в фильтре, входящем в состав фиксирующего прибора. Как и все дистанционные средства, фиксаторы этого типа позволяют определить лишь предполагаемое расстояние от шин питающей подстанции до места замыкания. При замыкании трех фаз метод фиксации токов (напряжений) обратной последовательности неприменим, так как симметрия токов (напряжений) не нарушается и составляющие токов (напряжений) обратной последовательности не возникают. Кроме того, к недостаткам этого метода необходимо отнести неблагоприятное влияние переходного сопротивления в месте короткого замыкания, которое уменьшает значение токов КЗ и как бы «удлиняет» расстояние до места КЗ. Еще одним источником погрешностей при этом методе является непостоянство сопротивления питающей сети, которое приводит к изменению значений токов при КЗ в одной и той же точке.

На основе более глубокого анализа разработаны классификационные признаки (см. таблицу).

Классификация дистанционных методов

Классификационные признаки	Дистанционные методы					
Частотные диапазоны	Высокочастотные методы			Низкочастотные методы		
Математические модели	Уравнения в частных производных (электрические цепи с распределенными параметрами)			Алгебраические уравнения по законам Кирхгофа (электрические цепи переменного тока)		
Форма возмущающего воздействия	Гармонический сигнал	Последовательность прямоугольных импульсов	Ступенчатое воздействие (Функция Хевисайда)	Постоянный сигнал	Гармонический сигнал	Гармонический сигнал
Источник возмущающего воздействия	Внешний источник (Метод стоячих волн)	Внешний источник (Локационный метод)	Внутренний источник – энергия электромагнитного поля в точке аварийной коммутации (Волновой метод)	Внешний источник (Петлевой метод)	Внешний источник (Емкостной метод)	Внутренний источник – коммутация электрический линии (Метод по параметрам аварийного режима)
Методы регистрации времени прихода сигнала	Одно-сторонний	Одно-сторонний	Двухсторонний Односторонний	Одно-сторонний	Одно-сторонний	Двухсторонний Односторонний
Влияние внешних факторов на точность ОМП	Значительное	Значительное	Значительное	Незначительное	Незначительное	Значительное
Помехоустойчивость	Высокая	Низкая	Низкая	Высокая	Высокая	Низкая
Степень искажения формы регистрируемого сигнала	невысокая	средняя	высокая	невысокая	невысокая	невысокая
Необходимость выполнения вычислительных операций	нет	нет	да	да	нет	да

Выводы

Проведенный анализ позволяет обоснованно осуществлять выбор метода для конкретной задачи. Из проведенного общего анализа методов следует, что наибольшему искажению подвергается информационный сигнал (функция Хевисайда) в волновом методе, а наименьшему – в методе стоячих волн. Поэтому потенциальная точность метода стоячих волн выше, чем других методов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аржанников, Е. А. Методы и приборы определения места короткого замыкания на линиях : учеб. пособие / Е. А. Аржанников, А. М. Чухин. – Иваново : Ивановский гос. энергетич. ун-т, 1998. – 74 с.
2. Арцишевский, Я. Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с изолированной нейтралью : учеб. пособие / Я. Л. Арцишевский. – М. : Высш. шк., 1989. – 87 с.
3. Арцишевский, Я. Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с заземленной нейтралью : учеб. пособие / Я. Л. Арцишевский. – М. : Высш. шк., 1988. – 94 с.

УДК 621.3

*О. О. Ахмедова***АНАЛИЗ ОШИБОК СРАБАТЫВАНИЯ СИСТЕМ
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ЭНЕРГЕТИКЕ****Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградского технического университета**

Приведен анализ причин возникновения ошибок срабатывания систем релейной защиты. 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, следовательно, УРЗА могут функционировать не корректно, если их уставки не отражают реального состояния контролируемой ВЛЭП.

Ключевые слова: ошибки срабатывания, релейная защита, воздушные линии, проводимость грунта.

*О. О. Akhmedova***ERROR ANALYSIS OF RELAY PROTECTION OPERATION IN POWER****Volgograd State Technical University (branch in Kamyshin)**

(e-mail: Ahmedova-olga@mail.ru)

The analysis of the reasons of emergence of errors of operation of systems relay is provided are sewn up. Parameters of air-lines of an electricity transmission are used by algorithms of many devices of relay protection and automatic equipment, their correct definition is necessary for ensuring correct functioning of systems of relay protection and automatic equipment. When determining longitudinal and the VLEP cross parameters use average data, therefore, URZA can function not correctly if their settings don't reflect a real condition of controlled VLEP.

Keywords: operation errors, relay protection, air-lines, conductivity of soil.

Аварийность и надежность систем электроснабжения во многом зависит от надежности срабатывания релейной защиты (см. таблицу). Релейная защита не может защитить систему электроснабжения от аварий, но может лишь ограничить масштабы его воздействия во времени и в пространстве на эту систему и снизить материальный ущерб от аварии [1].

Августовская авария 2003 года лишила электроэнергию пять крупнейших городов Америки и Канады. Это обвальное отключение электричества уже признано самой крупной энергетической аварией в истории Америки. Для обеспечения ее безаварийной работы существуют устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики, которые в этой ситуации не сработали.

В России таких крупных системных аварий пока не было, однако об их возможности ответственные специалисты в области электротехники говорят уже давно и не без оснований. В последнее время (15–20 лет) релейная защита не обновлялась и не модернизировалась.

При несрабатывании защиты на линии напряжением 110–220 кВ может быть обесточен целый микрорайон, а на линии 550 кВ – еще большая территория. Чем выше напряжение

линии, тем более тяжелые последствия, причем авария распространяется лавинообразно с очень большой скоростью.

На объектах ДЗО ОАО «Россети» по данным на 01.01.2015 в эксплуатации находится около 1,7 млн. устройств РЗА, из них:

- 77,45 % – электромеханических устройств (ЭМ);
- 4,12 % – микроэлектронных устройств (МЭ);
- 18,43 % – микропроцессорных устройств (МП).

Как известно, у реле защиты имеется два вида отказов: так называемые «несрабатывания» и «излишние срабатывания». Для предотвращения «несрабатывания» РЗ используют дублирование реле защиты, а именно для ответственных объектов применяют резервное реле, включенное в другой точке системы электроснабжения, которое позволяет компенсировать ущерб от несрабатывания первого реле защиты. При втором виде отказов [1] возникает другая ситуация, при которой неисправное реле защиты в результате излишнего срабатывания может выдать ложную команду на отключение выключателя и тем самым искусственно вызвать прекращение нормального функ-

ционирования системы электроснабжения. При этом происходит не только отключение тысяч потребителей, сопровождающееся большим ущербом, сопоставимым по своим последствиям с аварийным режимом в системе электроснабжения, но и возникает опасность крупной системной аварии, вызванной внезапными перетоками мощностей в сложной и разветвленной энергосистеме. Как показано в [2],

в 25–28 % случаев причиной возникновения крупнейших системных аварий, имевших место в мире, были отказы релейной защиты. А если добавить к этому, что в 50–70 % случаев перехода обычного аварийного режима в тяжелую системную аварию повинна также релейная защита [2], то получается, что именно она ответственна практически за все системные аварии.

Статистика работы устройств РЗА

	Случаи работы "правильно"		Случаи работы "неправильно"								Правильное срабатывание, %.	
			всего		в том числе							
	2013г.	2014г.			"ложно"		"излишне"		"отказы"		2013г.	2014г.
Всего	366748	534545	1653	1399	947	427	387	474	319	498	99,5%	99,7%

Современные задачи электроэнергетики предъявляют высокие требования, которые, в первую очередь, обосновываются появлением передовых алгоритмов релейной защиты и автоматики, базирующихся на явлении конечной скорости распространения высокочастотных волновых процессов в многопроводных линиях. Параметры воздушных линий электропередачи используются алгоритмами многих устройств релейной защиты и автоматики, следовательно, правильное их определение необходимо для обеспечения корректного функционирования систем релейной защиты и автоматики. Как правило, при определении продольных и поперечных параметров ВЛЭП используют усредненные данные, которые предполагаются неизменными, такие как проводимость грунта, физические свойства фазных проводников, атмосферные условия и геометрическое расположение фазных проводников относительно поверхности земли и друг друга. Следовательно, УРЗА могут функционировать некорректно (сработать ложно или излишне, или неверно определить расстояние до места повреждения), если их уставки не отражают реального состояния контролируемой ВЛЭП. Погрешность в расчетах по упрощенным формулам для модулей взаимных сопротивлений около 20 %.

Так ток замыкания при однофазном повреждении на землю протекает по поверхности земли, следовательно, для верного функционирования защиты нулевой последовательности необходимо учитывать сопротивления грунта,

так как контур протекания тока будет определяться местом повреждения, грунтом и заземленной нейтралью силового трансформатора. Проводимость земли вдоль линии электропередачи является одним из факторов оказывающих существенное влияние на величину удельного продольного сопротивления ВЛ, особенно это актуально в регионах со значительными сезонными колебаниями погодных условий (большая часть территории РФ).

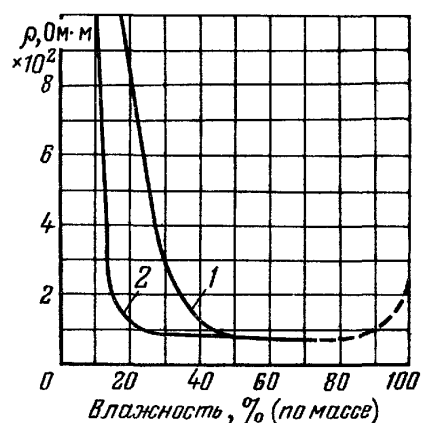


Рис. 1. Изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от содержания в нем влаги:
1 – тонкодисперсный грунт, 2 – грубодисперсный грунт

Грунты любого рода (песок, глина, чернозем) в абсолютно сухом состоянии обладают большим удельным сопротивлением, порядка 10^4 Ом·м, если же грунт увлажнить, то сопротивление его уменьшится в сотни раз благодаря растворению в воде солей, кислот и оснований,

содержащихся в грунте, а также за счет проводимости самой воды. Резкое снижение сопротивления грунта наблюдается при увеличении влажности до 15–20 % (по массе), дальнейшее увлажнение мало влияет на его сопротивление. При влажности 70–80 % сопротивление грунта может возрасти за счет снижения концентрации растворимых в воде веществ [3].

Температура грунта изменяется в зависимости от многих причин и оказывает существенное влияние на его удельное сопротивление. Грунт, содержащий влагу, является электролитом и поэтому обладает отрицательным температурным коэффициентом сопротивления: с ростом температуры его удельное сопротивление уменьшается, так как с повышением температуры увеличивается степень диссоциации молекул веществ, растворенных в воде, то есть возрастает концентрация ионов в растворе, что ведет обычно к снижению удельного сопротивления. Однако эта закономерность сохраняется до тех пор, пока влага не начинает испаряться, что сопровождается резким увеличением сопротивления.

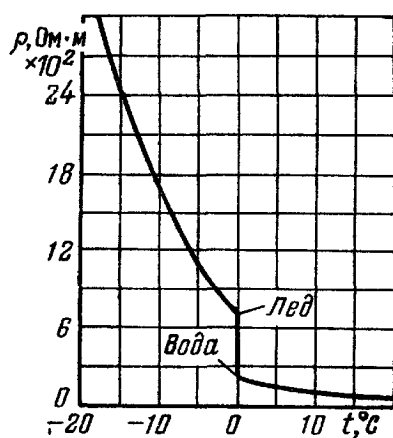


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления грунта (суглинок влажностью 15 % по массе) от температуры

Электромагнитная волна, распространяясь вдоль ЛЭП, наводит индуцированные токи (поверхностный эффект) в земле. Потери энергии в волны на создание этих токов определяются как геометрическими параметрами системы проводов, так и параметрами земли. В симметричной системе координат явлению возврата через грунт соответствует нулевая последовательность, а в модальной — земляной канал. Полное собственное сопротивление проводника воздушной линии электропередачи можно разделить на составляющие: одна из которых учи-

тывает влияние земли как неидеальной проводящей поверхности, а вторая — внутреннее сопротивление фазного провода.

Влияние конечной проводимости земли в частотной области при ее представлении однородной полубесконечной плоскостью с эквивалентной глубиной проникновения (рис. 3) может быть представлено с помощью аналитических выражений [4]:

$$Z_{\text{земли}}(j\omega)_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-(2h_i)\vartheta}}{\sqrt{\vartheta^2 + \gamma_{\text{земли}}^2} + \vartheta} d\vartheta;$$

$$Z_{\text{земли}}(j\omega)_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \times \int_0^\infty \frac{e^{-(h_i+h_j)\vartheta}}{\sqrt{\vartheta^2 + \gamma_{\text{земли}}^2} + \vartheta} \cos(d_{ij}\vartheta) d\vartheta,$$

где

$$\gamma_{\text{земли}}(j\omega) = \sqrt{j\omega\mu_0\mu_{\text{земли}}(\sigma_{\text{земли}} + j\omega \cdot \epsilon_0\epsilon_{\text{земли}})};$$

$\sigma_{\text{земли}}$ — проводимость земли, См/м; μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м; $\mu_{\text{земли}}$ — относительная магнитная проницаемость; ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м; $\epsilon_{\text{земли}}$ — относительная диэлектрическая проницаемость; h_i — высота подвеса i -го провода над землей, м; d_{ij} — горизонтальное расстояние между i -м и j -м проводами, м.

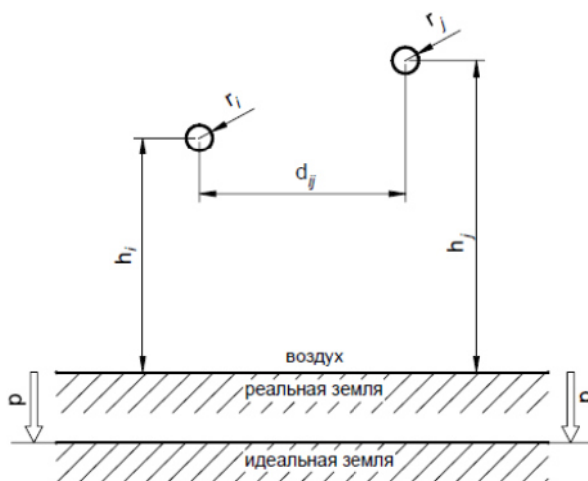


Рис. 3. Эквивалентная глубина проникновения волн относительно поверхности земли

Точное решение выражений может быть получено с использованием функций Бесселя первого и второго родов [4]. Решение этих функций, в свою очередь, представляется в виде рядов. Такое представление не очень удобно для практических инженерных расчетов. Поэтому обычно его упрощают путем использования только первых членов рядов и исключением из

рассмотрения тока смещения в земле [5]. Как показывают расчеты [6], такой подход демонстрирует отличную точность в низкочастотной области.

Из вышеприведенных зависимостей следует, что сопротивление грунта на поверхности земли изменяется в широком диапазоне и использование постоянного табличного значения может привести к погрешностям в расчетах и как следствие к неверному срабатыванию защиты нулевой последовательности.

Главная трудность точного определения сопротивления нулевой последовательности ВЛЭП связана с учетом распределения тока в земле. Достаточно полное и строгое решение в предположении постоянства электрической проводимости земли выполнено Карсоном. Но в ряде имеющих место на практике случаях (например, линия проходит параллельно водоему или скальному образованию) поверхность земли не может быть представлена однородной полубесконечной плоскостью.

На основе вышеизложенного предполагается создание многомерной математической модели, позволяющей на основании исходных

данных о погодных условиях, времени года, сопротивлении грунта, тока, напряжения и так далее прогнозировать значения уставок и корректировать настройку устройств релейной защиты, что позволит уменьшить долю ложных срабатываний релейной защиты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуревич, В. И. Вопросы философии в релейной защите / В. И. Гуревич // Мир техники и технологии. – 2013. – № 1.
2. Саратов, Н. Е. Анализ подходов к исследованию процессов протекания системных аварий / Н. Е. Саратов // Системные исследования в энергетике. Материалы конф. молодых ученых. – Иркутск : ИСЭМ. – 2007.
3. Долин, П. А. Основы техники безопасности в электроустановках / П. А. Долин : учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.
4. Electromagnetic field interaction with transmission lines: From Classical Theory to HF Radiation Effects / F. Rachidi, S. Tkachenko, (editors.). – Boston: WIT Press, 2008.
5. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. – М.: Энергия, 1979.
6. Токарев, С. Ю. Анализ методов определения первичных параметров ЛЭП с учетом влияния земли / С. Ю. Токарев, В. Д. Лебедев : тез. докл. XVII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». В 3 т. Т. 3. – М.: МЭИ, 2011. – С. 372–373.

УДК 62.192

Ф. С. Ле

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДЕРЕВА ОТКАЗОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Волгоградский государственный технический университет

В статье изложена оценка надежности системы регистрации аварийных режимов воздушных линий электропередачи с помощью метода дерева отказов, которой позволяет сравнительно просто определить значение вероятности безотказной работы и выявить причины главных отказов, которых могут возникать в системе.

Ключевые слова: надежность системы, метод дерева отказов, аварийные режимы.

F.S. Le

APPLICATION OF THE METHOD OF FAULT TREE FOR RELIABILITY ASSESSMENT OF REGISTRATION EMERGENCY MODE OF OVERHEAD POWER LINES

Volgograd State Technical University

E-mail: xuanphu284@gmail.com

In the article the assessment of reliability of the system, which registered the failure state of power transmission line by using the method of fault tree. This method allows easy to determine the probability of failure-free operation and identify the causes of the major failures that may occur in the system.

Keywords: system reliability, fault tree method, emergency operation.

Введение

В 1961 году Х. А. Уотсон из «Белл телефон» предложил метод анализа надежности с ис-

пользованием дерева отказов для систем управления межконтинентальными ракетами «Минитмен». В дальнейшем Д. Ф. Хаасль развил эту

методику для широкого круга технических проблем, относящихся к надежности. Основное преимущество дерева отказов в сравнении с другими методами заключается в том, что анализ ограничен выявлением только тех элементов системы и событий, которые приводят к данному конкретному отказу или аварии [1].

Метод анализа с помощью дерева отказов является наиболее эффективным для устранения причин отказов. Дерево отказов (аварий, происшествий, последствий нежелательных событий и пр.) лежит в основе логико-вероятностной модели причинно-следственных связей отказов системы (как вида проявления опасности) с отказами ее элементов и другими событиями (воздействиями). При анализе возникновения отказа системы (происшествия) событие представляется последовательностью и комбинацией нарушений и неисправностей, и таким образом оно представляет собой многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей, полученных в результате проследживания динамики развития опасных ситуаций в обратном порядке, для того чтобы отыскать возможные причины их возникновения [2].

Метод дерева отказов, как и любой другой, обладает определенными достоинствами и недостатками. Так, например, метод дает представление о поведении системы, но требует от специалистов по надежности глубокого понимания системы и конкретного рассмотрения каждый раз только одного определенного отказа; помогает дедуктивно выявлять отказы; дает конструкторам, пользователям и руководителям возможность наглядного обоснования конструктивных изменений и анализа компромиссных решений; позволяет выполнять количественный и качественный анализ надежности; облегчает анализ надежности сложных систем. Вместе с тем реализация метода требует значительных затрат средств и времени. Кроме того, полученные результаты трудно проверить и трудно учесть состояния частично-го отказа элементов, поскольку при использовании метода, как правило, считают, что система находится либо в исправном состоянии, либо в состоянии отказа. Существенные трудности возникают и при получении в общем случае аналитического решения для деревьев, содержащих резервные узлы и восстанавливаемые узлы с приоритетами, не говоря уже о тех значительных усилиях, которые требуются для охвата всех видов множественных отказов [3].

Для регистрации аварийных режимов воздушных линий электропередачи (ЛЭП) разработана информационно-измерительная система (ИИС) мониторинга ЛЭП [4], которая оперативно определяет вид и место аварии и передает информацию на диспетчерский центр. Полученная информация позволяет своевременно устранять аварию и повышать надежность энергоснабжения. Эта система содержит датчики электрического и магнитного поля для косвенного измерения параметров электромагнитного поля, создаваемого проводами линии электропередач. По изменению электромагнитного поля, вызванного аварийными режимами, система определяет вид аварии. Очевидно, что надежность работы информационно-измерительной системы оказывает влияние на надежность электроснабжения. Для оценки надежности ИИС был использован метод дерева отказов.

1. Анализ блок-схема системы

Функциональная блок-схема системы регистрации аварийных режимов представлена на рис. 1. Система содержит блок первичной обработки информации, в состав которого входят датчики двух величин: напряженности электрического поля E и индукции магнитного поля B . Датчики электрического поля представляют собой конденсаторы емкостью C , а датчики магнитного поля представляют собой катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником. При монтаже системы конденсаторы монтируются таким образом, чтобы обкладки конденсатора были перпендикулярны вектору напряженности E , а ось катушки совпадала с вектором индукции B . Датчики 1 и 2, регистрируют суммарную напряженность электрического поля E , создаваемую всеми проводами линии. Датчики 1 и 2 устанавливаются в плоскости, которая перпендикулярна проводам ВЛЭП, с угловым относительным смещением ϕ по окружности, центр которой совпадает с центром окружности, проходящей через центры поперечных сечений трех проводов. Датчик магнитного поля 3, регистрирует индукцию магнитного поля B , создаваемую проводами линии, и установлен таким образом, что ось ферромагнитного сердечника совпадает с окружностью, центр которой совпадает с центром проходящей через три провода описанной окружности. Кроме того, блок первичной обработки информации содержит датчик тока короткого замыкания (КЗ) по опоре ВЛЭП 4,

который регистрирует магнитное поле тока КЗ. Датчик 4 выполнен в виде катушки индуктивно-

сти с замкнутым вокруг опоры ВЛЭП ферромагнитным проводом [4].

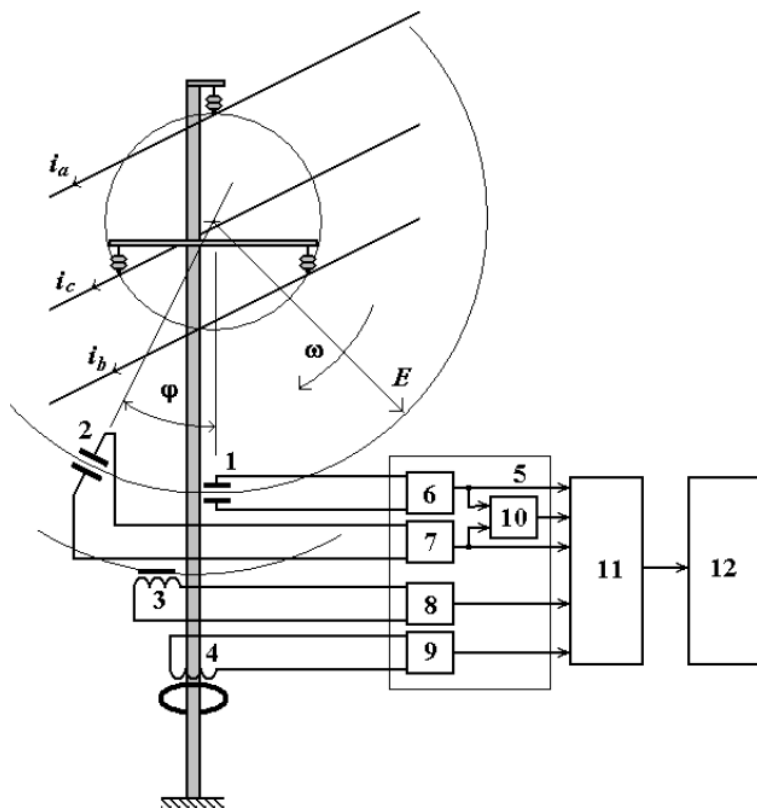


Рис. 1. Функциональная схема ИИС

Для оценки надежности системы регистрации аварийных режимов воздушных линий электропередачи с помощью метода анализа де-

рева отказов, то функциональная схема ИИС преобразована в блок-схему, которую представлена на рис. 2.

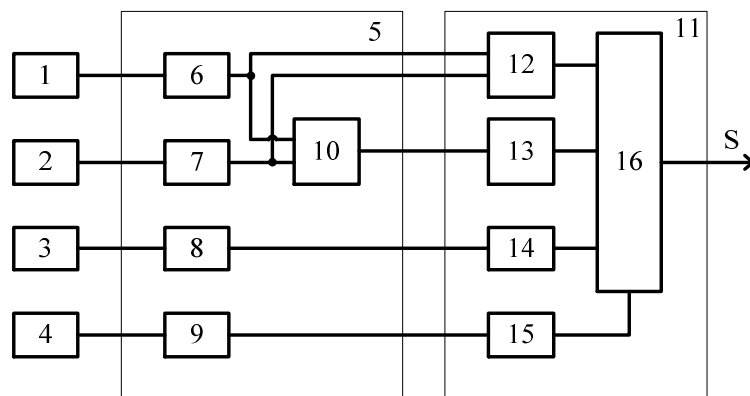


Рис. 2. Блок-схема системы регистрации аварийных режимов воздушных линий электропередачи

Сигналы с датчиков 1, 2, 3, 4 поступают на входы блока обработки сигналов 5, который содержит набор усилителей 6, 7, 8, 9 и устройство определения сдвига фаз сигналов 10, на вход которого поступают сигналы с усилителей 6 и 7. Сигналы с усилителей 6, 7, 8, 9 и устрой-

ства определения сдвига фаз сигналов 10 поступают на аналого-цифровые преобразователи (АЦП) 12, 13, 14, 15 блока обработки информации 11. АЦП 12 и 13 представляют собой трехуровневые пороговые устройства. Цифровые сигналы с АЦП поступают на устройство обра-

ботки информации 16. Это устройство анализирует сигналы и определяет текущее состояние линии (нормальная работа или аварийные режимы). Сигналы с АЦП 12, 13, 14 содержат информацию о состоянии линии, а сигнал с АЦП 15 – информацию о коротком замыкании по опоре. Если происходит аварийный режим, то соответственно изменяются сигналы на выходах датчиков 1, 2, 3 и 4. Сигналы с датчиков на блок 5 поступают на вход блока 11, который вырабатывает сигнал, соответствующий аварийному режиму. Информация об аварийном режиме затем передается на диспетчерский пункт.

2. Построение дерева отказов

Основной целью построения дерева отказов является символическое представление существ-

вующих в системе условий, способных вызвать ее отказ. Кроме того, построенное дерево позволяет показать в явном виде слабые места системы и является наглядным средством представления и обоснования принимаемых решений, а также средством исследования компромиссных соотношений или установления степени соответствия конструкции системы заданным требованиям [3].

Построение дерева отказов, как правило, начинается с выбора главного события, которое имеет большое значение для результата анализа. Главное событие должно быть выбрано конкретно и недвусмысленно. Конкретная система может иметь более одного главного события. Однако, если оно слишком общее, то анализ становится неуправляемым.

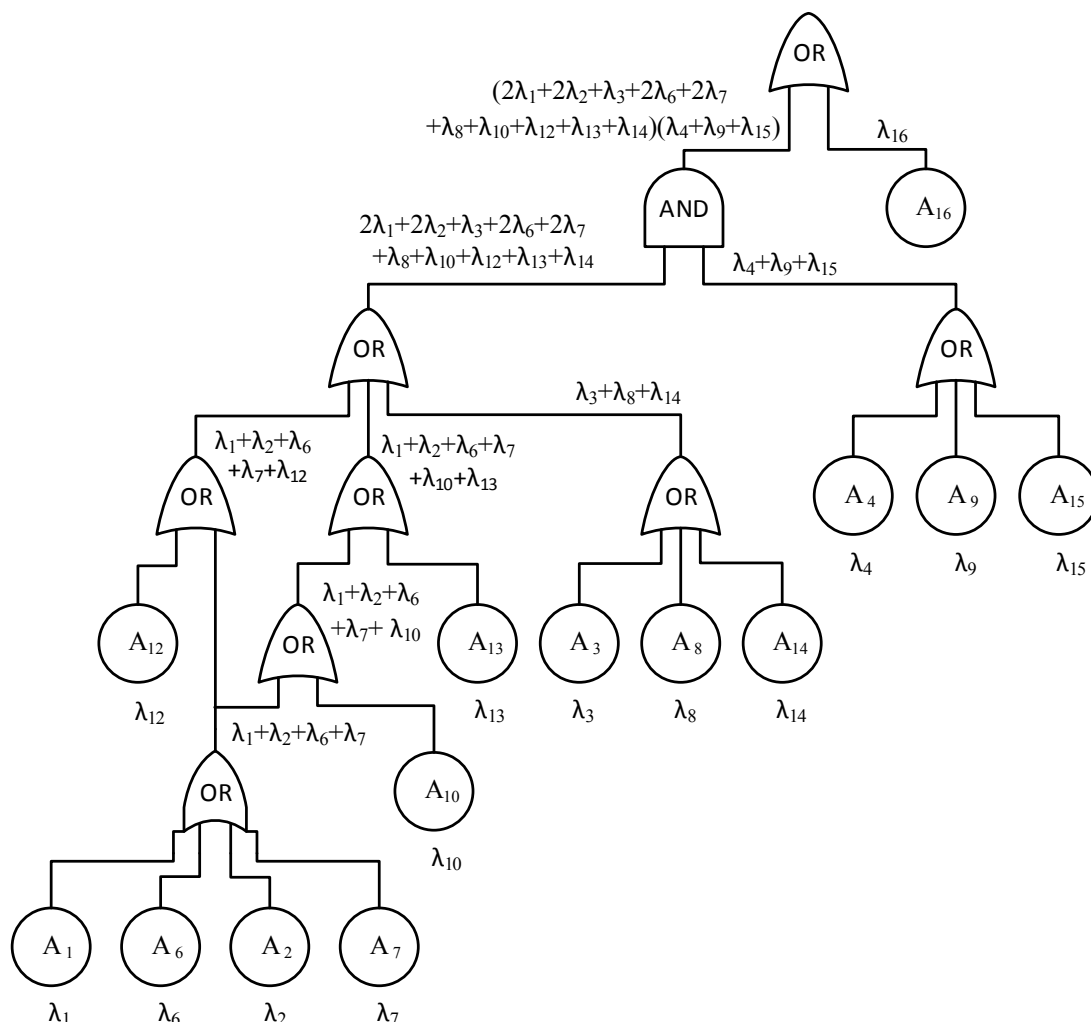


Рис. 3. Дерево отказов системы регистрации аварийных режимов воздушных линий электропередачи

Дерево отказов не является моделью всех возможных отказов системы или всех возможных причин для отказа системы. Дерево отказов проектируется на его главное событие, ко-

торое соответствует некоторому режиму конкретного отказа системы. И поэтому дерево отказов включает только те отказы, которые вносят вклад в главное событие, то есть самые на-

дежные отказы, оцениваемые аналитиком [5]. Эти отказы соединены с главным событием через логические элементы.

При построении дерева отказов используют только первичные отказы. Построение дерева на основе учета только первичных отказов не представляет большой сложности, так как дерево строится только до той точки, где идентифицируемые первичные отказы элементов вызывают отказ всей системы. Для системы, приведенной выше, выбрано главное событие «устройство 16 выводит неверный результат». Дерево отказов приведено на рис. 2. A_1, A_2, A_3, A_4 – это отказ датчиков 1, 2, 3, 4 соответственно. A_6, A_7, A_8, A_9 – это отказ усилителей 6, 7, 8, 9 соответственно. A_{10} – отказ устройства 10 определения сдвига фаз сигналов. $A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{15}$ – отказ аналого-цифровых преобразователей (АЦП) 12, 13, 14, 15 соответственно. A_{16} – отказ устройства обработки информации 16.

3. Анализ дерева отказов

При построении дерева отказов выполняются следующие операции: значения вероятностей отказов на входах элемента ИЛИ складываются, а значения вероятностей отказов входах элемента И перемножаются. На рис. 2 приведена схема дерева отказов системы, которая обнаруживает аварийные режимы воздушных линий электропередачи по информации с четырех датчиков. Если один из них отказывает, то

Интенсивность отказов элементов ($\lambda \times 10^6, 1/\text{ч}$)

Наименование элементов	Интенсивность отказов $\lambda \times 10^6, 1/\text{ч}$
Датчик 1	0,5
Датчик 2	0,5
Датчик 3	0,3
Датчик 4	0,3
Усилитель 6	0,05
Усилитель 7	0,05
Усилитель 8	0,05
Усилитель 9	0,05
Устройство определения сдвига фаз сигналов 10	0,04
АЦП 12	0,07
АЦП 13	0,07
АЦП 14	0,03
АЦП 15	0,03
Устройство обработки информации 16	0,013

система выдает неправильный результат. Кроме того, система выдает неправильный результат и при отказе других элементов. Для того чтобы оценить интенсивность отказов всех элементов в численном выражении, необходимо присвоить значения интенсивности отказов каждому входному элементу. Численные значения приведены в таблице.

Значения интенсивности отказов являются оценками и могут изменяться в зависимости от условий эксплуатации и тестирования. Это связано, что система установлена на открытом воздухе и подвержена влиянию внешних климатических факторов. Вредное воздействие на работу системы оказывает коррозия, если компоненты системы не защищены, то коррозия может привести к большому ущербу [6].

Допустим, что если распределение времени безотказной работы элементов системы подчиняется экспоненциальному закону (в этом случае интенсивность отказов постоянна), то для невозстанавливаемых элементов распределение вероятности отказа выражается законом Пуассона [7]:

$$P(m) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^m}{m!}, \quad (1)$$

где m – число случайных событий (отказов); $\lambda = \frac{1}{T}$ – интенсивность отказов (T – время наработки на отказ); t – рассматриваемый интервал времени.

Вероятность безотказной работы невозстанавливаемых элементов можно найти, приравняв $m = 0$ на том же интервале времени t :

$$R(t) = \frac{(\lambda t)^0 e^{-\lambda t}}{0!} = e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

Величина $R(t)$ и вероятность появления отказа в момент времени t связаны соотношением $R(t) + F(t) = 1$. В заданном примере значение вероятности появления отказа системы в течение одного года составила $F = 0,008$.

Заключение

Анализ надежности информационно-измерительных систем с помощью метода дерева отказов позволяет сравнительно просто определить значение вероятности безотказной работы, выявить причины главных отказов и рекомендовать мероприятия для исправления и предотвращения отказов, которые могут возникать в системе, что дает возможность производителям определить компоненты для системы. Этот метод является эффективным визуальным инструментом для проектирования ИИС. В статье приведен пример анализа для ИИС регистрации

аварийных режимов воздушных линий электропередачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костерев, В. В. Надежность технических систем и управление риском : учеб. пособие / В. В. Костерев. – М. : МИФИ, 2008. – 280 с.
2. Костиков, В. А. Надежность технических систем и техногенный риск / В. А. Костиков. – М. : ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. – 368 с.
3. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон : Пер. с англ / Ч. Сингх. – М. : Мир, 1984. – 318 с.

4. Шилин, А. Н. Информационно-измерительная система определения повреждений воздушной линии электропередачи / А. А. Шилин // Приборы. – 2011. – № 5. – С. 23–29.
5. Vesely W.E. Fault Tree Handbook / F.F. Goldberg, N.H. Roberts, D.F. Haas. – U.S. Nuclear Regulatory Commission, D.C. 20555, January, 1981, с. 209.
6. Rajan A. A. Review of Corrosion and Environmental Effects on Electronics / A Publication of Centre for Electronic Corrosion. Sep 16, 2014, с. 16.
7. Трубицын, В. И. Надежность электростанций : учебник для вузов / В. И. Трубицын. – М. : Энергоатомиздат, 1997. – 240 с.

УДК 621 315

А. А. Шилин, С. С. Дементьев

МАГНИТОМЕТРИЧЕСКАЯ ДИГНОСТИКА ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Волгоградский государственный технический университет

Приведена методика бесконтактной диагностики гололедообразования на воздушных линиях электропередачи. Задача обнаружения и измерения веса отложений сведена к контролю провисания провода и изменения магнитного поля. Приведен пример технической реализации системы, использующей предлагаемый метод диагностики состояния воздушной линии.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, магниточувствительный датчик, диагностика гололедообразования.

A. A. Shilin, S. S. Dementyev

MAGNETOMETRIC DIAGNOSTICS OF THE ICE ACCRETION PROCESS ON OVERHEAD POWER LINES

Volgograd State Technical University

(e-mail: eltech@vstu.ru)

The methodology of non-contact diagnostics of the ice accretion process on overhead power lines is presented. The task of detection and sediment weight measurement is adduced to control conductor sag and magnetic field change. It is presented the sample of technical implementation of the system that uses the proposed overhead line monitoring method.

Keywords: information-measuring system, magnetic field sensor, diagnostics of the ice accretion process.

Отказы воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) по причине гололедообразования сопровождаются большим объемом повреждений и требуют наибольшего времени для восстановления, что может стать причиной значительного материального ущерба и иметь тяжелые социальные последствия.

Для минимизации риска отказов ВЛЭП в результате обледенения проводов сетевые службы все чаще прибегают к использованию автоматических информационно-измерительных систем (ИИС) мониторинга гололедообразования, среди которых наиболее распространенными являются гравитационные устройства диагностики [2], выполняющие измерения гололедной нагрузки с помощью силоизмерительных датчиков. Тем не менее, данные системы при внедрении на существующих ВЛЭП требуют сложного и длительного монтажа, так

как применение силоизмерительных датчиков влечет за собой необходимость изменения конструкции линии.

Ввиду вышеупомянутого перспективным выглядит создание системы, регистрирующей наличие гололедной нагрузки по изменению магнитного поля линии в результате увеличения провисания проводов при обледенении. Предлагаемая ИИС (рис. 1) содержит два измерительных поста, один из которых устанавливается на стойке опоры и включает в себя датчик температуры I , а другой размещается в точке, соответствующей наибольшему провису провода, при этом на каждом из постов измерений содержатся чувствительные магниторезистивные элементы 2, 3, регистрирующие изменение геометрии промежуточного пролета соответственно под действием ветра и при наличии гололедных отложений.

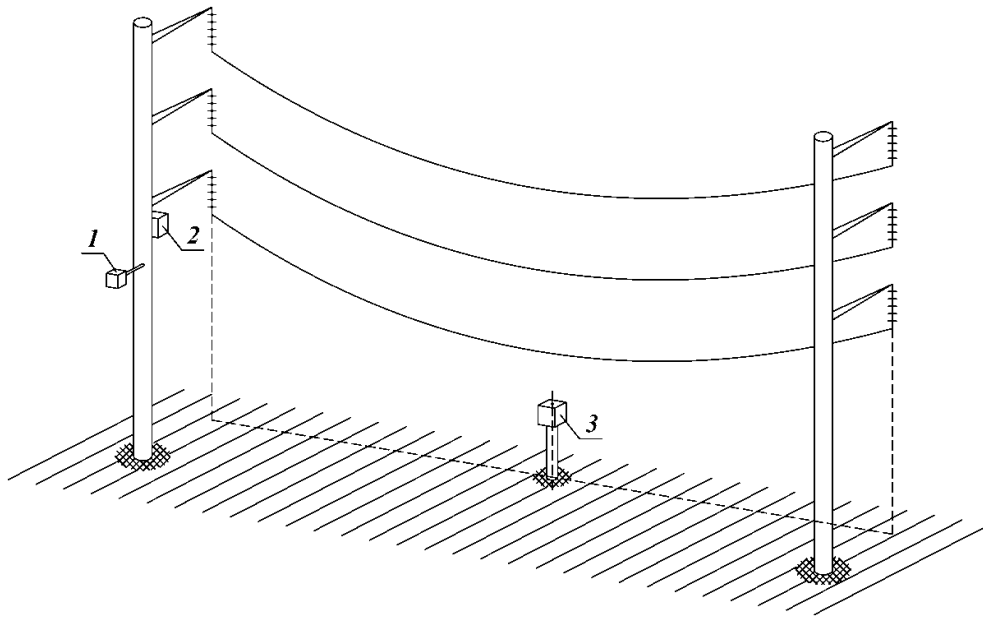


Рис. 1. Система магнитометрической диагностики гололедообразования на ВЛЭП

Высота установки датчика магнитного поля (МП) 2, размещаемого на опоре, выбирается исходя из максимального отклонения величины магнитной индукции при изменении положения гирлянд изоляторов относительно вертикали, а датчик поля 3 вспомогательного поста измерений устанавливается на оси, проходящей через центры фазных проводников при их нулевом отклонении. Информация с измерительных постов посредством радиоканала поступает на ЭВМ, выполняющую обработку данных с помощью программного обеспечения, реализующего специальный алгоритм.

Согласно данному алгоритму после сбора значений, регистрируемых измерительными постами величин магнитного поля B_1 , B_2 , температуры окружающей среды t и измеренного на подстанции фазного тока линии I , выполняется расчет магнитной индукции в точке установке датчика магнитного поля главного измерительного поста B_{1p} , считая, что гирлянды изоляторов не отклоняются от вертикального положения ($\varphi = 0$). Расчет магнитного поля выполняется по методике, изложенной в [3].

Магнитное поле B_A вокруг провода фазы A имеет величину

$$B_A = \frac{I_A}{2\pi r} = \frac{I_A}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(x_A - x_0)^2 + (y_A - y_0)^2}}, \quad (1)$$

где x_A , y_A – координаты подвеса провода фазы A , x_0 , y_0 – координаты установки датчика поля. При этом горизонтальная составляющая индукции для линии с вертикальным расположением проводов, изображенной на рис. 1:

$$B_{xA} = B_A \cdot \frac{x_A - x_0}{\sqrt{(x_A - x_0)^2 + (y_A - y_0)^2}}. \quad (2)$$

Объединив выражения (1), (2), получим:

$$B_{xA} = \frac{I_A}{2\pi} \cdot \frac{x_A - x_0}{(x_A - x_0)^2 + (y_A - y_0)^2}. \quad (3)$$

Очевидно, что вертикальная составляющая поля будет вычисляться аналогично:

$$B_{yA} = \frac{I_A}{2\pi} \cdot \frac{y_A - y_0}{(x_A - x_0)^2 + (y_A - y_0)^2}. \quad (4)$$

Составляющие магнитных полей фаз B и C рассчитываются по формулам, идентичным (3), (4).

С учетом сдвига на 120° токов трехфазной системы электроснабжения модули горизонтальной B_x и вертикальной B_y составляющих поля, создаваемого проводами, могут быть определены как [3]

$$B_x = \sqrt{\left(B_{xA} - \frac{1}{2}B_{xB} - \frac{1}{2}B_{xC}\right)^2 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}B_{xB} + \frac{\sqrt{3}}{2}B_{xC}\right)^2}, \quad (5)$$

$$B_y = \sqrt{\left(B_{yA} - \frac{1}{2}B_{yB} - \frac{1}{2}B_{yC}\right)^2 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}B_{yB} + \frac{\sqrt{3}}{2}B_{yC}\right)^2}. \quad (6)$$

Результирующее поле в точке установки датчика [3]

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}. \quad (7)$$

Если расчетное значение индукции B_{1p} больше фактического B_1 , то делается вывод о том, что гирлянды отклонены влево и приближены к стойке опоры, после чего выполняется процесс итерационного подбора величины угла отклонения гирлянды φ в диапазоне $\varphi = 0 \dots -\varphi_{\max}$ град до тех пор, пока расчетное и фактическое значения магнитной индукции не совпадут с заданной точностью. При этом в формулах расчета B_{1p} (5)–(7) координаты фазных проводов с учетом угла φ будут определяться следующим образом (на примере ф. А):

$$x_A = x_{A0} + \lambda \cdot \sin \varphi, \quad (8)$$

$$y_A = y_{A0} + \lambda \cdot (1 - \cos \varphi), \quad (9)$$

где x_{A0}, y_{A0} – координаты подвеса провода при $\varphi = 0$, λ – длина гирлянды изоляторов.

Аналогичным образом находится угол отклонения гирлянды изоляторов при ветре, действующем слева направо (диапазон подбора $\varphi = 0 \dots +\varphi_{\max}$ град).

На следующем шаге выполняется расчет стрелы провеса провода, *свободного* от гололеда, $f = f_{\text{норм}}$.

Длина провода в пролете в рассматриваемом режиме L_p при температуре t_p соотносится с длиной провода L_u при температуре исходного режима линии t_u следующим образом [1]:

$$L_p = L_u \left[1 + \alpha (t_p - t_u) \right],$$

где α – температурный коэффициент линейного удлинения провода.

Удельная нагрузка от собственного веса P_n провода сечением F в текущем температурном режиме [1]:

$$\gamma_p = \frac{P_n}{F} L_p. \quad (10)$$

Искомая величина стрелы провеса [1]:

$$f = \frac{l}{8 \cdot \sigma_p} \gamma_p, \quad (11)$$

где l – длина пролета, σ_p – величина механического напряжения в материале провода, являющаяся решением уравнения состояния провода [1].

Далее с учетом найденного угла отклонения гирлянд φ определяются координаты низших точек провисания фазных проводов и значение магнитной индукции в месте установки датчи-

ка магнитного поля вспомогательного поста измерений B_{2p} .

Координаты низших точек провисания фазных проводов вычисляются по формулам, аналогичным (8), (9) (на примере ф. А):

$$x_A' = x_{A0} + (\lambda + f) \cdot \sin \varphi, \quad (12)$$

$$y_A' = y_{A0} + (\lambda + f) \cdot (1 - \cos \varphi). \quad (13)$$

Расчет магнитной индукции B_{2p} в точке установки датчика вспомогательного поста измерений выполняется по методике, описанной выше.

Равенство расчетного B_{2p} и фактического значений B_2 индукции позволяют сделать вывод об отсутствии гололедных отложений. Если расчетное значение индукции не совпадает с фактическим, то делается вывод о наличии отложений и увеличении стрелы провеса на величину Δf (см. рис. 2), после чего выполняется процесс итерационного подбора величины отклонения стрелы провеса в диапазоне $\Delta f = 0 \dots \Delta f_{\max}$. Следует отметить, что в данном случае стрела провеса в формулах (12), (13) и далее $f = f_{\text{норм}} + \Delta f$. Подбор Δf осуществляется до выполнения с заданной точностью равенства $B_{2p} = B_2$.

На следующем шаге алгоритма определяется величина механического напряжения в материале провода σ_p при *наличии* гололедной нагрузки.

Выражая из (11) отношение γ_p / σ_p (где γ_p – удельная нагрузка от веса провода и веса гололеда при текущей температуре t_p) и подставляя полученное выражение в уравнение состояния провода [1], находим выражение для расчета механического напряжения в материале в данном режиме:

$$\sigma_p = \sigma_u + E \left[\frac{8 \cdot f^2}{3} + \frac{\gamma_u^2 \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_u^2} - \alpha \cdot (t_p - t_u) \right].$$

На следующем этапе алгоритма вычисляется значение габарита линии до земли h , необходимое для расчета длины провода в пролете L_p при $f = f_{\text{норм}} + \Delta f$:

$$h = H - f,$$

где H – высота подвеса нижнего провода.

Форма провисания провода в промежуточном пролете подчиняется уравнению цепной линии [1], следовательно, используя формулу длины дуги гладкой кривой, можно определить длину провода в пролете:

$$L_p = \frac{1}{2} \left(l \sqrt{1 + \frac{l^2}{h^4}} + h^4 \ln \left| \frac{l/h^2 + \sqrt{1 + \frac{l^2}{h^4}}}{l/h^2 - \sqrt{1 + \frac{l^2}{h^4}}} \right| \right).$$

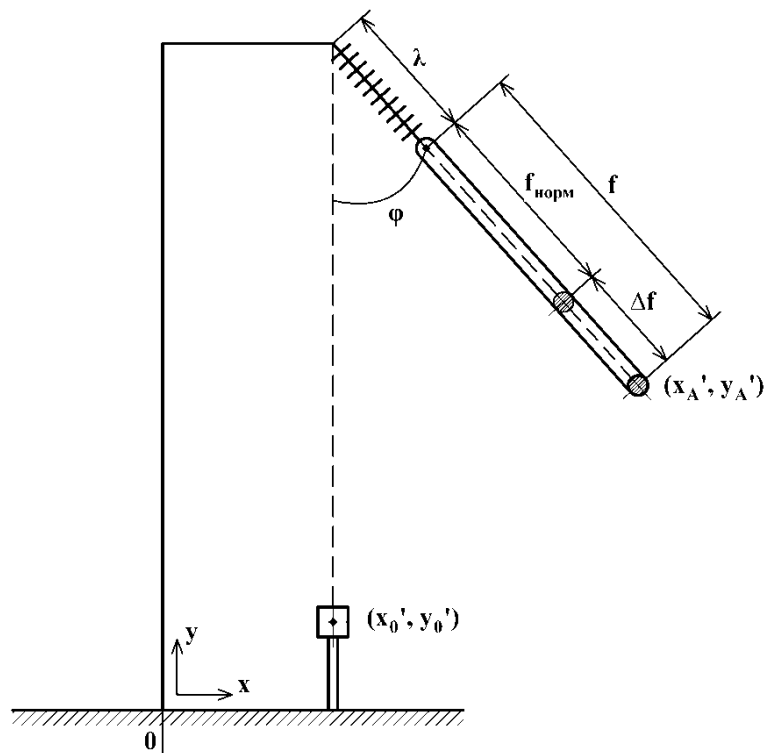


Рис. 2. Положение фазного провода при отклонении гирлянды изоляторов в поперечном сечении пролета

Далее рассчитываются гололедная P_r и ветровая P_v нагрузки на провод.

Удельная нагрузка на провод согласно (10), (11) с учетом наличия отложений

$$\gamma_p = \frac{8 \cdot \sigma_p \cdot f}{l} = \frac{P_r + P_n}{F} L_p,$$

откуда значение гололедной нагрузки

$$P_r = \frac{8 \cdot \sigma_p \cdot f \cdot F}{l \cdot L_p} - P_n.$$

Тогда с учетом найденного ранее угла отклонения φ гирлянды изоляторов ветровая нагрузка на провод

$$P_v = P \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

где $P = P_n$ при отсутствии обледенения и $P = P_n + P_r$ при наличии гололедных отложений.

Предлагаемая система магнитометрической диагностики обледенения реализует бесконтактное обнаружение и измерение гололедной и ветровой нагрузок на провода воздушных линий электропередачи за счет чего, в отличие от гравитационных ИИС, обеспечиваются просто

та и легкость монтажа устройства на существующих ВЛЭП. Система целесообразно использует тот факт, что магнитное поле является более устойчивым, нежели электрическое, что позволяет создать ИИС, гораздо менее подверженную внешним условиям воздействия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крюков, К. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи / К. П. Крюков, Б. П. Новгородцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, Ленинг. отделение, 1979. – 312 с.
2. Угаров, Г. Г. Системы мониторинга гололедообразования и перспективы их совершенствования / Г. Г. Угаров, Д. Е. Титов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 7. – С. 52–59.
3. Пат. 2437105 Российская Федерация, МПК G01R15/14. Датчик, способ и система текущего контроля линий электропередачи / Сиракьюз С.Д., Кларк Р., Халверсон П. Г., Тэш Ф. М., Барлоу Ч. В.; заявитель и патентообладатель ПРОМИТИЭН ДИВАЙСЕС ЭлЭлСи. – № 2009113018/28; заявл. 07.09.2007; опубл. 20.12.2011, Бюл. № 35. – 39 с.

УДК 621.311.315.1

*М. В. Панасенко, А. Г. Сошинов, Т. В. Копейкина, О. О. Ахмедова***ТЕХНИЧЕСКИЕ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ
ПО СНИЖЕНИЮ ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫХ АВАРИЙ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ****Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета**

Представлен краткий обзор причин отказов воздушных линий электропередачи напряжением 35–750 кВ. Главными причинами, вызывающими резкое увеличение повреждаемости воздушных линий электропередач, являются климатические воздействия (38 % из всех отказов). Частично рассмотрена система мероприятий по предотвращению и ликвидации гололедно-ветровых аварий, включающая в себя только технические и организационные мероприятия.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, гололедно-ветровые аварии, техническое состояние электросетей, плавка гололеда, надежность.

*M. V. Panasenko, A. G. Soshinov, T. V. Kopeikina, O. O. Akhmedova***TECHNICAL AND ORGANIZATIONAL MEASURES TO REDUCE
THE GLAZE-WIND ACCIDENTS IN ELECTRICITY SUPPLY NETWORKS****Volgograd State Technical University (branch in Kamyshev)**
(e-mail: panasenkom@mail.ru)

The short review of causes of failures of power lines of an electricity transmission of 35–750 kV is submitted. The main reasons causing sharp increase in damageability of overhead power transmission lines are climatic influences (38 % from all refusals). The system of actions for prevention and elimination of ice and wind accidents including only technical and organizational actions is partially considered.

Keywords: power lines, ice and wind accidents, technical condition of power supply networks, ice melting, reliability.

На современном этапе развития электроэнергетики Российской Федерации актуальными задачами являются: энергосбережение, повышение эффективности и надежности работы электроэнергетических систем. Воздушные линии являются наименее надежным элементом электрических сетей – до 80 % всех повреждений в сетях приходится на их долю.

Надежность работы воздушных линий (ВЛ) электропередачи обусловлена совокупностью ряда факторов. Выявить, истинные причины отказов и наметить пути их снижения, можно только на основании статистических данных о повреждаемости элементов линии. Отказы являются единственным критерием проверки правильности практических решений и теоретических предположений.

Обработка материалов АО «Фирмы ОРГРЭС» по устойчивым отключениям воздушных линий (ВЛ) электропередачи дает возможность выделить пять основных причин потери линиями работоспособного состояния (рис. 1). Главными причинами, вызывающими резкое увеличение повреждаемости ВЛ, являются климатические воздействия: грозовые перенапряжения, гололед

и ветровые нагрузки, повышение и понижение температуры, паводки, наводнения и т. п.

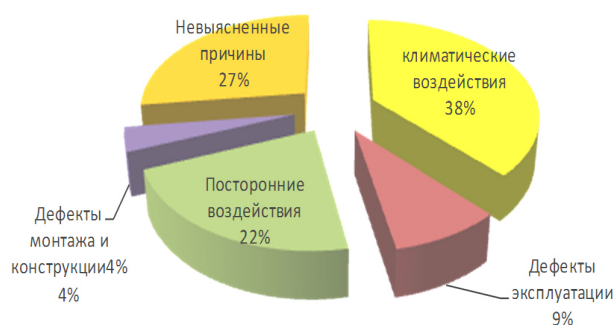


Рис. 1. Причины отказов ВЛ напряжением 35–750 кВ

Наиболее тяжелыми по своим последствиям являются гололедно-ветровые воздействия, которые вызывают падение и поломку опор, обрыв и схлестывание проводов, массовые отключения ВЛ, нарушение электроснабжения потребителей с соответствующим экономическим ущербом. Гололедно-ветровым воздействиям подвергаются электрические сети ОЭС Северо-Запада, Центра, Северного Кавказа, Волги, Урала, Сибири и Востока.

Комплексная система мероприятий включает в себя оперативные, перспективные, технические и организационные. Рассмотрим только два последних мероприятия [1].

1. Технические мероприятия при эксплуатации ВЛ.

К техническим мероприятиям относят внедрение и совершенствование схем плавки гололеда, а также внедрение автоматизированных систем управления плавкой гололеда и автоматизированных информационных система контроля гололедообразования [6].

1.1. Совершенствование системы плавки гололеда. Автоматизированные системы управления плавкой гололеда

Одна из наиболее эффективных мер по борьбе с обледенением проводов и тросов – организация плавки гололеда. Для нагрева проводов используется и постоянный, и переменный ток. Плавка переменным током имеет ряд существенных недостатков, среди которых – сложность схемы, большое потребление мощности. В схемах плавки на постоянном токе применяют управляемые выпрямители плавки гололеда ВУПГ-14/1200, которые являются эффективным средством предупреждения гололедных аварий на ВЛ. С помощью ВУПГ плавка гололеда производится за счет нагрева проводов постоянным током на ВЛ, отключенной от потребителей и генерирующих источников мощности. Провода (тросы) ВЛ подключаются к положительному и отрицательному полюсам установки по одной из схем («фаза – фаза» и «фаза – две фазы»), обеспечивающих образование контура постоянного тока. Плавка гололеда на грозозащитных тросах может производиться как с выводом ВЛ из работы, так и без него, в зависимости от применяемой схемы плавки [6].

Преимущества установки типа ВУПГ:

- возможность регулирования тока плавки в широком диапазоне, в том числе и по сигналам с датчиков гололеда;
- плавный пуск и отключение выпрямителя, что позволяет избежать перенапряжений и облегчает работу коммутационной аппаратуры;
- развитая микропроцессорная система управления релейной защитой и автоматикой, ко-

торая позволяет согласовывать пуск, отключение и изменение тока по сигналам от системы контроля гололедообразования;

- наличие последовательных интерфейсов RS-485 и Ethernet позволяет осуществлять связь с автоматизированной системой управления трансформаторной подстанцией верхнего уровня;

- контейнерное исполнение силовой части с принудительной замкнутой системой охлаждения позволяет легко монтировать выпрямитель на открытой части подстанции;

- наличие комплекта измерительных трансформаторов внутри контейнера снижает требования к открытому распределительному устройству и комплектному распределительному устройству наружной установки подстанции;

- возможность транспортировки любым видом транспорта (контейнер служит одновременно и корпусом ВУПГ, и тарой) [1,4].

1.2. Автоматизированные информационные системы контроля гололедообразования

Особое место в комплексной системе мероприятий занимает автоматизированная информационная система контроля гололедной нагрузки (АИСКГН) на воздушных линиях, представляющая собой единый комплекс программно-аппаратных средств. Являясь многоуровневой цифровой информационно-вычислительной системой, АИСКГН обеспечивает непрерывный контроль гололедной нагрузки и температуры воздуха в пунктах контроля (ПК), удаленных на значительное расстояние от пунктов приема (ПП). Открытая, гибкая и модульная архитектура АИСКГН позволяет поэтапно развивать информационную систему путем увеличения ПК и ПП, расширяя ее до границ региональной системы. Повышается оперативность и эффективность принятия решений о проведении плавки гололеда. Система сама подсказывает диспетчеру время начала и окончания плавки гололеда на ВЛ и тросах, очередность проплавляемых ВЛ, направление движения фронтов отложений. Повышается ответственность диспетчера за принятое решение [2,5].

Функциональная схема системы телеизмерения гололедных нагрузок (СТГН) представлена на рис. 2 [4].

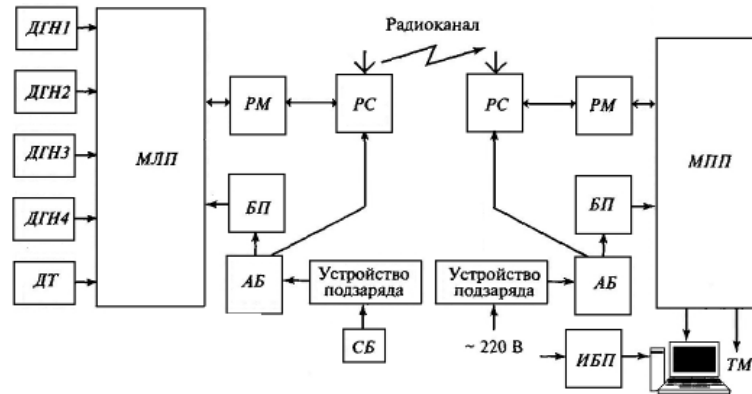


Рис. 2. Функциональная схема системы телеизмерения гололедных нагрузок: ДГН – датчик гололедной нагрузки; ДТ – датчик температуры; МЛП – микропроцессорный линейный преобразователь; МПП – микропроцессорный приемный преобразователь; РМ – радиомodem; РС – радиостанция; БП – блок питания; АБ – аккумуляторная батарея; СБ – солнечная батарея; ИБП – источник бесперебойного питания; ТМ – телемеханика

Систему отличает от других использование уникальной Y-образной подвески провода или троса, что повышает вероятность правильного обнаружения отложений, снижает вероятность ложного срабатывания, вероятность пляски проводов и увеличивает количество выводимой информации [3].

2. Организационные мероприятия при эксплуатации ВЛ

2.1. Своевременная очистка трассы ВЛ от поросли

Просека, обустроенная в соответствии с ПУЭ, по ширине недостаточна для обеспечения надежного электроснабжения потребителей при неблагоприятных погодных условиях, когда возникает возможность падения деревьев на линии электропередачи. К таким условиям относятся не только «ледяные дожди», но и штормовой ветер, обильный мокрый снег, лесные пожары.

Например, анализ массовых нарушений электроснабжения в Московском регионе показал [1], что основной причиной явилось падение и приближение (наклон) деревьев на недопустимое расстояние к проводам воздушных линий электропередачи под тяжестью гололедно-изморозевых отложений.

Расчистка просек – важнейшее организационное мероприятие для предотвращения технологических нарушений на воздушных линиях.

2.2. Определение мест повреждения

При эксплуатации воздушных линий электропередачи всех классов напряжений применяются технические средства для определения места повреждения (ОМП). Линии электриче-

ских сетей 110–220 кВ характеризуются достаточно большой протяженностью. Методы и средства ОМП здесь основаны на измерении и запоминании параметров аварийного режима (токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности) и вычислении расстояния до мест повреждения. В таких сетях используются, как правило, двусторонние методы, основанные на фиксации токов и напряжений по концам ВЛ.

Определение места повреждения по методу одностороннего измерения производится с помощью дистанционного метода по параметрам аварийного процесса и зависит от вида произошедшего КЗ. Такая система может использоваться как в сетях 35–220 кВ, так и в распределительных сетях 6–10 кВ. Она состоит из датчиков, устанавливаемых на воздушных линиях, и устройств «считывания» с них информации. Датчики регистрируют короткие замыкания, возникшие на линии. Подобные системы могут быть как локальными, так и централизованными [6].

Такая техника уже используется в Китае и в Скандинавских странах. Существуют перспективы развития подобных систем и в России. Наиболее перспективными будут необслуживаемые датчики, причем те, которые совмещают несколько функций. Например, некоторые системы ОМП регистрируют не только факт возникновения КЗ, но и определяют его тип, а также отслеживают состояние провода (например, его температуру). Показатели снимают при обходе линии с помощью радиочастотных передатчиков. Такая система является недорогой, надежной и универсальной [1].

2.3. Создание мобильного – восстановительного резерва

Электросетевые компании должны иметь в своем распоряжении мобильную группировку сил и средств, способную максимально оперативно начать работу по ликвидации технологических нарушений, вызванных аномальными погодными условиями. Также необходимо создать резерв специальной техники. Опираясь на опыт работ по восстановлению электроснабжения в Подмоскowie, можно рекомендовать следующие средства механизации: автомобильные подъемники на полноприводном колесном или гусеничном шасси с высотой подъема не менее 28 м, с манипуляторами для резки растительности; универсальную гусеничную технику; автокраны и манипуляторы, обеспечивающие установку опор воздушных линий, на полноприводном шасси; автомобили повышенной проходимости для транспортировки ремонтных бригад и оборудования, полноприводные на колесном ходу и гусеничные; харвестеры – многофункциональная техника для валки леса, обрезки сучьев и раскряжевки [1].

Разработка комплексных мероприятий в каждом сетевом предприятии должна начинаться с анализа аварийности при гололедно-ветровых ситуациях [4].

Таким образом, система мероприятий по предотвращению и ликвидации гололедно-ветровых аварий включает в себя: совершенствование схем плавки гололеда и внедрение ав-

томатизированных систем управления плавкой гололеда; своевременную очистку трассы ВЛ от поросли; применение технических средств для определения мест повреждения; создание мобильного восстановительного резерва; внедрение автоматизированной информационной системы контроля гололедообразования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. «Ледяной дождь» не страшен: 10 советов энергосетевым компаниям // Энергоэксперт. – 2011. – № 1 (24). – С. 18–32. – Режим доступа: URL: <http://www.energyexpert.ru>
2. Панасенко, М. В. Системы мониторинга воздушных линий электропередачи / М. В. Панасенко // Moderni vymozenosti vedy-2013 : mater. IX mezinar. vedecko-prakticka konf. (27 ledna-05 unora 2013 r.). Dil 75. Technicke vedy – Praha, 2013. – S. 91–93.
3. Панасенко, М. В. Обзор используемых устройств обнаружения отложений для систем мониторинга воздушных линий электропередачи / М. В. Панасенко, Д. А. Брыкин. – Воздушные линии. – 2012. – № 3. – С. 79–82.
4. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах: учеб. пос. / И. И. Левченко, А. С. Засыпкин, А. А. Аллилуев, Е. И. Сацук. – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 448.: ил.
5. Ways end device for measurement of klimatik loads of wires and cables of air-lines / М. В. Панасенко // Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach : Research articles. Vol. 5. Technical Sciences / Science editor: A. Burkov ; B&M Publishing ; Research and Publishing Center «Colloquium». - San Francisco (California, USA), 2014. – P. 162–166.
6. 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.

УДК 621.311.315.1

М. В. Панасенко

УСТРОЙСТВО ОТБОРА МОЩНОСТИ ДЛЯ ПИТАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

**Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета**

Предложено устройство отбора мощности от фазного провода воздушной линии посредством трансформатора тока, для питания систем мониторинга. Разработана электрическая принципиальная схема экспериментальной установки и описана ее работа. Обосновано использование в качестве резервного (буферного) источника питания емкостных накопителей на конденсаторах аномальной емкости (суперконденсаторов) вместо аккумуляторной батареи.

Ключевые слова: устройство отбора мощности, мониторинг линий электропередачи, трансформатор тока.

М. V. Panasenko

DEVICE FOR SELECTION POWER SUPPLY MONITORING SYSTEMS POWER LINES

**Volgograd State Technical University (branch in Kamyshin)
(e-mail: panasenkom@mail.ru)**

The device of selection of power from a phase wire of a power lines by means of the current transformer, for food of systems of monitoring is offered. The electric schematic diagram of experimental installation is developed and its work is described. Use as the reserve (buffer) power supply of capacitor stores on condensers of the abnormal capacity (supercondensers) instead of the battery is proved.

Keywords: device of selection of power, monitoring of power lines, current transformer.

В настоящее время одними из самых актуальных задач развития электроэнергетики Российской Федерации являются задачи энергосбережения, повышения эффективности и надежности работы электроэнергетических систем. Надежность работы линий электропередачи (ЛЭП), в свою очередь, является основой экономического благосостояния не только акционерных обществ энергетики, но и России в целом. Известно, что из множества природных явлений, воздействующих на воздушные линии (ВЛ) электропередачи, особую опасность представляют гололедные, гололедно-снеговые и изморозевые отложения. Они образуются на проводах и тросах одновременно с действием на них ветра и понижения температуры. Возникающие из-за веса отложений механические нагрузки на провода и тросы в сочетании с нагрузками от ветра и низких температур могут превышать величины механической прочности этих элементов конструкции ВЛ и, следовательно, будут происходить многочисленные обрывы проводов и тросов, поломки траверс и самих опор. По статистике более 50 % аварий на ВЛ происходят из-за того что реальные нагрузки превышают проектные. Предотвратить большинство аварий на линиях можно своевременной плавкой гололеда на проводах и тросах этих линий, а для проведения своевременной плавки необходимо непрерывно в реальном масштабе времени проводить мониторинг ВЛ (необходимо измерять механические нагрузки на провода и тросы для получения информации о появлении гололедно-ветровых ситуаций, их изменении, включая плавку гололеда) [1].

Под мониторингом гололедно-ветровых и температурных нагрузок воздушных линий электропередачи понимается специально организованное, систематическое наблюдение в реальном масштабе времени за гололедно-ветровыми и температурными воздействиями, действующими на ЛЭП, с целью их оценки, контроля и прогнозирования. Цель контроля – опережающее отражение вероятности появления и развития экстремальных нагрузок и прогнозирования их последствий на основе риска возникновения аварий. Главными и самыми сложными задачами мониторинга гололедно-ветровых и температурных нагрузок ВЛ являются получение первичной информации о гололедно-ветровых нагрузках на конкретные контролируемые участки линий и передача ее для обработки и отображения без потерь и искажений диспетчеру электрических сетей. Интенсивные

отложения на проводах и грозотросах ВЛ наблюдаются практически на всей территории России, особенно во всех приморских регионах: на Сахалине, Камчатке и Чукотке в период муссонных ветров с Тихого океана; на Кавказе, где в период столкновения теплых и холодных воздушных потоков над горными хребтами создаются условия для интенсивных отложений на ВЛ. Аналогичные проблемы метеовоздействий на ВЛ имеют место и за рубежом: в Канаде, в северных штатах США, включая Аляску, в Чехии, Украине, Словакии, Германии, Швеции, Норвегии, Финляндии, а также в Японии, Франции, Англии, Чили [1].

Из вышеописанного следует, что научные работы и исследования связанные с гололедными явлениями будут актуальны длительное время.

Для работы устройств информационно-измерительных систем (ИИС) мониторинга ЛЭП, расположенных на опорах и состоящих из датчиков измерения и устройств телепередачи, необходимо обеспечить их бесперебойное питание электроэнергией, поэтому должны выполняться требования:

1. Климатическая и эксплуатационная стойкость.
2. Качество выдаваемой электроэнергии.
3. Выходные значения напряжения и мощности энергозависимых устройств должны соответствовать значениям этих параметров на потребителе в большинстве режимов работы ЛЭП.
4. Конструктивное исполнение устройства должно быть по возможности простым, а затраты на его производство – наименьшими.
5. При возникновении короткого замыкания (и не только) на ВЛ устройство должно сохранять работоспособность как ИИС, так и собственную.
6. Расположение на опоре ВЛ (желательно).

Рассматривая возможные способы и соответствующие им устройства питания, необходимо учитывать известный опыт применения таких устройств с учетом размещения периферийных устройств непосредственно на верхней части опор, жестких требований к климатическим и эксплуатационным условиям их работы, а также требований к качеству выдаваемых ими электрической энергии. Учитывая приведенные требования, был проведен анализ известных способов и устройств питания, позволяющих получать мощность до 150 Вт для одного периферийного устройства системы мониторинга для нормальной работы его непосредственно на опорах ЛЭП.

В настоящее время для питания ИИС мониторинга ЛЭП используют аккумуляторы (напряжением 12 В и солнечные батареи, для обеспечения заряда выбранного типа аккумулятора в зимнее время мощность солнечных батарей должна выбираться с запасом), такая схема показала недостаточную надежность в зимний период, кроме того аккумуляторы должны отвечать достаточно жестким требованиям: длительный срок эксплуатации; герметичность; отсутствие требования доливки электролита в течение длительного времени, высокая надежность, широкий температурный диапазон от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$. В качестве замены можно использовать модуль электрохимических конденсаторов [3].

Предлагается использовать известные трансформаторы тока (ТТ) в качестве устройства отбора мощности от фазного провода ЛЭП. Такое применение становится возможным только при использовании периферийных устройств (первичных измерительных датчиков и устройств телеметрии), гальванически связанных с фазным проводом (находящихся под одним потенциалом) или изолированных от земли не хуже, чем фазный провод. Теоретические исследования показывают, что особенностью применения ТТ в качестве устройства отбора мощности (УОМ) от фазного провода является то, что они работают в режиме, близком к режиму насыщения магнитопровода при номинальном токе нагрузки фазного провода. В случае многократного увеличения тока в фазном проводе (режим короткого замыкания на линии и режим плавки гололеда) за счет перехода магнитопровода ТТ в режим насыщения появляется свойство стабилизации выходной мощности устройства питания. Экспериментальные исследования подтвердили эти свойства и возможность использования ТТ для изготовления на его основе УОМ (100–150 Вт), вес которого даже с буферным аккумулятором колеблется от 30 до 50 кг и габариты находятся в пределах 300х300х500 мм, при этом существенных ограничений на непосредственное закрепление такого устройства на изолирующую гирлянду подвески провода нет.

Особенностью устройства отбора мощности

является то, что оно должно запитать электроэнергией датчик гололедно-изморозевых отложений (ГИО), передающее устройство, обеспечивающее связь по проводам или через радиомодем (беспроводная связь). Рассматриваемое устройство должно обеспечивать стабильное во времени напряжение, выдавать необходимую мощность при наименьших капитальных затратах и эксплуатационных расходах. Объектом разработки и исследования является релейный регулятор напряжения УОМ от ВЛЭП, в которой входят: шинные ТТ с ферромагнитным кольцевым сердечником, набор реле, выпрямительный блок с устройством защиты (УЗ). Входным показателем служит сила тока в фазном проводе, выходными показателями – надежность и экономичность устройства. При разработке устройства руководствовались рядом технико-экономических требований: легкости, простотой конструкции, надежности в работе. Релейный регулятор напряжения устройства отбора мощности предназначен для отбора мощности от фазного провода ВЛЭП, регулирования напряжения на выходе устройства и передачи на широтно-импульсный модулятор (ШИМ) контроллер, обеспечивающий стабилизацию выходного напряжения и питание блока передачи информации и датчика ГИО. В экспериментальной установке в качестве трансформаторов с кольцевыми магнитопроводами УОМ применены три трансформатора тока Т-0,66-УЗ [2]. Для защиты от внешних метеорологических факторов трансформаторы помещены в изолированный корпус. Первичной обмоткой трансформаторов является фазный провод. Для крепления на фазный провод трансформаторов УОМ осуществлен продольный разрез согласно рис. 1.

На каждом полукольце магнитопровода ТТ размещена одна обмотка, таким образом в устройстве ТТ УОМ всего шесть обмоток. Обмотки намотаны медным проводом сечением $2,5\text{ мм}^2$ и соединены между собой последовательно.

Принципиальная электрическая схема измерительного комплекса представлена на рис. 2, она включает в себя комплекты измерительных приборов A , V_1 , V_2 [1].

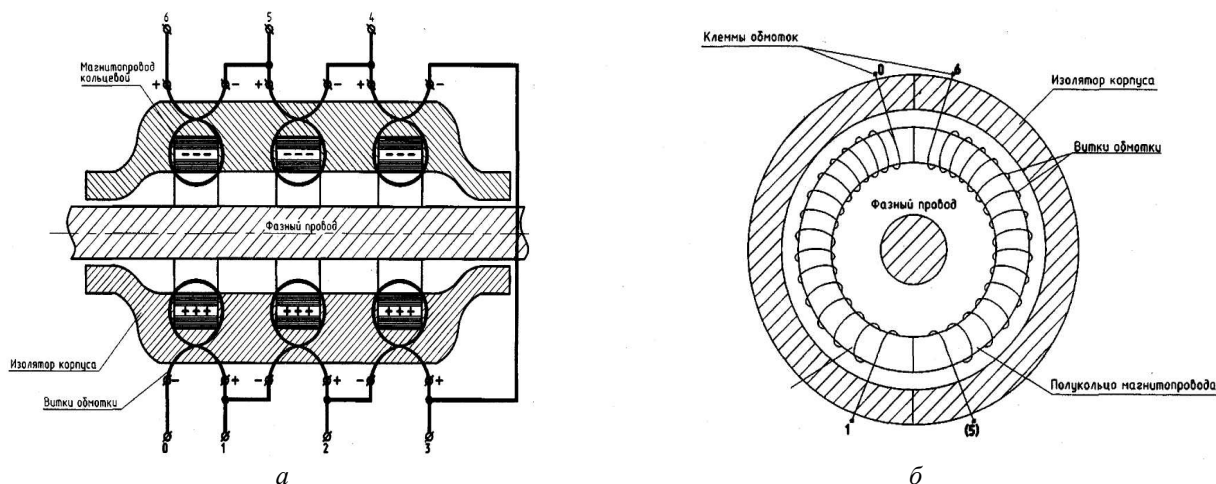


Рис. 1. Шинный трансформатор устройства отбора мощности:
а – продольный разрез; б – поперечный разрез

В цепь «фазного провода» включен амперметр А электромагнитной системы типа Д551 с шунтом на ток до 300 А. Фазный провод имитирует проводник, идущий от вторичной обмотки понижающего трансформатора Т 220/5, которая замыкается на реостат. Схема включает в себя два вольтметра магнитоэлектрической системы типа М2004 ГОСТ 871 1-78, один из

них подсоединен на одну из двух обмоток ТТ, другой – к выходу релейного регулятора. В экспериментальной установке релейный блок состоит из набора пылебрызгозащищенного реле РЭС-32, предназначенного для коммутации электрических цепей переменного тока частотой 50...1000 Гц с напряжением 12...220 В и током 0,05...0,5 А.

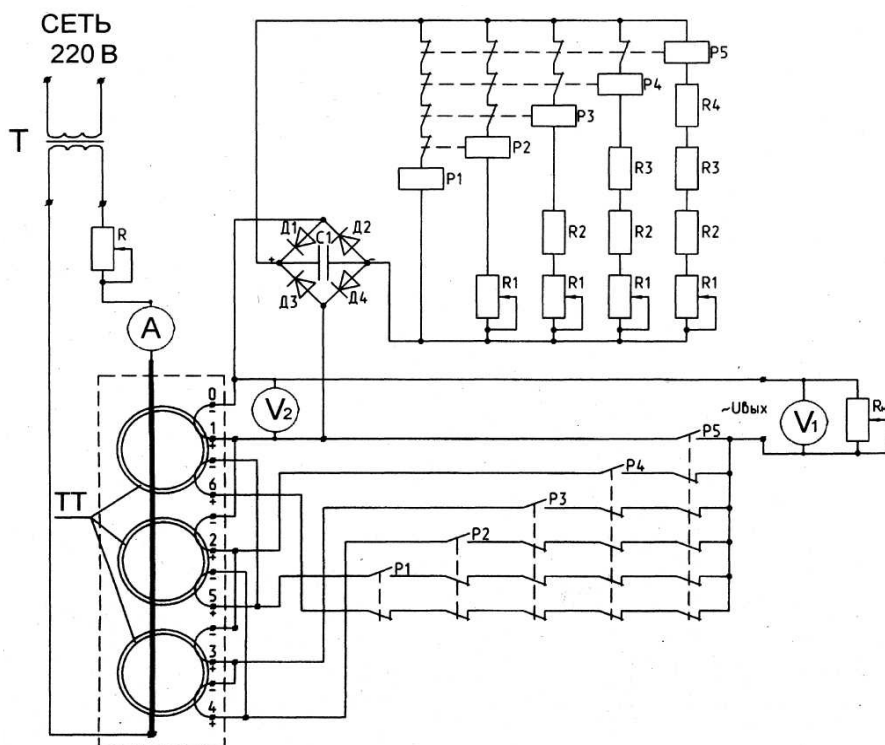


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки

Время срабатывания реле не более 15 мс. Износостойкость до 10^6 циклов переключений. Релейный блок обеспечивает функцию регуля-

тора напряжения устройства отбора мощности. Катушки реле во время работы питаются от выпрямительного моста из четырех диодов Д1-

Д4 типа КД226Д со сглаживающим конденсатором С1 емкостью 200 мкФ. Устройство защиты (УЗ) обеспечивает отключение релейного регулятора напряжения УОМ при превышении тока в фазном проводе выше заданного уровня. R1-R4 представляют собой подобранные сопротивления для поочередного включения реле в зависимости от силы тока в фазном проводе.

В заключение хотелось бы сказать, что учитывая перспективность отбора мощности с фазного провода ЛЭП посредством ТТ в качестве резервного (буферного) источника питания целесообразно использовать емкостные накопители на конденсаторах аномальной емкости (суперконденсаторы), что позволит практически решить задачу бесперебойного гарантированного круглогодичного электропитания периферийных устройств систем мониторинга ЛЭП при минимальных аппаратурных и экономических затратах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панасенко, М. В. Устройство отбора мощности для питания элементов информационно-измерительных систем мониторинга воздушных линий электропередачи / М. В. Панасенко, Г. Г. Угаров // Инновационные и предпринимательские проекты среди научной молодежи: Всероссийская молодежная научная конференция 16–19 ноября 2009 / Федеральное агентство по образованию Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Калмыцкий государственный университет» Министерство спорта, туризма и молодежной политики Республики Калмыкия. – Элиста, 2009. – С. 121–123.
2. Панасенко, М. В. Математическое описание процесса преобразования энергии устройством отбора мощности от фазного провода линии электропередачи для питания информационно-измерительных систем мониторинга / М. В. Панасенко, Г. Г. Угаров // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2011. – № 6. – С. 25–32.
3. Панасенко, М. В. Возможность применения электрохимических конденсаторов для питания систем мониторинга воздушных линий электропередачи / М. В. Панасенко, Г. Г. Угаров, А. Г. Сошинов // Инновационные технологии в обучении и производстве: матер. VII всерос. науч.-практ. конф. (г. Камышин, 22–23 дек. 2010 г.) В 5 т. Т. 4 : ГОУ ВПО ВолгГТУ, КТИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – С. 80–82.

УДК 621.317

А. И. Нефедьев

ВЫСОКОТОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ НАПЯЖЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

Приведены проблемы, возникающие при коммерческом контроле и учете электроэнергии. Предложен трансформаторный делитель напряжения, предназначенный для поверки измерительных трансформаторов напряжения при эксплуатации, контроле и учете электроэнергии. Приведена схема делителя напряжения и описание его работы.

Ключевые слова: делитель напряжения, измерительный трансформатор, компаратор тока, учет электроэнергии.

A. I. Nefed'ev

PRECISION TRANSFORMER VOLTAGE DIVIDER

Volgograd State Technical University

(e-mail: nefediev@rambler.ru)

Abstract: The problems in commercial control and accounting of electricity are presented. The transformer voltage divider for calibration of instrument voltage transformers in operation, control and energy accounting was designed. The voltage divider circuit and a description of his work were shown.

Keywords: voltage divider, instrument transformer, current comparator, accounting of energy.

Обеспечение точности и достоверности коммерческого учета электроэнергии является одной из основных проблем, возникающих при эксплуатации систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ). В состав таких систем входят счетчики электроэнергии и первичные масштабные преобразователи, такие как измерительные трансформаторы тока и напряжения [1, 2].

В связи с ростом цен на электроэнергию стали больше уделять внимание достоверности

ее учета и поэтому на различных предприятиях активизировалась разработка и производство поверочного оборудования для трансформаторов тока и напряжения [1,2].

Наивысшую точность преобразования напряжения по сравнению с другими типами масштабных преобразователей в низкочастотном диапазоне измерений обеспечивают индуктивные делители напряжения (ИДН). Такие делители напряжения отличаются высокой точ-

ностью, временной и температурной стабильностью, помехозащищенностью, низким выходным и сравнительно большим входным сопротивлением, малыми фазовыми сдвигами. Эти свойства получены путем применения высококачественных магнитопроводов из ферромагнитных материалов с высокой магнитной проницаемостью и низкими потерями на основе пермаллоя, аморфного или нанокристаллического железа [3] и др.

Промышленность выпускает декадные делители напряжения с трансформаторной связью между каскадами (с «плавающей» секцией) [4,5], в каждом каскаде которого размещены измерительная декадная обмотка и обмотка возбуждения, с которой подается напряжение на вход измерительной декадной обмотки последующего каскада. Каскады такого делителя напряжения фактически представляют собой двухобмоточные трансформаторы, первичная обмотка которых является измерительной обмоткой каскада, а вторичная – обмоткой возбуждения. Выходное напряжение делителя равно сумме выходных напряжений каскадов, а коэффициент деления – сумме показаний каскадов. Недостаток трансформаторного делителя напряжения такого типа заключается в том, что применяемые в них магнитопроводы из высоконикелевых пермаллоев имеют высокую стоимость, а механическое напряжение, возникающее из-за тряски и вибраций при транспортировке, снижают магнитные свойства сердечников [3], что в итоге приводит к увеличению погрешности делителей напряжения.

Для повышения точности измерения напряжения предлагается трансформаторный делитель напряжения [6, 7], предназначенный для использования в качестве точного масштабного преобразователя в широком диапазоне входных и выходных напряжений, а также в жестких условиях эксплуатации.

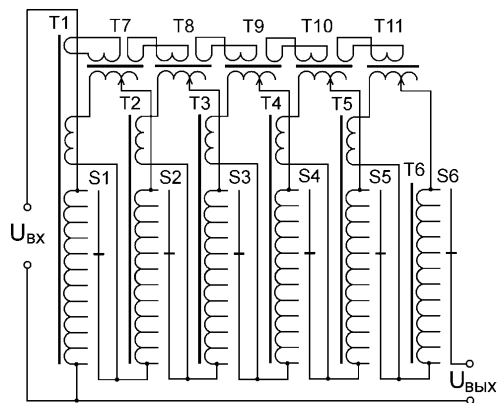


Рис. 1. Трансформаторный делитель напряжения

На рис. 1 приведена схема трансформаторного делителя напряжения, который содержит однокаскадные трансформаторные делители напряжения T1 – T6 с декадными измерительными обмотками и переключателями.

На магнитопроводах трансформаторных делителей T1 – T6 также размещены вторичные обмотки, являющиеся обмотками возбуждения для последующих каскадов. Кроме этого, делитель T1 содержит третью обмотку, которая является обмоткой возбуждения для дополнительного трансформаторного делителя напряжения, состоящего из однокаскадных трансформаторных делителей напряжения T7 – T11. Они также содержат первичные обмотки, обмотки возбуждения последующих каскадов и обмотки, предназначенные для компенсации погрешностей делителя, обусловленных шунтированием обмоток делителя последующим каскадом. Измерительные обмотки и обмотки возбуждения трансформаторных делителей напряжения T1 – T6 скручены в общий жгут и намотаны на тороидальные магнитные сердечники из низконикелевых пермаллоев с относительно высокой магнитной проницаемостью, что обеспечивает тесную индуктивную связь между проводами обмоток и высокую точность деления напряжения.

Первый каскад делителя T1 обеспечивает деление входного напряжения от 0 до $U_{вх}$ ступенями по $0,1U_{вх}$; второй каскад T2 – от 0 до $0,1U_{вх}$ ступенями $0,01U_{вх}$; третий каскад T3 – от 0 до $0,01U_{вх}$ ступенями $0,001U_{вх}$, и т. д.

Однокаскадные делители напряжения T7 – T11 также выполнены на тороидальных сердечниках с относительно высокой магнитной проницаемостью. Выходные обмотки делителей расположены сверху и выполнены с возможностью изменения количества включенных витков по типу автотрансформаторов.

При работе входное напряжение $U_{вх}$ подается на декадную измерительную обмотку однокаскадного делителя T1. Выходное напряжение делителя T1 может изменяться при помощи переключателя S1 от нуля до $U_{вх}$. При этом напряжение с вторичной обмотки возбуждения, равное $0,1U_{вх}$, подается на вход декадной измерительной обмотки однокаскадного делителя T2. Аналогичный процесс деления входного напряжения осуществляется последующими каскадами делителя. Поскольку в качестве магнитопроводов применен низконикелевый пермаллой или высококачественная электротехни-

ческая сталь, то входное сопротивление каждого последующего каскада существенно снижается по сравнению с первым каскадом Т1. Это приводит к шунтированию выходного сопротивления обмотки возбуждения входным сопротивлением следующего каскада делителя напряжения, что приводит к возникновению погрешности трансформаторного делителя напряжения.

Эта погрешность может быть компенсирована введением регулируемого напряжения, снимаемого с выходной обмотки однокаскадного дополнительного делителя напряжения Т7. При этом выходное напряжение трансформаторного делителя $U_{\text{вых}}$ при положении переключателя S1 в положении 0, $1U_{\text{вх}}$, когда включена первая ступень декадной измерительной обмотки делителя Т1, а переключатели S2 – S6 находятся в нулевом положении, и выходное напряжение делителя Т2 при нахождении переключателя S2 в положении 0, $1U_{\text{вх}}$, то есть когда включены десять ступеней декадной измерительной обмотки делителя Т2, а все другие переключатели находятся в нулевом положении, должны быть равны. Равенство этих напряжений обеспечивается изменением положения движка выходной обмотки однокаскадного трансформаторного делителя напряжения Т7. Таким образом, к напряжению возбуждения, снимаемого с обмотки возбуждения делителя Т1, добавляется напряжение с выходной обмотки однокаскадного трансформаторного делителя напряжения Т7, которое компенсирует погрешность, обусловленную шунтированием декадной измерительной обмотки делителя Т1 входным сопротивлением однокаскадного делителя Т2. Аналогично компенсация погрешностей трансформаторного делителя производится при помощи однокаскадных трансформаторных делителей Т8 – Т11.

Применение дополнительных однокаскадных делителей напряжения Т7 – Т11 для компенсации погрешностей, обусловленных шунтированием обмоток возбуждения входным сопротивлением последующих каскадов, обеспечивает высокую точность трансформаторных делителей напряжения в широком диапазоне входных напряжений. При этом в качестве магнитопроводов могут быть использованы низконикелевый пермаллой или высококачественная электротехническая сталь.

Определение погрешности трансформаторного делителя напряжения производится путем

определения составляющих погрешности, обусловленных погрешностью отдельных декад в режиме холостого хода, взаимным влиянием декад, паразитными связями и наводками.

В индуктивных делителях напряжения относительные погрешности отдельных декад определяются методом опорного потенциала [8]:

$$\gamma_i = \frac{1}{iU_{\text{вх}}} \sum_{j=1}^i \left(10\Delta U_j - \sum_{j=1}^{10} \Delta U_j \right),$$

где $\Delta U_j = U_j - U_0$ – разностное напряжение между напряжением j -ой секции и напряжением опорной обмотки, которое может быть измерено с помощью дифференциального указателя, например Ф7239.

Составляющие погрешностей каждой предыдущей декады, обусловленные влиянием всех последующих декад, определяются методом опорного потенциала при комплектном включении ИДН. Определение аддитивной составляющей погрешности производится путем прямого измерения напряжения дифференциальным указателем на выходе делителя при коэффициенте передачи, равном нулю. Результирующая погрешность рассчитывается простым арифметическим суммированием по модулю всех составляющих [8].

В предложенном трансформаторном делителе напряжения имеется возможность полностью скомпенсировать изменение выходного напряжения каждой секции делителя, возникающее из-за подключения последующей секции, за счет добавки напряжения с выходной обмотки дополнительного однокаскадного трансформаторного делителя напряжения.

Таким образом, предложенное техническое решение обеспечивает построение трансформаторных делителей напряжения в широком диапазоне входных напряжений, обеспечивает снижение погрешности делителей, уменьшение их стоимости за счет применения магнитопроводов из низконикелевых пермаллоев или высококачественной электротехнической стали, а также возможность их транспортировки в условиях тряски и вибраций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нефедьев, Д. И. Решение проблемы поверки измерительных трансформаторов напряжения на месте их эксплуатации / Д. И. Нефедьев, А. И. Нефедьев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 18 (145) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки»; вып. 6). – С. 63–65.

2. Нефедьев, Д. И. Комбинированный метод измерения коэффициентов преобразования измерительных масштабных преобразователей / Д. И. Нефедьев, А. И. Нефедьев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 18 (145) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки» ; вып. 6). – С. 60–63.

3. Мишин, Д. Д. Магнитные материалы / Д. Д. Мишин. – М. : Высшая школа. – 1991. – 385 с.

4. Байков В. М. Трансформаторные делители напряжения. – М. : Машиностроение, 1984. – С. 31, 32.

5. ГОСТ ИЕС 60618-2013. Делители напряжения индук-

тивные. Введ. 01.01.2015. – М. : Стандартинформ, 2014. – 12 с.

6. Патент РФ на полезную модель № 7208, МПК G01R 15/04. Трансформаторный делитель напряжения / А. И. Нефедьев. – № 97107982/20, заявлено 21.05.1997, опубл. 16.07.1998.

7. Патент РФ на полезную модель №7209, МПК G01R 35/02. Устройство для поверки высоковольтных измерительных трансформаторов напряжения / А. И. Нефедьев. – № 97108037/20, заявлено 21.05.1997, опубл. 16.07.1998.

8. Ким, В. Л. Эталонный индуктивный делитель напряжения / В. Л. Ким, М. С. Ройтман // Известия Томского политехн. ун-та. – 2003. – Т. 306, N 5. – С. 88–92.

УДК 681.58 (681.533.4)

С. В. Макартичян, А. Н. Филиппов, С. В. Ляпичев

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ С ДИСТАНЦИОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Волгоградский государственный технический университет

На сегодняшний день сельское хозяйство в России находится в упадке. Необходимо внедрять автоматизированные системы полива, которые позволили бы увеличить урожайность и снизить затраты на энергоресурсы. В статье предложена система автоматического капельного орошения с дистанционным управлением, предназначенная для оптимизации энергоресурсов и увеличения урожайности бахчевых и плантационных культур, а также облегчения труда в области сельского хозяйства. Это осуществляется за счет использования распределенной системы беспроводных датчиков влажности почвы и датчиков давления воды в трубопроводе, что дает информацию не только о текущем состоянии процесса полива, но и об интенсивности этого процесса. Это позволяет оптимизировать управление водяными насосами таким образом, что необходимому потреблению водных ресурсов соответствуют минимальные энергетические расходы. Использование предложенной системы капельного орошения с дистанционным управлением позволяет учесть особенности определенных видов культур, грунта и климата региона. Предложенная система проектируется для управления процессом полива на больших площадях в отличие от существующих аналогов.

Ключевые слова: автоматическая система управления, датчик давления, датчик влажности, капельное орошение, сельское хозяйство.

S. V. Makartichyan, A. N. Filippov, S. V. Lyapichev

AUTOMATIC DRIP IRRIGATION SYSTEM WITH REMOTE CONTROL

Volgograd State Technical University

(e-mail: stepan_box@mail.ru)

Today, agriculture in Russia is in decline. It is necessary to introduce such a system of irrigation that would increase productivity and reduce energy costs. Automatic drip irrigation system with remote control is just such a system, with which you can optimize water and energy resources in drip irrigation. This is accomplished through the introduction of a system with feedback, namely the control of water flow, humidity sensor readings are removed from the remote control. The system selects this mode of irrigation, which provides the necessary consumption of water with minimal energy consumption. Also take into account peculiarities of certain crops, soil and climate

It should be said that the developed system is designed to control irrigation over large areas, as opposed to analog, which cover, as a rule, greenhouses, orchards and gardens.

The automatic drip irrigation with a remote control designed to facilitate the work in the field of agriculture, as well as to conserve resources and increase the yield of melon and plantation crops.

Keywords: automatic control system, a pressure sensor, a humidity sensor, drip tubing, agriculture.

Введение

Решение задач в области сельского хозяйства в настоящее время является актуальной проблемой. Выведение новых сортов растительных культур, борьба с вредителями, проектирование новых устройств и агрегатов – все это помогает

повысить урожайность, а также облегчает нелегкий труд фермера.

В статье предложена система автоматического капельного орошения с дистанционным управлением, предназначенная для оптимизации энергоресурсов и увеличения урожайности

бахчевых и плантационных культур, а также облегчения труда в области сельского хозяйства. Разрабатываемая автоматическая система капельного орошения представляет собой систему с обратными связями за счет внедрения автоматизированной распределенной системы управления орошением, работа которой основана на информации о процессе полива по всей площади орошения. В системе предусматривается регулировка расхода воды в различных точках площади.

Следует сказать, что данная система существенно облегчит работу фермерских хозяйств по поливу бахчевых и плантационных культур. Это будет проявляться в облегчении контроля за распределением водных ресурсов, уменьшении времени на ремонт капельной системы за счет информации с датчиков давления воды, установленных по периметру поливного трубопровода. Это позволит существенно сократить время на поиск неисправности, поскольку речь идет о существенных площадях полива.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: выявления текущих проблем, существующих в сельском хозяйстве; анализ существующих аналогов автоматической системы капельного орошения; разработка датчиков давления с дистанционным управлением; разработка датчиков влажности с дистанционным управлением; разработка микропроцессорного блока управления.

Основная часть

На рис. 1 представлена распределенная автоматизированная система управления процессом полива, состоящая из водяного насоса и фильтров 1, который управляется устройством управления насосом 2. К водяному насосу 1 подключается лафлет 6, представляющий собой шланг большого диаметра по которому поступает вода в капельные трубки (изображенные черными линиями, перпендикулярно лафлету).

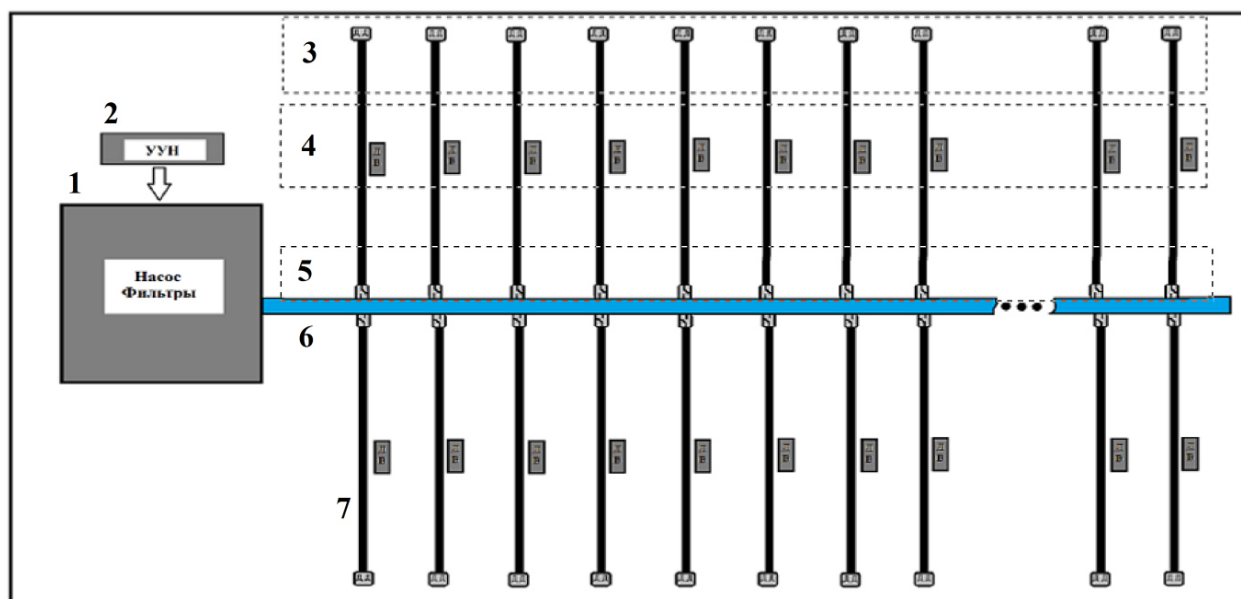


Рис. 1. Распределенная автоматизированная система управления процессом полива:
1 – блок насоса и системы фильтров; 2 – устройство управления насосом; 3 – датчики давления;
4 – датчики влажности; 5 – электромагнитные краны; 6 – лафлет

На конце капельных трубок находятся датчики давления 3, позволяющие судить об интенсивности процесса орошения. В месте подключения капельной трубки изображены электромагнитные краны 5. В непосредственной близости от конца капельной трубки в земле установлены емкостные датчики влажности 4, позволяющие судить о текущем состоянии процесса орошения.

Такое размещение элементов предложенной системы позволяет оптимизировать процесс контроля ее параметров. Датчики давления располагаются на концах капельных трубок для того, чтобы фиксировать давление именно в конечной точке, так как оно будет минимальным по отношению ко всей ветви. Такое минимальное давление соответствует выбранному режиму полива. Расположение датчика давления, ука-

занное на плане установки позволяет также выявлять обрыв капельной трубки, что в конечном итоге позволит определить повреждение капельных трубок по всей площади системы.

Датчики влажности располагаются в непосредственной близости от капельной трубки с той целью, что необходима фиксация влажности не по всему участку, а в определенной орошаемой части. Известно, что почва имеет неоднородную структуру, однако возделывание и обработка земли производится в определенном направлении, укладывание капельной ленты соответствует этому направлению. Вследствие этого можно сказать, что почва, находящаяся вдоль капельной трубки, имеет приблизительно однородную структуру. Также по всей длине капельной ленты полив осуществляется

равномерно. В результате можно сделать вывод, что влажность земли вдоль капельной трубки имеет приблизительно одинаковое значение. Поэтому для контроля влажности почвы вдоль капельной трубки достаточно всего одного датчика влажности.

На рис. 2 показана структурная схема установки. Информация с датчиков давления и влажности через преобразователь сигнала (ПС) при помощи каналов радиосвязи передается на микропроцессорный блок управления (МБУ), который обрабатывает поступающие сигналы и управляет электромагнитными кранами (ЭМК) и устройством управления насосом (УУН). Электромагнитные краны и устройство управления насосом обладают обратной связью для точного регулирования давления в системе.



Рис. 2. Структурная схема установки

Микропроцессорный блок управления работает в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 3. Работа блок-схемы микропроцессорного блока управления заключается в следующем: на микропроцессорный блок управления поступает информация от датчика влажности о степени влажности орошаемой площади. Далее принимается решение о необходимости полива, если он необходим, то выбирается режим полива в зависимости от полученных параметров. В процессе работы системы через определенное время на пульт поступает сигнал от датчика влажности, чтобы про-

верить влажности орошаемой почвы. Если влажности почвы соответствует заданному в программе оптимальному значению, то поступает сигнал о закрытии электромагнитных ключей и происходит вывод сообщения об окончании полива. Если же влажность не удовлетворяет заданному в программе оптимальному значению, то исходя из полученных данных от датчиков давления, принимается решение о регулировании давления в системе, до того момента пока значение не станет близким к оптимальному.

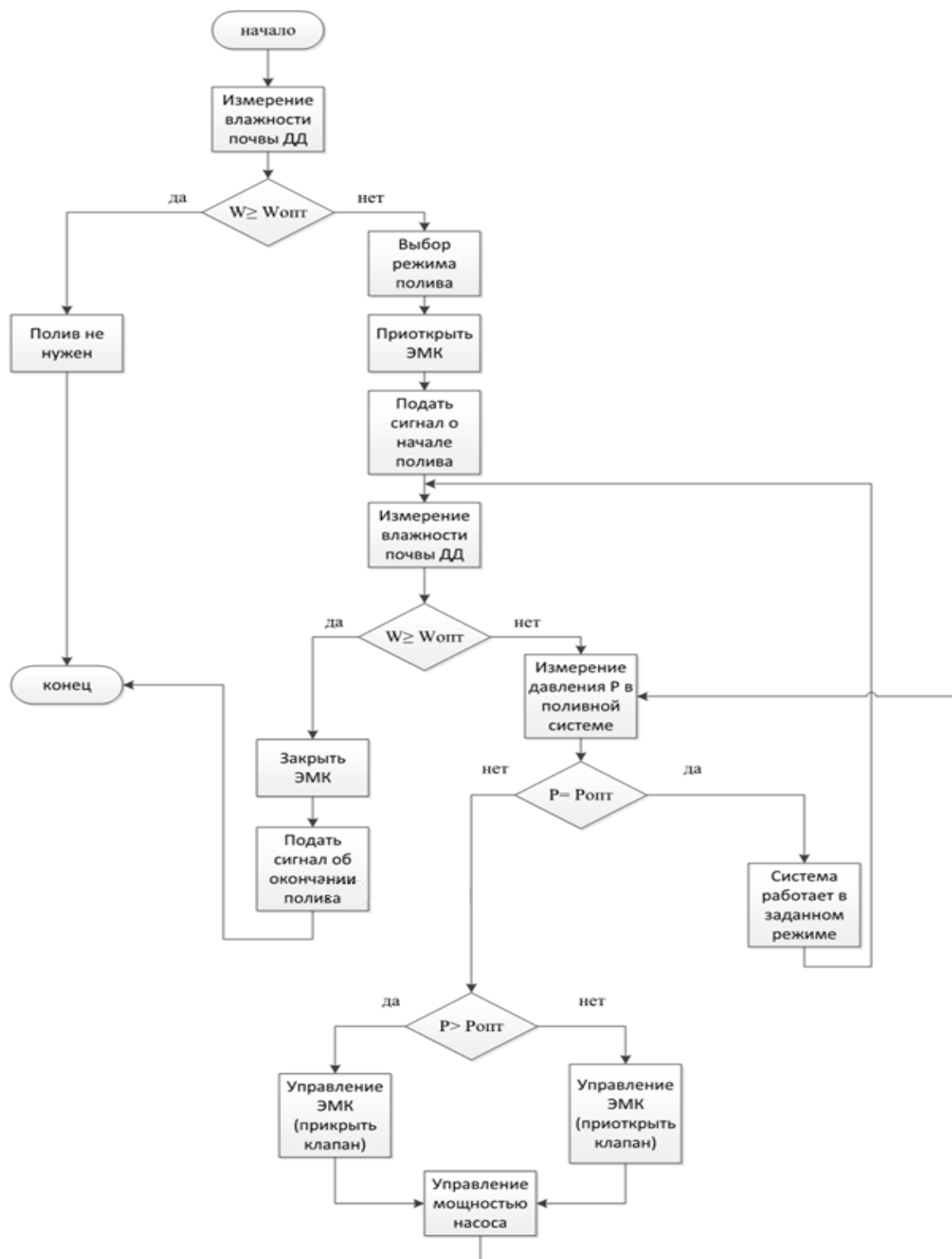


Рис. 3. Блок-схема микропроцессорного блока управления:
 $W_{\text{опт}}$ – оптимальная влажность почвы; $P_{\text{опт}}$ – оптимальное давление в капельной трубке

Заключение

На примере Быковского района Волгоградской области можно сказать, что данная система будет востребована, поскольку только в данном районе насчитывается более 120 фермерских хозяйств, возделывающих более 3000 гек-

тар и использующих систему капельного орошения. Разрабатываемая автоматическая система капельного орошения уменьшит помимо энергетических и водных ресурсов, также и трудовые, что позволит нанимать меньшее количество людей для контролирования про-

цесса полива растений. Использование данной системы позволит увеличить площадь пригодную для капельного орошения земли, что даст возможность выращивать большее количества продукции без потери ее качества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1973. – 300 с.

2. Клаассен, К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / К. Б. Клаассен. – М. : Постмаркет, 2000.

3. Раннев, Г. Г. Методы и средства измерений / Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко. – М. : Издательский центр «Академия», 2004.

4. Фрайден Дж. Современные датчики. – М. : Техносфера, 2006.

5. Цапенко, М. П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование : учеб. пособие для вузов / М. П. Цапенко. – М. : Энергоатомиздат, 1985.

УДК 53.088

С. В. Макартичян, А. А. Самсонова

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТАРИРОВКИ ПРИБОРОВ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Волгоградский государственный технический университет

В различных отраслях промышленности для управления качеством выпускаемой продукции и для внедрения систем автоматизации необходимы измерительные приборы контроля электрофизических свойств материалов. Подобные проблемы существуют в медицине, биологии, сельском хозяйстве, деревообрабатывающей промышленности и других областях деятельности человека. На современном рынке представлен достаточно широкий спектр приборов косвенного измерения влажности материалов, однако большинство из них обладают существенной методической погрешностью, обусловленной сложной зависимостью выходного сигнала измерительных преобразователей от влажности контролируемого материала. Подобные тарировочные характеристики различаются в зависимости от вида контролируемого материала, его физико-химических свойств, геометрических размеров, диапазона контролируемой влажности и т. д. В статье предложено устройство для тарировки приборов косвенного измерения влажности материалов с учетом этих особенностей. Использование современных микропроцессорных средств цифровой обработки сигналов измерительных преобразователей влажности позволило разработать компактное устройство для тарировки приборов косвенного измерения влажности. В качестве эталонного метода измерения влажности материалов использовался суховесовой метод, рекомендованный ГОСТом.

Ключевые слова: измерение влажности, влагомер, тарирование приборов косвенного контроля, методическая погрешность, аппроксимирующая функция.

S. V. Makartichyan, A. A. Samsonova

THE DEVICE FOR INDIRECT HUMIDITY MEASUREMENT INSTRUMENTS CALIBRATION

Volgograd State Technical University

(e-mail: hymir@mail.ru)

To control the products quality and for the implementation of automated systems required measuring devices for monitoring electrical properties of the materials in various industries. Similar problems exist in medicine, biology, agriculture, woodworking industry and other areas of human activity. The current market offers quite a wide range of instruments for indirect materials moisture measurement, but most of them have significant methodological error due to complex dependence of the output transducers from the moisture-controlled material. Similar calibration characteristics differ depending on the type of material tested, its physical and chemical properties, geometrical sizes, range of controlled humidity, etc. In the article, the proposed device for calibration of devices for indirectly measuring the moisture content with these features. The use of modern microprocessor means for digital signal processing transducers humidity has allowed to develop a compact device for the indirect calibration of instruments measuring humidity. As a reference method for measuring moisture content of materials used thermogravimetric method recommended by state standard.

Keywords: humidity measurement, hydrometer, indirect control instruments calibration, truncation error, approximating function.

Введение

В различных отраслях промышленности для управления качеством выпускаемой продукции

и для внедрения систем автоматизации необходимы измерительные преобразователи для контроля электрофизических свойств материалов.

Подобные проблемы существуют также в медицине, биологии, сельском хозяйстве и других областях деятельности человека. Наиболее часто на практике возникает необходимость измерения и контроля влажности материалов и биологических объектов. Сложность решения задач разработки методов и средств измерения влажности заключается в особенностях объекта измерения влажности, а именно в том, что объект является неоднородным, нелинейным и нестационарным. Нелинейность обусловлена тем, что на контролируемую физическую величину, являющуюся источником информации о влажности, влияют многие другие характеристики древесины, а неоднородность вызвана ориентацией волокон в материале.

На современном рынке представлен достаточно широкий спектр приборов косвенного измерения влажности материалов, однако большинство из них обладают существенной методической погрешностью, обусловленной сложной зависимостью выходного сигнала измерительных преобразователей от влажности контролируемого материала. Подобные тарифовочные характеристики различаются в зависимости от вида контролируемого материала, его физико-химических свойств, геометрических размеров, диапазона контролируемой влажности и т. д.

Кроме того, в настоящее время одним из перспективных направлений развития науки и техники является внедрение энергосберегающих технологий. Технологические процессы сушки древесины в различных отраслях промышленности являются наиболее энергоемкими. Поэтому высокоточный быстросействующий

контроль влажности древесины позволит оптимизировать технологический процесс сушки по критериям энергетических затрат и качества выпускаемой продукции. Особо следует отметить проблемы качества продукции, поскольку допустимый разброс влажности высушенной древесины ограничен довольно узкими пределами. Современное технологическое оборудование сушки древесины не позволяет обеспечить постоянства влажности габаритных изделий по всему объему, что зачастую приводит к отклонениям от установленных пределов влажности, что приводит к браку.

Теоретическая часть

В основе устройства тарирования приборов косвенного измерения влажности материалов лежит аппроксимация методом наименьших квадратов, полученных значений влажности, измеренных прибором и сухо-весовым методом. Схема устройства для тарирования приборов измерения влажности представлена на рис. 1.

Стенд состоит из взаимосвязанных блоков: сушильной камеры, весов, увлажнителя образцов, тарируемых влагомеров, образцов материалов, полуавтоматического устройства для обработки тарифовочных характеристик и результатов измерений.

Влажность при измерении сухо-весовым методом, в процентах, вычисляют по формуле (%):

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100, \quad (1)$$

где m_1 – масса образца до высушивания, г;
 m_2 – масса образца после высушивания, г.



Рис. 1. Схема устройства для тарирования приборов косвенного измерения влажности материалов

Полученные значения влажности аппроксимируются. Задача определения параметров аппроксимирующей функции $y = f(x)$ сводится к некоторой минимизации отклонений значений этой функции от табличных значений. На практике в основном используется метод наименьших квадратов, в котором параметры функции $f(x)$ определяются из условия минимизации суммы квадратов отклонений:

$$S = \sum_{i=0}^m [y_i - f(x_i)]^2. \quad (2)$$

Известно, что если отклонения подчиняются нормальному закону распределения, то полученные таким методом значения параметров аппроксимирующей функции $f(x)$ наиболее вероятны.

Аппроксимация заданной зависимости при помощи метода наименьших квадратов состоит из двух этапов: выбор аппроксимирующей функции и определение параметров этой функции. Первый этап является наиболее творческим и выполняется исследователем, а второй этап полностью формализован и может выполняться с помощью компьютера.

В качестве образцов материала для проведения экспериментальных исследований использовались заготовки из сосны (рис. 2).

Определение влажности образцов древесины производилось контрольным весовым методом согласно ГОСТ 16588-91 «Продукция и деревянные детали. Методы определения влажности».

Выпиленные и увлажненные образцы, одинакового размера, очищенные от опилок и заусенцев, взвешивают на весах с погрешностью не более 0,1 г и измеряют их влажность тарируемым прибором. Увлажнение образцов проводится таким образом, чтобы их влажность была различна. В случаях, когда невозможно взвесить образцы сразу после их изготовления и увлажнения, их необходимо поместить до взвешивания в пакеты или сосуды, которые должны быть предварительно взвешены. Пакеты и сосуды заполняют как можно полнее и закупоривают герметично.

Образцы помещают в сушильный шкаф и сушат при температуре $(120 \pm 2)^\circ\text{C}$ и принудительной циркуляции воздуха в течение 2–2,5 ч. После сушки образцы помещают в пакеты или сосуды, охлаждают до температуры окружающего воздуха и взвешивают. Образцы считают высушенными, если изменение массы контрольных образцов между двумя последова-

тельными взвешиваниями, проведенными с интервалом 2 ч, не превышает 1 %. При этом за массу высушенного образца принимают результат последнего взвешивания. По формуле 1 находятся влажности каждого образца.

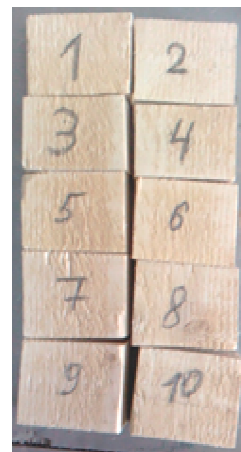


Рис. 2. Образцы древесины сосны

В качестве аппроксимирующей функции была выбрана экспоненциальная функция:

$$W_{\text{сyx}} = \sum_{i=1}^n a_i e^{b_i W_{\text{н}}} \quad (3)$$

где $W_{\text{сyx}}$ – влажность, измеренная сухо-весовым методом (%); a_i , b_i – коэффициенты аппроксимации; $W_{\text{н}}$ – влажность, измеренная тарируемым прибором (%).

Для исследованных образцов найдены следующие коэффициенты аппроксимации:

$$a_1 = 4.118, a_2 = 19.084, a_3 = 3.366, \\ b_1 = 0.015, b_2 = 0.015, b_3 = 0.015.$$

На рис. 3 приведен результат аппроксимации значений влажности при измерении прибором ADA ZFM 100 в диапазоне 30–70 %.

По оси абсцисс – $W_{\text{н}}$, по оси ординат – $W_{\text{сyx}}$.

Полученная тарировочная характеристика в виде экспоненциальной зависимости вносится в программу устройства для тарировки.

Общая погрешность всего стенда складывается из погрешности определения влажности образцов суховесовым методом, погрешности измерений тарируемого прибора, погрешности аппроксимации тарировочных кривых.

Абсолютная погрешность аппроксимации:

$$Q = \sqrt{\sum_{i=0}^m [y_i - f(x_i)]^2} \quad (4)$$

Абсолютная погрешность аппроксимации экспоненциальной функции $Q = 8.98 \%$.

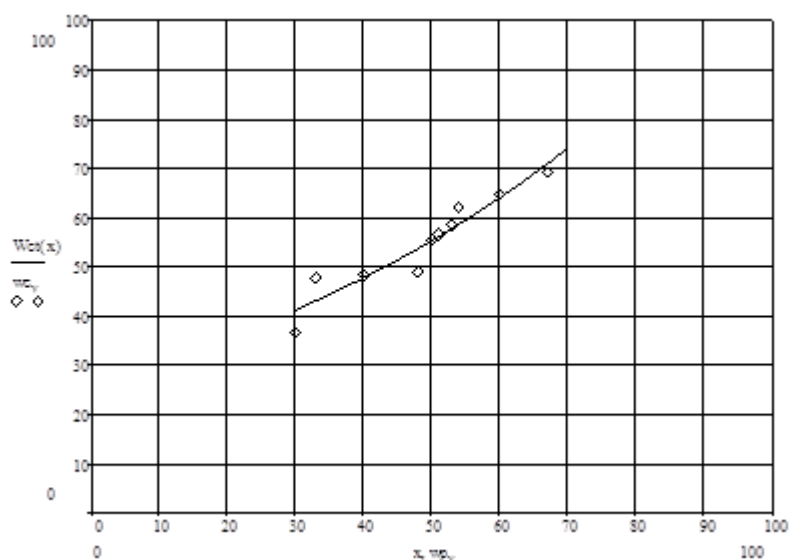


Рис. 3. Аппроксимация зависимости показаний прибора ADA ZFM 100 от влажности

Если в качестве аппроксимирующей функции была выбрана степенная функция вида:

$$W_{срх} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i W_{\Pi}^i \quad (5)$$

где n – степень полинома ($n = 4$).

Для исследованных образцов найдены следующие коэффициенты аппроксимации:

$$a_0 = -830,692743, a_1 = 76,455657, a_2 = -2,46338, \\ a_3 = 0,34709, a_4 = -1,788578 \cdot 10^{-4}.$$

Абсолютная погрешность аппроксимации степенной функции $Q = 2,206 \%$.

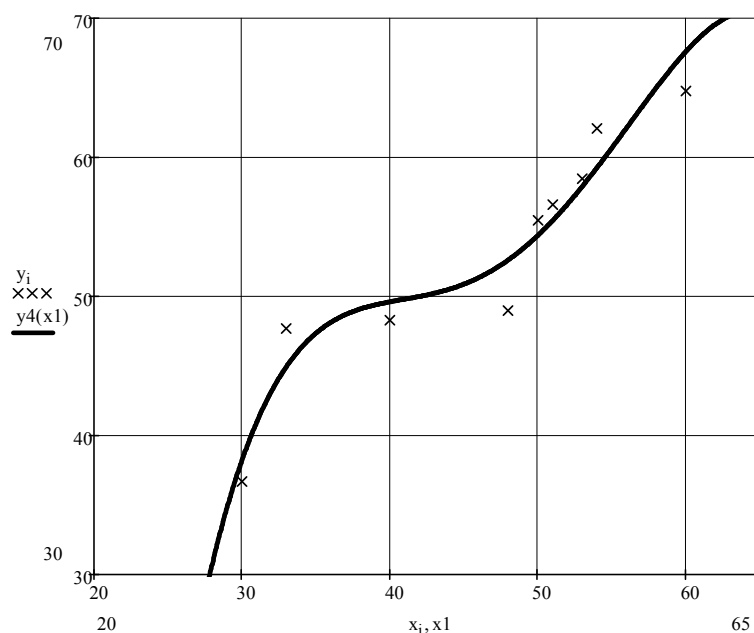


Рис. 4. Аппроксимация степенной функции зависимости показаний прибора ADA ZFM 100

Выводы

Разработанное устройство позволяет тарировать приборы для измерения влажности. Это

очень актуально, так как градуировка и поверка влагомеров связаны с большими трудностями (для твердых материалов отсутствуют эталоны

влажности, их сложно создать и сохранить), также контроль влажности необходим во многих областях науки и промышленности, что соответственно вызывает необходимость тарировки приборов контроля влажности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1973. – 300 с.

2. Матханов, П. Н. Основы синтеза линейных электрических цепей / П. Н. Матханов. – М.: Высшая школа, 1976. – 208 с.

3. Шилин, А. Н. Автоматизация контроля влажности паркетной доски в процессе ее производства / А. Н. Шилин, С. Б. Сластинин, С. В. Макартичян // Приборы. – 2009. – № 1. – С. 47–51.

4. Шилин, А. Н. Цифровой прибор производственного контроля влажности паркетной доски / А. Н. Шилин, С. В. Макартичян // Датчики и системы. – 2010. – № 12. – С. 56–58.

УДК 621.317

Д. С. Деянов, А. И. Нефедьев

ЦИФРОВОЙ ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЦИИ

Волгоградский государственный технический университет

Приведены проблемы, возникающие при использовании радиации в технике, медицине и при производстве электроэнергии. Предложен цифровой прибор для измерения радиации персоналом АЭС, предназначенный для мониторинга радиационной обстановки. Приведена структурная схема прибора и описание его работы.

Ключевые слова: радиация, измерение, дозиметр, радиационный фон.

D. S. Deyanov, A. I. Nefed'ev

DIGITAL MEASUREMENT DEVICE OF RADIATION

Volgograd State Technical University

(e-mail: nefediev@rambler.ru)

The transformer voltage divider for calibration of instrument voltage transformers in operation, control and energy accounting was designed. The voltage divider circuit and a description of his work were shown.

The problems arising from the use of radiation in technology, medicine and electricity generation are presented. The digital device for measuring radiation by plant personnel intended to monitor radiation was designed. A block diagram of the device and a description of it works were shown.

Keywords: radiation, measurement, dosimeters, radiation background.

Хорошо известно, что радиация представляет большую опасность. С каждым годом увеличивается количество радиоактивных материалов, применяемых в различных областях техники. Нас окружает большое количество различных радиационно-опасных объектов, таких как атомные электростанции, объекты по переработке и захоронению радиоактивных отходов, предприятия радиохимической промышленности.

При авариях на таких объектах имеет место выход радиоактивных веществ в окружающую среду. Заражение радиоактивными веществами может серьезно повлиять на здоровье людей, оказавшихся в зоне радиоактивного заражения, а также нанести непоправимый ущерб природной среде.

Важную роль в процессе контроля радиационной обстановки играет организация радиационного наблюдения, разведки и контроля. Полученные с помощью дозиметрических приборов сведения об уровне радиации позволяют

оценить масштабы и степень радиоактивного заражения местности, а также оценить влияние на здоровье человека.

Влияние радиационного фона на человека приведено в таблице [1,2].

Уровень радиационного фона, мкЗв/ч	Влияние на здоровье человека
0,22	Отсутствует (обычный радиационный фон)
2,28	Средний допустимый уровень облучения для работников атомной промышленности
11,42	Уровень радиационного фона, резко увеличивающий вероятность развития рака
114,15	Разовая доза – вызывает лучевую болезнь с тошнотой и пониженным содержанием белых телец в крови, но не летальный исход
570,77	Половина людей получивших такую дозу радиации, умирает в течение месяца

Поражающий эффект излучений зависит не только от величины дозы, но и от времени ее накопления, то есть от интенсивности излучения. Чем интенсивнее поток радиоактивного излучения, тем быстрее накапливается в организме поглощенная доза излучения.

Естественный радиационный фон, включающий космические излучения и излучения радиоактивных элементов, всегда присутствующих в земной коре, составляет в среднем 100–200 мбэр (1–2 мЗв) в год или примерно 8–20 мкР/ч. Существенную роль играют радиоактивные источники, созданные человеком и используемые в медицинских устройствах, при производстве электро- и тепловой энергии, при изготовлении светящихся циферблатов часов, поиска полезных ископаемых и в военном деле [2,3].

Медицинские процедуры, связанные с применением радиоактивности, вносят основной вклад в дозу, получаемую человеком от техногенных источников. Например, при флюорографии человек получит одномоментную дозу 3,7 мЗв (370 мбэр). Радиация используется человеком как для диагностики, так и для лечения. Одним из наиболее распространенных приборов является рентгеновский аппарат, а лучевая терапия – главный способ борьбы с раковыми опухолями [4].

Но самым распространенным источником облучения являются часы со светящимся циферблатом. Они дают годовую дозу, в 4 раза превышающую ту, что обусловлена утечками на АЭС [5].

Также дополнительное облучение можно получить в самолете из-за того, что с увеличением высоты уменьшаются защитные свойства атмосферы. Человек становится более открытым для космических лучей. Еще одним источником облучения являются пищевые продукты.

Одна из самых важных проблем в области атомной энергетики является безопасность персонала, работа которых находится в опасных для здоровья и жизни зонах. Например, работник АЭС может получить дозу радиации больше своей годовой нормы, что, несомненно, отразится на его здоровье. И несмотря на наличие большого количества современных средств защиты от радиации, вероятность заражения человека не равна нулю [6,7].

Над проблемой контроля радиационной обстановки работают большое количество зарубежных компаний, выпускающие бытовые

и профессиональные дозиметры. Примером таких устройств является дозиметр «Квантум», в котором используется два счетчика Гейгера-Мюллера, за счет чего достигается высочайшая точность и скорость измерений. Дозиметр позволяет измерять как радиационный фон, так и накопленную дозу излучения, а результат может отображаться в числовом виде или в виде графика, отображающего уровень радиации за сутки использования прибора. Параметры дозиметра: диапазон измерения фона – до 1000 мкЗв/ч; диапазон измерения накопленной дозы – до 1000 Зв; время измерения – до 10 с.

Еще одним примером подобного устройства является дозиметр радиоактивности SMG-2, обладающий широким диапазоном измерений. Дозиметр измеряет не только уровень радиации, но и накопленную дозу облучения. Прибор выделяется достаточно длительной автономной работой за счет применения современной элементной базы. Все показания хранятся во встроенной памяти, их также можно перенести на компьютер для ведения статистики. Параметры дозиметра: диапазон измерений – 0,01...999 мкЗв/ч; время измерения – от 20 до 60 секунд. Результаты измерений могут быть представлены в числовой и графической форме.

Но учитывая политическую и экономическую ситуацию в мире, наша страна взяла курс на импортозамещение. Разработки аналогичных приборов есть и в нашей стране. Примером может служить дозиметр радиоактивности СОЭКС 01М.

Параметры дозиметра: диапазон измерений – до 999 мкЗв/ч; время измерения – до 10 сек. Результаты измерений могут быть представлены в числовой и графической форме.

Основной тенденцией построения подобных приборов является малая масса, автономность, возможность сопряжения с компьютером и высокая точность измерений.

Для измерения радиации на АЭС разработано устройство, структурная схема которого представлена на рисунке. Разработанное устройство обеспечивает наблюдение за уровнем излучения и дозой радиации как в активном, так и в ждущем режиме. Преимуществом данного устройства является наличие ждущего режима, при котором прибор потребляет минимальное количество электроэнергии. Вторым преимуществом является автоматический переход из ждущего режима в активный режим из-

мерения при обнаружении детектором опасного уровня излучения.



Структурная схема прибора измерения радиации

Основой прибора измерения радиации является микроконтроллер. Питание прибора осуществляется от гальванического элемента или аккумулятора. Преобразователь напряжения преобразует низкое напряжение источника питания в высокое постоянное напряжение, необходимое для питания счетчика Гейгера типа СБМ-21. Управление преобразователем напряжения осуществляется микроконтроллером.

Управление прибором осуществляется при помощи кнопок управления. Для вывода информации о радиационной обстановке предусмотрен жидкокристаллический индикатор, светодиод и динамик.

Разработанный прибор измеряет как уровень облучения, так и суммарную дозу облучения. Суммарную дозу и интенсивность облучения сравниваются с заданными порогами, и в случае их превышения на индикаторе появляется сообщение «ФОН». Усредненное за час значение интенсивности облучения выводится в верхней строке экрана ЖКИ.

Результаты измерения запоминаются в энергонезависимой памяти микроконтроллера (EEPROM). Превышение допустимой дозы бу-

дет зафиксировано и измерено прибором автоматически, а результаты измерений с постоянным накоплением сохраняются в памяти и выводятся на индикатор.

Потребляемый прибором ток при работе в условиях естественного радиоактивного фона, то есть при отсутствии звуковой и световой сигнализации, не превышает 2,5 мА.

Разработанный прибор измерения радиации для персонала АЭС обеспечит своевременной информацией о радиационном фоне, что позволит сохранить жизнь и здоровье персонала АЭС.

Таким образом, четкая организация работы службы радиационной безопасности в условиях нормальной эксплуатации и в аварийных режимах является залогом безопасной эксплуатации АЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Российская энциклопедия по охране труда: В 3 т. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2007.
2. Нормы радиационной безопасности НРБ -76/87. Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП - 72/ 87 / Минздрав СССР- 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Васильченко, В. Н. Принципы организации сбора информации по дозиметрическим аспектам радиационных аварий. Руководящий документ Росстандарта, РД-187655/94 / В. Н. Васильченко, А. В. Носовский, В. П. Крючков, Д. П. Осанов, Д. А. Павлов, А. Г. Цовьянов, А. С. Бондарчук, С. В. Ильичев. - Москва, 1994.
4. Иванов, В. И. Курс дозиметрии: учебник для вузов / В. И. Иванов. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 400 с.
5. Кошечев, В. С. Индивидуальная защита работающих в атомной энергетике / В. С. Кошечев, Д. С. Гольдштейн, В. Н. Клочков и др. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 174 с.
6. Машенко, Н. П. Радиационное воздействие и радиационная защита населения при ядерных авариях на атомных электростанциях: учеб. пособие / Н. П. Машенко, В. А. Мурашко. - К.: Вища шк., 1992. - 111 с.
7. Машкович, В. П. Основы радиационной безопасности: учеб. пособие для вузов / В. П. Машкович, А. М. Панченко. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 172 с.

УДК 697 133

*А. Б. Мадаров¹, А. В. Стрижиченко²***ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**¹Волгоградский государственный технический университет²Московский энергетический институт (филиал в г. Волжском)

Произведен анализ возможности измерения потерь в тепловых сетях. Проведено инструментальное исследование изоляции теплопровода. Выполнен анализ влияния неоднородности состояния тепловой изоляции по длине трубопровода и учета реальных условий эксплуатации тепловых сетей на изменение транспортных потерь тепла. Приведен анализ состояния теплоизоляции. Произведен расчет температуры теплоносителя.

Ключевые слова: теплопередача, теплоизоляция, температура теплоносителя, тепловизионный контроль.

*A. B. Madarov¹, A. V. Strizhichenko²***THE OPTICAL ELECTRONIC METHOD FOR DETERMINING
TEMPERATURE OF THE COOLANT**¹Volgograd State Technical University²Moscow Power Engineering Institute (branch in Volzhsky)

(e-mail: eltech@vstu.ru)

Analysis of the possibility of measuring heat losses is presented. Instrumental study insulation made of a heat conductor. Analysis of influence of heterogeneity of the state of thermal insulation along the length of the pipeline, and taking into account the actual conditions of operation of heat networks to change the transport of heat loss is made. Analysis of thermal insulation is presented. Calculation of the coolant temperature is produced.

Keywords: heat transfer, thermal insulation, coolant temperature, thermal control.

Наиболее распространенным методом учета тепловых потерь является учет температуры и расхода теплоносителя на концах контролируемого участка трубы. Однако этот метод не позволяет определить причины потерь и может применяться только при полном оснащении приборами учета всех отводов от трубопровода.

Описание проблемы. В современных условиях необходимым фактором экономически эффективного функционирования промышленных предприятий и объектов теплоэнергетики является рациональное использование тепловой энергии. В то время как около 70 % тепла теряется при его транспортировке к потребителю, тема исследований становится весьма актуальной.

Потери тепла на участках его транспортировки к потребителю включают в себя:

- потери тепловой энергии по длине теплотрассы, связанные со способом прокладки и изоляцией трубопроводов;
- потери тепловой энергии, связанные с неточным распределением тепла между объектами-потребителями, то есть гидравлической настроенностью теплотрассы и графиками температурного регулирования отпуска тепла на источнике;

• утечки теплоносителя, периодически возникающие во время аварийных и нестандартных ситуаций, которые часто возникают из-за высокой степени износа трубопроводов и тепломеханического оборудования тепловых сетей, разрушения гидрозащитной оболочки и теплоизоляционного слоя под воздействием агрессивных сред и грунтовых вод.

Как следует из изложенного выше, исследования в области потерь тепловой энергии и расчет температур теплоносителя в заданных точках по всей длине теплопровода, а не только на его концах и контрольных точках с целью предупреждения и оперативного выявления проблемных участков теплотрасс и трубопроводов являются актуальными в области теплоэнергетики.

Целью данной работы является разработка методики определения температуры теплоносителя в трубопроводах при известной температуре поверхности теплопровода. Оптимальным средством выполнения измерений температуры наружной поверхности теплопровода является тепловизор. Он позволяет не только получить исходные данные для расчета тепловых потерь, но и оперативно снять информацию

о состоянии теплоизоляции на достаточно протяженных объектах. Актуальным использование тепловизора, в отличие от контактного способа измерения температур, становится при съемке объектов с неплоскими поверхностями, так как на полученной термограмме участка объекта сразу возможно определить точки максимумов и минимумов температур, а также способ является менее трудоемким, особенно при большом количестве измерений на труднодоступных и протяженных объектах.

При оценке интенсивности инфракрасного излучения большое влияние на результаты оказывает угол между оптической осью системы

приемника и нормалью к излучающей поверхности (рис. 1). Для каждого типа реальных излучателей существует предельный угол, превышение которого приводит к существенному понижению коэффициента направленного излучения. В случае, если угол наблюдения менее 60° , излучательная способность от угла наблюдения практически не зависит. В диапазоне от 60° до 90° излучательная способность при приближении к 90° будет стремительно падать, а коэффициент отражения соответственно возрастать [2]. Поэтому необходимо стремиться, чтобы тепловизор был направлен по нормали к снимаемому объекту.

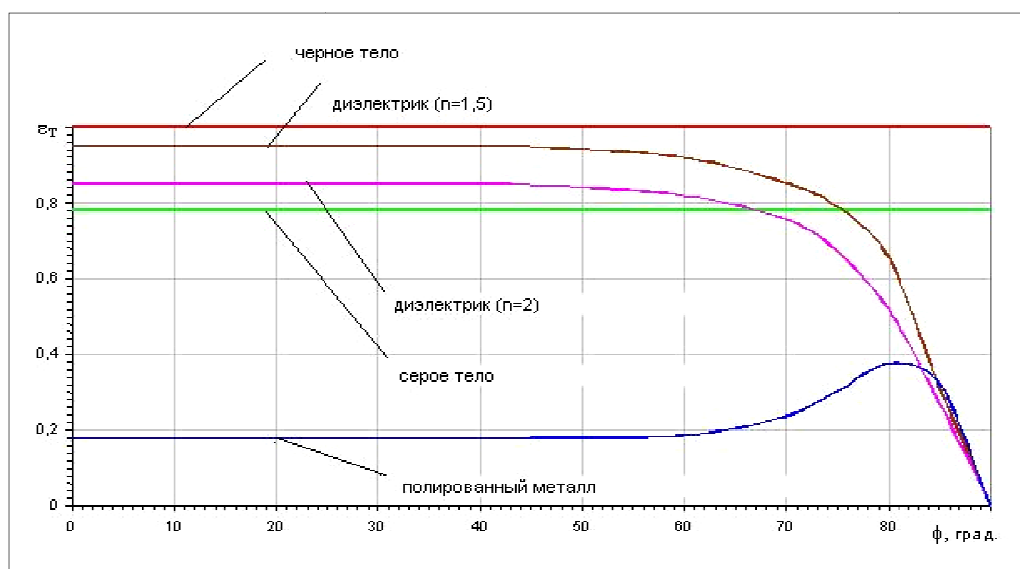


Рис. 1. Зависимость коэффициента излучения от угла наблюдения для различных источников и материалов

На рис. 2 представлена схема контроля теплотехнических процессов. Она состоит из тепловизионной камеры, с помощью которой осуществляется термографическая съемка объекта исследования и создается альбом термографических карт, который поступает в блок вычисления. Затем происходит анализ и обработка результатов съемки с помощью базы данных, в которой учтены методические погрешности в соответствии с ГОСТ 26629-85 «Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций», РД 153-34.0-20.363-99 «Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ», РД 153-34.0-20.364-00 «Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования», заложены справочные коэффициенты (коэффициенты излучения материалов, зависящие от температуры и длины волны и др.), алгоритмы вычислений необходимых параметров (температура теплоносителя

внутри трубопровода и др.). Также в блок вычисления поступает информация с дополнительных приборов (анемометр, термометр и других), необходимая для анализа и вычислений.

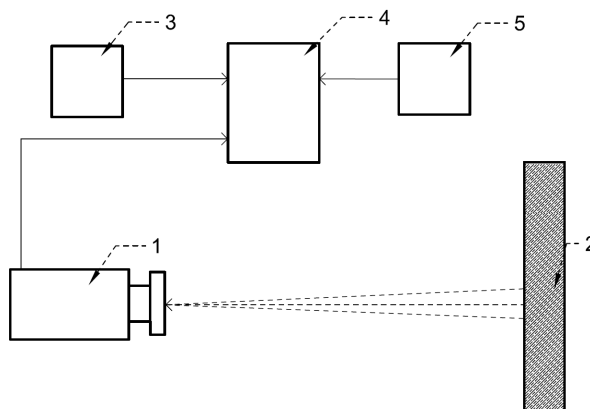


Рис. 2. Схема контроля теплотехнических процессов: 1 – тепловизор; 2 – объект исследования; 3 – приборы измерений (термометр, измеритель диаметра и т. д.); 4 – блок вычисления (микроконтроллер); 5 – база данных

Объектом данного исследования стал участок стального теплопровода цилиндрической формы с теплоизоляцией, выполненной минеральной ватой.

Особенность теплопередачи через цилиндрическую стенку заключается в том, что поверхности теплообмена снаружи и внутри трубы различны. Исходя из схемы передачи теплоты, представленной на рис. 3, можно записать формулу линейной плотности теплового потока, передаваемого через многослойную цилиндрическую стенку [4]:

$$q_l = \frac{\pi(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{i+1}}}. \quad (1)$$

При стационарном тепловом режиме линейная плотность теплового потока не меняется по толщине стенки [3], то есть

$$\frac{\partial q_l}{\partial r} = 0. \quad (2)$$

Составим систему уравнений линейных плотностей теплового потока для каждого из слоев:

$$\left\{ \begin{aligned} q_l &= \frac{\pi(t_{ж1} - t_{c1})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1}}, \\ q_l &= \frac{\pi(t_{c1} - t_{c2})}{\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1}}, \\ q_l &= \frac{\pi(t_{c2} - t_{c3})}{\frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}}, \\ q_l &= \frac{\pi(t_{c3} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_2 d_3}}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где $t_{ж1}$, $t_{ж2}$ – температура горячей среды (теплоносителя) и холодной среды (воздуха); t_{c1} , t_{c2} , t_{c3} – температуры поверхностей стенки; λ_1 , λ_2 – соответственно коэффициенты теплопроводности стали и минеральной ваты; α_1 , α_2 – коэффициенты теплоотдачи от жидкости к внутренней поверхности трубы и от наружной поверхности трубы к окружающему воздуху; d_1 , d_3 – внутренний и внешний диаметр трубы (рис. 3).

При определении коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к воздуху возникает существенная неопределенность. Величина α_2 может иметь значение от 6

до 29 Вт/(м²·°C) [3] в зависимости от коэффициента излучения внешнего слоя теплоизоляции и скорости ветра, но аналитические выражения для α_2 отсутствуют.

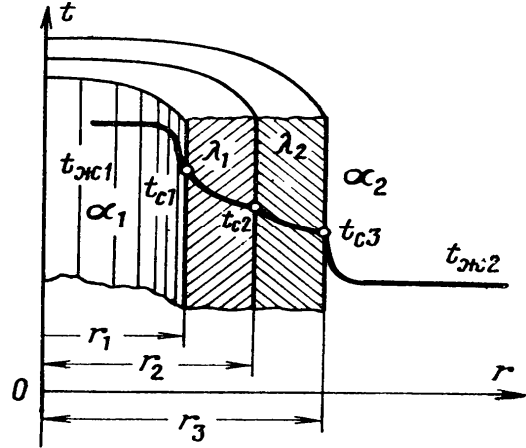


Рис. 3. Теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку

Известна зависимость α_2 от скорости ветра W и диаметра d трубопровода в виде [1]:

$$\alpha_2 = 4,65 \cdot W^{0.7} / d^{0.3}. \quad (4)$$

Известны также следующие зависимости α_2 для двух диапазонов чисел Рейнольдса [3]:

$$Nu_2 = 0,25 \cdot Re_{\text{возд}}^{0.6} Pr_{\text{возд}}^{0.38}, \quad (5)$$

если $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$,

$$Nu_2 = 0,23 \cdot Re_{\text{возд}}^{0.8} Pr_{\text{возд}}^{0.37}, \quad (6)$$

если $3 \cdot 10^5 < Re < 2 \cdot 10^6$.

которые аппроксимированы авторами [3]. В результате получена зависимость:

$$\alpha_2 = 0,0926 \cdot W^{0.7} Pr_{\text{возд}}^{0.38} \lambda_{\text{возд}} \cdot \nu_{\text{возд}}^{-0.7} / d_n^{0.3}, \quad (7)$$

где $Pr_{\text{возд}}$ – число Прандтля для воздуха; $\lambda_{\text{возд}}$, $\nu_{\text{возд}}$ – коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости воздуха.

Интенсивность теплоотдачи на границе «жидкость–внутренняя стенка трубы» при развитии турбулентного течения ($Re > 1 \cdot 10^4$) может быть определена по формуле [1]:

$$Nu = 0,021 \cdot Re_b^{0.8} Pr_b^{0.43} \left(\frac{Pr_b}{Pr_{ct}} \right)^{0.25}, \quad (8)$$

где Re_b , Pr_b – числа Рейнольдса и Прандтля для жидкости.

Из выражения (1) определим линейный тепловой поток:

$$q_l = \frac{\pi(t_{c3} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_2 d_3}} \quad (9)$$

Выразим из системы уравнений (3) температурные напоры и сложим уравнения, тогда для температуры внутренней поверхности трубы получим выражение:

$$t_{c1} = t_{ж2} + \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3} \right) \quad (10)$$

Из системы уравнений (3) определим температуру теплоносителя:

$$t_{ж1} = t_{c1} + \frac{q_l}{\pi} \frac{1}{\alpha_1 d_1} \quad (11)$$

Таким образом в статье предложен способ определения температуры теплоносителя на участке трубопровода по известной температуре на поверхности трубопровода для возможности мониторинга температур теплоносителя на протяженных объектах. Получена новая ма-

тематическая модель определения температуры и предложена методика ее применения с использованием тепловизора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галенко, Ю. А. Математическая модель и методика определения тепловых потерь надземных трубопроводов / Ю. А. Галенко, В. П. Лушев, В. Н. Пузанов // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2. – С. 41–43.
2. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение : Пер. с франц. / Ж. Госсорг. – М. : Мир, 1989. – 416 с.
3. Михеев, М. А. Основы теплопередачи. Изд. 2-е : монография / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : «Энергия», 1977. – 344 с.: ил.
4. Орлов, М. Е. Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен : учебное пособие / М. Е. Орлов; Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 204 с.

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 2016 г. Поз. № 24ж. Подписано в печать 29.08.2016 г. Формат 60 х 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 6,51. Уч.-изд. л. 6,06.
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.