ISSN 2518-1653 (online)
vestnik.donntu.org

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЕСТНИК

№2 (12) 2018 г.



ВЕСТНИК ДонНТУ №2(12)'2018

международный научно-технический журнал

Учредитель и издатель: *ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)*

Главный редактор
Маренич К.Н. (д.т.н., проф.)*

Зам. главного редактора
Булгаков Ю.Ф. (д.т.н., проф.)*

Ответственный секретарь
Сотников А.Л. (д.т.н., доц.)*

Редакционный совет:
Артюх В. Г. (д.т.н., проф.)
Беломеря Н.И. (к.т.н., доц.)*
Бершадский И.А. (д.т.н., проф.)*
Бирюков А.Б. (д.т.н., проф.)*
Бутузова Л.Ф. (д.х.н., проф.)*
Высоцкий Ю.Б. (д.х.н., проф.)*
Горбатко С.В. (к.т.н., доц.)*
Горбатюк С. М. (д.т.н., проф.)*
Дедовец И.Г. (к.т.н., доц.)*
Еронько С.П. (д.т.н., проф.)*
Захаров Н.И. (д.т.н., доц.)*
Ковалев А.П. (д.т.н., проф.)*
Кожевникова И.А. (д.т.н., доц.)
Кондрахин В.П. (д.т.н., проф.)*
Кононенко А.П. (д.т.н., проф.)*
Куренный Э.Г. (д.т.н., проф.)*
Приседский В.В. (д.х.н., проф.)*
Ченцов Н.А. (д.т.н., доц.)*
Шабаев О.Е. (д.т.н., проф.)*
Шаповалов В.В. (д.х.н., проф.)*
Яковченко А.В. (д.т.н., проф.)*
* - *штатные сотрудники учредителя*

Адрес: 28300, г. Донецк, ул. Артема, 58
Телефон +380 (62) 304-60-82
Эл. почта: vestnikdonntu@gmail.com
Интернет: vestnik.donntu.org

Вестник ДонНТУ
2018. №2(12)

ISSN 2518-1653 (online)

Издается с января 2016 г.
Периодичность издания: 4 раза в год

Свидетельство о государственной регистрации № 000133 от 27.05.2017

За содержание статей и их оригинальность несут ответственность авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов. За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Подписано к печати по решению Ученого Совета ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»
Протокол №3 от 28.04.2018

Формат 60×84$^{1/8}$. Заказ 0418.
Изд-во «Донецкая политехника», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

А.Я. Бабанин, М.Ю. Ткачев, В.В. Белоусов
Повышение срока службы пробковых кранов большого диаметра путем оптимизации гидродинамических потоков шламовой смеси в них 3

С.А. Снитко, А.Л. Сотников, А.В. Яковченко
Износ инструмента деформации при штамповке колесных заготовок 9

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Н.М. Лысенко, Е.Ю. Степаненко, А.В. Гудинов
Установление диссипативных характеристик виброзащитного устройства, встраиваемого в подсистему привода исполнительных органов очистных комбайнов 15

Н.А. Скляров
Исследования и разработка рекомендаций по увеличению долговечности гидростоек и гидродомкратов передвижки забойного скребкового конвейера 23

С.Н. Царенко, И.И. Бридун, М.В. Бридун
Устойчивость невесомого растянуто-сжатого стержня, моделирующего работу стальной крепи при спуске на плаву 29

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В.И. Калашников, А.В. Алдошин
Анализ систем синхронного привода электромобилей 35

А.П. Ковалев, Д.И. Воронин, А.С. Петренко
О расчете надежности структурно сложных невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях 39

А.П. Ковалев, Д.Ю. Дьяченко, А.А. Мартынов
Совершенствование метода оценки надежности невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях 49

Э.Г. Куренный, И.А. Бершадский, С.Г. Джура
Сравнительный анализ инновационных методов расчета систем электроснабжения на примере программ CSoft 58

А.М. Ларин, И.И. Ларина
Обоснование необходимого уровня предварительного подмагничивания при определении электромагнитных параметров турбогенераторов методом затухания постоянного тока 67

К.Н. Маренич, Е.С. Дубинка
Эволюция технических решений задачи подавления обратных энергетических потоков асинхронных двигателей 74

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Е.В. Додонова, В.А. Гольцов
Установка для изучения кинетики фазовых превращений, индуцированных водородом, в интерметаллических сплавах типа R_2Fe_{17} (R–Sm, Y) 83

ИНФОРМАЦИЯ

Требования к статьям, направляемым в редакцию 88

Информация об издании

– На страницах журнала публикуются научные статьи фундаментального и прикладного характера, информация о конференциях, семинарах и выставках; освещается деятельность ведущих научно-исследовательских и проектных институтов, промышленных предприятий и коммерческих организаций, технопарков.
– Журнал оказывает информационную поддержку в продвижении на рынок конкурентоспособной наукоемкой продукции, проектов, научно-технических разработок и высоких технологий в различных областях промышленности.
– Журнал распространяется бесплатно в эл. виде посредством сети Интернет; принимает участие в научных конференциях и выставках.
– Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Интернет: elibrary.ru
– Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК) ДНР. Интернет: vak.mondnr.ru
– Редакция журнала принимает к публикации и осуществляет рецензирование рукописей статей по химическим и техническим наукам и следующим группам специальностей: 05.02 – Машиностроение и машиноведение; 05.05 – Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.09 – Электротехника; 05.16 – Металлургия и материаловедение; 05.17 – Химическая технология.

VESTNIK DONNTU

№2(12)'2018

international scientific-technical journal

Founder and publisher Donetsk National Technical University (Donetsk)

Editor-in-chief
Marenych K.N. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*

Deputy Editor-in-chief
Bulgakov Y.F. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*

Executive secretary
Sotnikov A.L. (Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.)*

Editorial council:
Artyukh V. G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Belomerya N. I. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Bershadsky I. A. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Biryukov A.B. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Butuzova L.F. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Vysotsky Y.B. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Gorbatko S. V. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Gorbatyuk S. M. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Dedovets I.G. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Eron'ko S.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Zaharov N. I. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Kovalev A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kozhevnikova I. A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)
Kondrahin V.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kononenko A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kurennyiy E. G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Prisedsky V.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
Chentsov N. A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Shabayev O.E. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Shapovalov V.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
Yakovchenko A.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
* - *staff members of the founder*

Address: 283001, Donetsk, 58, Artema St.
Phone +380 (62) 304-60-82,
E-mail: vestnikdonntu@gmail.com
Internet: vestnik.donntu.org

Vestnik DonNTU
2018. No.2(12)

ISSN 2518-1653 (online)

Published since January, 2016
Publication frequency: 4 times a year

Certificate of State Registration
No. 000133 dated 27.05.2017

The content and originality of the articles is the author's responsibility. The editorial opinion may not necessarily represent the views of the authors.
The content of advertising material is the advertiser's responsibility.

Subscribed to print
on the recommendation
of the Academic Council
Donetsk National Technical University
Protocol No.2 dated 28.04.2018

Format 60×84 1/8. Order 0418
Publishing house
"Donetsk Polytechnic", 2018

CONTENTS

ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

A.Ya. Babanin, M.Yu. Tkachev, V.V. Belousov
Increasing the service life of large diameter plug valves by optimizing hydrodynamic flow of a slurry mixture in them 3
S.A. Snitko, A.L. Sotnikov, A.V. Yakovchenko
The wear of a deformation tool at stamping wheel blanks 9

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION ENGINEERING

N.M. Lysenko, E.Yu. Stepanenko, A.V. Gudinov
The determination of dissipative characteristics of the vibration protection device embedded in a subsystem of the shearer working body drive 15
N.A. Sklyarov
The study and development of recommendations to increase the durability of hydraulic stands and jacks for moving a downhole scraper conveyor 23
S.N. Tsarenko, I.I. Bridun, M.V. Bridun
Stability of weightless stretched-compressed rod simulating the work of steel supports at descent afloat 29

ELECTRICAL ENGINEERING

V.I. Kalashnikov, A.V. Aldoshin
Systems analysis of a synchronous drive of electric vehicles 35
A.P. Kovalev, D.I. Voronin, A.S. Petrenko
Reliability calculation of structurally complex nonrecoverable systems, the elements of which may be in three incompatible states 39
A.P. Kovalev, D.U. Dyachenko, A.A. Martynov
Improving the method for assessing the reliability of unrecoverable systems, the elements of which may be in three incompatible states 49
Э.Г. Куренный, И.А. Бершадский, С.Г. Джура
A comparative analysis of innovational calculation methods for electric power supply systems on the example of the CSOFT programs 58
A.M. Larin, I.I. Larina
Justification of the appropriate magnetic pre-biasing level in determining the electromagnetic parameters of turbogenerators using the method of dc damping 67
K.N. Marenich, E.S. Dubinka
The evolution of technical solutions to the problem of reverse energy flows suppression in induction motors 74

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

E.V. Dodonova, V.A. Goltsov
Experimental equipment for studying hydrogen-induced phase transformations in intermetallic alloys of the R_2Fe_{17} type (R=Sm, Y) with walking beams 83

INFORMATION

Requirements for the papers submitted to the Editorial office 88

Publication Information

– The journal publishes research papers of fundamental and applied nature, information on conferences, seminars and exhibitions. It covers the activities of the leading research and design institutes, industrial and commercial companies and technology parks.
– The journal provides information support for the marketing of competitive high-tech products, projects, scientific and technical developments and high technologies in various fields of industry.
– The journal is distributed free of charge in electronic format via the Internet. It provides informational support and participates in International scientific conferences and exhibitions.
– The journal is included into the Russian Index of Science Citation (RISC). Internet: elibrary.ru
– The journal is included in the list of peer-reviewed scientific publications of the Higher Attestation Commission (VAK) of the DPR. Internet: vak.mondnr.ru
– The editorial accepts for publication and reviews manuscripts on chemical and technical sciences, and the following groups of specialties: 05.02 – Engineering and engineering science; 05.05 – Transport, mining and construction engineering; 05.09 – Electrical engineering; 05.16 – Metallurgy and materials science; 05.17 – Chemical technology.

УДК 669.018.046:621.74.047

А.Я. Бабанин /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (Макеевка)
М.Ю. Ткачев /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
В.В. Белоусов /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» (Донецк)

ПОВЫШЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ПРОБКОВЫХ КРАНОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ШЛАМОВОЙ СМЕСИ В НИХ

Методом математического моделирования выполнены исследования гидродинамических потоков шламовой смеси в пробковом кране Ду 200 мм при различных режимах его работы. Определены гидродинамическая структура и скорость движения потоков шламовой смеси. Установлены четыре характерные области гидродинамической структуры шламового потока: малых, средних, высоких и интенсивных скоростей его движения, а также определены их количественные значения. Установлено, что с изменением угла открытия крана значительно изменяется гидродинамическая структура потока шламовой смеси, в частности, при уменьшении угла открытия, то есть при его закрытии, объем зоны интенсивных скоростей, расположенной на срезе как пробки, так и шара, значительно увеличивается, что приводит к увеличению скорости абразивного износа их кромок.

Ключевые слова: *запорная арматура, пробковый кран, шламовая смесь, гидродинамическая структура потока.*

Постановка проблемы

Пробковые краны большого диаметра, работающие на магистралях подачи шламовой смеси в условиях горно-обогатительных комбинатов (ГОК), обогатительных фабрик угольной промышленности, цементных заводов и т.д. с рабочим диаметром 100-300 мм (Ду 100-300), испытывают значительный абразивный износ, что существенно снижает срок их службы [1]. Преимуществом применения пробковых кранов большого диаметра вместо аналогичных задвижек являются их малые размеры, простота в обслуживании, более низкая стоимость и многолетний опыт их использования в данных условиях. Наряду с существенными преимуществами пробковые краны имеют существенный недостаток – это малый срок службы, вызванный их повышенным абразивным износом. Признаком ухудшения работы крана является течь шламовой смеси, а при полном выходе из рабочего состояния – невозможность регулирования расхода и прекращения подачи шламовой смеси. Это приводит к переводу подачи шламовой смеси на другую магистраль и замене пробкового крана. Поэтому повышение срока службы пробкового крана большого диаметра, работающего на магистрали шламовой смеси, является актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций

Характер выхода из рабочего состояния запорной арматуры большого диаметра заключается в значительном абразивном износе пробки и корпуса в местах соприкосновения с движущейся шламовой смесью [2,3]. Это приводит к пропусканию шламовой смеси в закрытом положении пробкового крана.

В результате анализа рабочих поверхностей, отработавших свой срок на шламовых магистралях ОАО «Донцемент» пробковых кранов Ду 200, установлено, что:

– выход из рабочего состояния пробковых кранов происходит в результате значительного абразивного износа пробки и корпуса при соприкосновении с движущейся шламовой смесью, а также в результате износа сопряженных поверхностей корпуса и пробки;

– первыми признаками значительного износа сопряженных поверхностей корпуса и пробки является пропускание шламовой смеси в закрытом состоянии пробкового крана;

– интенсивность износа зависит от гидродинамических параметров движения шламовой смеси (в частности линейной скорости движения), от механических свойств материала проб-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

кового крана и от физических параметров шламовой смеси (химического состава смеси и фракционного состава твердых частиц, верхнего предела крупности и микротвердости частиц) [4,5].

В результате предварительно проведенных исследований установлено, что интенсивность износа зависит как от механических свойств материала пробкового крана, так и от характеристики шламовой смеси, в частности от фракционного, химического и структурного состава. Пробковый кран изготавливался из серого чугуна СЧ 20 методом отливки деталей в земляные формы с дальнейшей механической обработкой с одинаковой конусностью конуса и пробки.

Цель (задачи) исследования

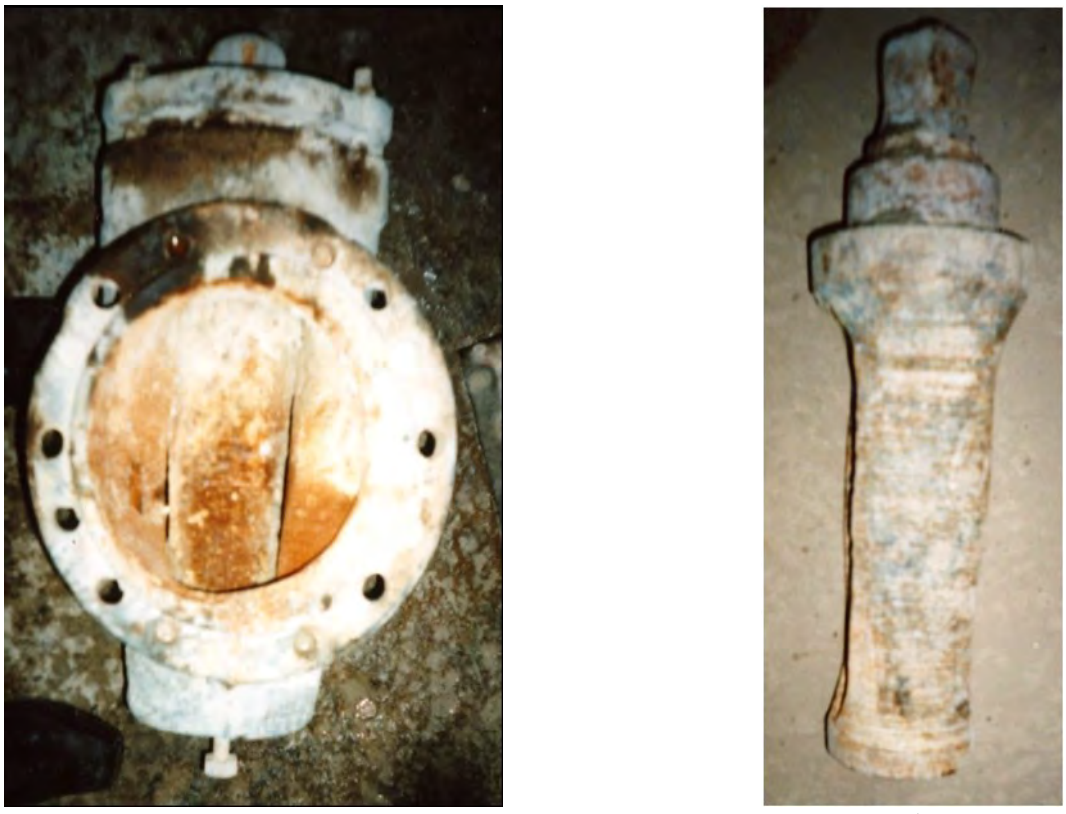
Одним из перспективных направлений повышения износостойкости запорной арматуры является применение конструкционных материалов для изготовления пробковых кранов с более высокими механическими и износостойкими свойствами. Однако это влечет за собой значительное повышение себестоимости пробковых кранов и удорожание производственного процесса перекачки шламовой смеси.

Целью данной работы является определение возможности повышения срока службы пробковых кранов путем оптимизации гидродинамических потоков шламовой смеси, обеспечивающих снижение скорости износа поверхностей пробки и корпуса.

Основной материал исследования

Исследование гидродинамических потоков шламовой смеси в пробковом кране, характерные поверхности износа которого представлены на рис. 1, выполнено при помощи программного комплекса SolidWorks, который обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения [6].

При моделировании использовали метод конечных элементов (МКЭ) – численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, применяемых для решения задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твердого тела (сопромата), теплообмена, гидродинамики и электродинамики [7,8] В соответствии с [9-12] метод конечных разностей (МКР) (метод сеток) базируется на уравнениях в дифференциальной форме, при этом дифференциальные операторы заменяются конечно-разностными соотношениями различной степени точности. Как правило, они строятся на ортогональных сетках (прямоугольной, цилиндрической и т.д.).



а б

Рис. 1. Характерные поверхности износа отработанного пробкового крана Ду 200: *а* – поверхность соприкосновения корпуса с пробкой; *б* – поверхность пробки

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Это позволяет факторизовать операторы и свести решение многомерной задачи к последовательности одномерных задач, а значит, существенно упростить и ускорить решение общей системы уравнений. К недостаткам метода следует отнести плохую аппроксимацию границ сложных областей, что не слишком принципиально для уравнений теплопроводности, но весьма существенно для уравнений гидродинамики.

Основная идея метода конечных разностей (метода сеток) для приближенного численного решения краевой задачи для двумерного дифференциального уравнения в частных производных состоит в том, что на плоскости в области A, в которой осуществляется поиск решения, строится сеточная область As, состоящая из одинаковых ячеек размером s (s – шаг сетки) и являющаяся приближением данной области A; также заданное дифференциальное уравнение в частных производных заменяется в узлах сетки As соответствующим конечно-разностным уравнением; с учетом граничных условий устанавливаются значения искомого решения в граничных узлах области As [13-15].

Процессы можно описать системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, записанных в цилиндрических координатах, в которую входят: уравнение Навье-Стокса, представленное в покомпонентной записи, и уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial r}+v\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial r}+\eta\left(\Delta u-\frac{u}{r}\right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial r}+v\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial r}+\eta\Delta v, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(ru)}{\partial r}+\frac{\partial(rv)}{\partial z}=0, \quad (3)$$

где u, v – радиальная и вертикальная составляющие скорости; t – текущее время; r, z – радиальная и вертикальная координаты; ρ – плотность смеси, P – давление; η – коэффициент кинематической вязкости; $\Delta=\frac{\partial}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{\partial}{\partial z}-$ оператор Лапласа.

Система уравнений (1)-(3) замыкается системой краевых условий.

Начальные условия: t=0: u=v=0.

Граничные условия для скорости записываются в виде:

$$r=0:\ u=0,\ \frac{\partial v}{\partial r}=0,$$
$$z=l_2:\ u=0,\ v=V_n,$$
$$r=l_1:\ u=0,\ v=0,$$
$$z=0:\ u=0,\ v=V_n,$$

где V_n – скорость перемешивания смеси.

При моделировании использовался метод разности против потока, гарантирующий устойчивость конечно-разностной схемы.

Исходные данные для математического моделирования:

1. Пробковые краны установлены на магистрали подачи шламовой смеси из сырьевого цеха в цех обжига насосом «Углесос 12У10-М».

2. Истечение шламовой смеси, физические параметры которой представлены в табл. 1, происходит в емкость при окружающих нормальных условиях, то есть температуре 25 °С и давлении 98 кН/м^2.

3. Насос марки «Углесос 12У10-М» имеет следующие основные технические характеристики:
– подача шламовой смеси – 400 кг/с;
– напор – 85 м;
– мощность двигателя – 315 кВт;
– частота вращения – 1500 об/мин;
– КПД – 70 %.

Табл. 1. Основные физические параметры сырьевой шламовой смеси

Содержание основных компонентов, %					Верхний предел крупности, мм	Средняя микротвердость, МПа
SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO		
13,20	4,00	42,30	2,43	1,23	2,0	1230

Табл. 2. Результаты расчета скорости движения шламовой смеси в трубопроводе

Рабочий диаметр трубопровода, м	Объем трубопровода длиной 1 м, V (м^3)	Скорость движения шламовой смеси в трубопроводе без учета шероховатости поверхности, v (м/с)	Скорость движения шламовой смеси с учетом шероховатости трубопровода, v' (м/с)	Скорость движения шламовой смеси при закрытом на половину кране, Δ (м/с)
100	0,0314	7,96	5,57	11,15
150	0,070	3,50	2,45	4,90
200	0,10	2,50	1,75	3,50
250	0,20	1,25	0,80	1,60

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

4. Плотность шламовой смеси – 1600 кг/м^3.

5. Скорость движения шламовой смеси принималась из табл. 2.

Следует отметить, что химический состав шламовой смеси находится примерно на одном уровне. Однако значительное его изменение, в связи с изменением плотности и коэффициента кинематической вязкости шламовой смеси, оказывает влияние на гидродинамическую структуру и вектор скорости.

В ходе математического моделирования определены гидродинамическая структура и вектор скорости движения шламовой смеси в пробковом кране рабочим диаметром 200 мм при его открытии на 22,5°, 45° и 67,5° (результаты представлены на рис. 2 со шкалой скорости движения шламовой смеси).

Установлено, что структура гидродинамического потока шламовой смеси в зависимости от скорости движения состоит из следующих зон:

– зона сверхмалых скоростей (менее 5 м/с) расположена вблизи поверхности трубопровода;

– зона малых скоростей (5-8 м/с);

– зона средних скоростей (8,1-13 м/с);

– зона сверхсредних скоростей (13,1-17 м/с).

– зона высоких скоростей (17,1-21,6 м/с);

– зона сверхвысоких скоростей (21,6-26 м/с);

– зона интенсивных скоростей (26,1-32 м/с).

С изменением угла открытия пробкового крана значительно изменяется гидродинамическая структура потока шламовой смеси, в частности, при уменьшении угла открытия пробкового крана, то есть при его закрытии, объем зоны интенсивных скоростей, расположенных на срезе пробки, значительно увеличивается. Это приводит к увеличению скорости абразивного износа кромки пробки.

При открытии пробкового крана на 45° объем зоны интенсивного движения уменьшается, а при открытии пробкового крана на 67,5°

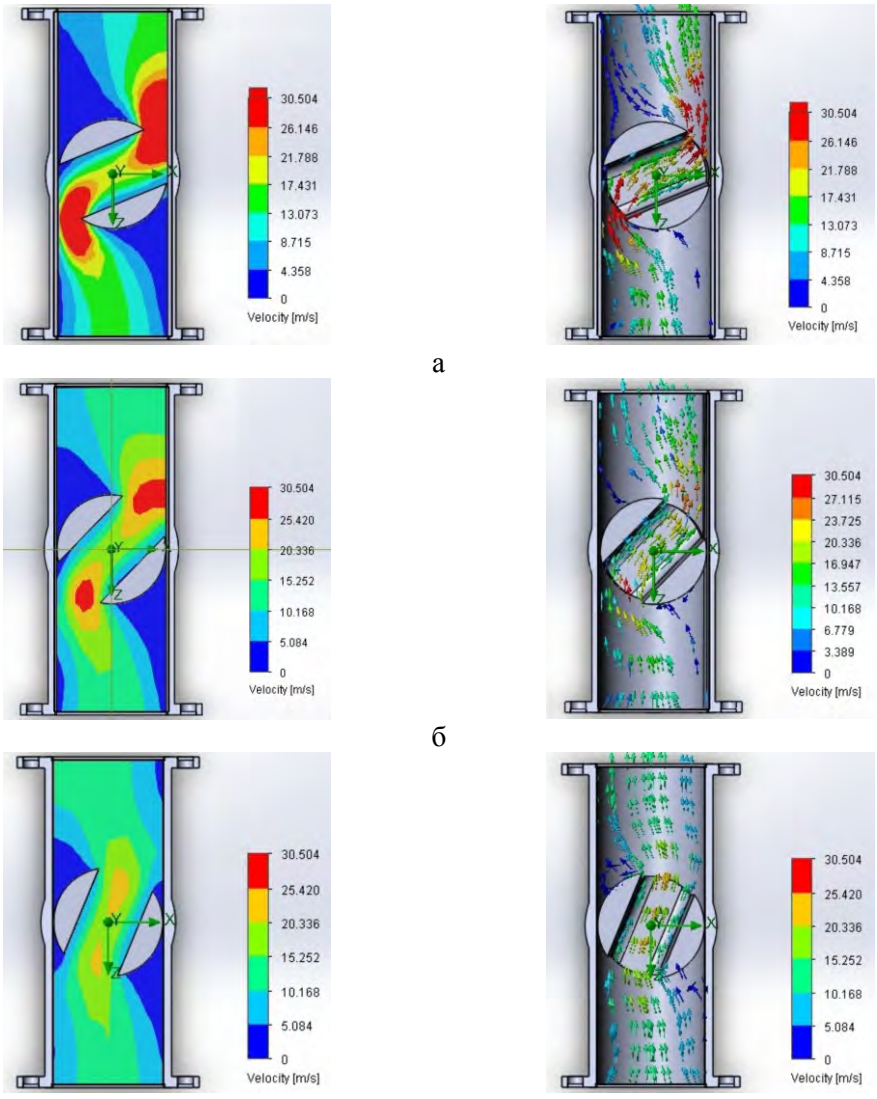


Рис. 2. Гидродинамическая структура и вектор скорости движения шламовой смеси при различных углах открытия пробкового крана: *а* – 22,5°; *б* – 45°; *в* – 67,5°

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

исчезает полностью. Вектор скорости шламовой смеси изменяется аналогично гидродинамической структуре потока.

Следовательно, для снижения абразивного износа пробкового крана и повышения срока его службы необходимо обеспечить такой режим работы пробкового крана, чтобы он максимальное время работал с углом открытия 68-90°.

Испытания разработанного режима работы проводили в условиях производства ОАО «Донцемент» на магистрали подачи шламовой смеси в условиях интенсивного абразивного износа. Контроль работы пробковых кранов Ду 200 осуществляли в насосной № 3, обеспечивающей непрерывную подачу шламовой смеси с расходом 0,072-0,111 $м^3$/с в течение 180 суток. Результаты испытания свидетельствуют, что пробковые краны, которые функционировали в разработанном режиме с углом открытия порядка 70-90°, имеют срок службы без пропускания шламовой смеси в закрытом положении в 1,4-1,6 раза больше, чем краны, работающие в обычном режиме. Это подтверждает адекватность полученных результатов моделирования движения шламовой смеси в пробковом кране с результатами испытания срока его службы в промышленных условиях.

Выводы

В результате математического моделирования движения потока шламовой смеси в пробковом кране определены гидродинамическая структура потока и вектор скорости его движения. Установлены характерные области гидродинамической структуры шламового потока и скорости его движения. Определены их количественные значения.

Установлено, что с изменением угла открытия пробкового крана значительно изменяется гидродинамическая структура потока шламовой смеси, в частности, при уменьшении угла открытия, то есть при его закрытии, объем зоны интенсивных скоростей, расположенной на срезе как пробки, так и шара значительно увеличивается, что приводит к росту скорости абразивного износа их кромок. Поэтому для снижения абразивного износа пробкового крана и повышения срока его службы необходимо организовать его работу с углом открытия в диапазоне 68-90°. Для поддержания оптимального угла открытия пробкового крана в процессе всего производственного цикла перекачки шламовой смеси целесообразно применять механическое управление работой крана.

На основании выполненных исследований разработаны оптимальные режимы работы пробковых кранов Ду 200, обеспечивающие повышение срока их службы в 1,4-1,6 раза.

Список литературы

1. Имбрицкий, М.И. Краткий справочник по трубопроводам и арматуре / М.И. Имбрицкий. – М.: Энергия, 1969. – 168 с.
2. Оконишников, А.И. Эксплуатация и ремонт оборудования на углеобогатительных фабриках / А.И. Оконишников, В.Я. Запсельский. – М.: Недра, 1976. – 288 с.
3. Сорокин, Г.М. Инженерные критерии определения износостойкости сталей и сплавов при механическом изнашивании / Г.М. Сорокин // Вестник машиностроения. – 2001. – №11. – С. 57-57.
4. Иголкин, А.И. Износостойкая наплавка на внутренних поверхностях трубопроводов и емкостных аппаратов / А.И. Иголкин, Ю.В. Зеленин // Химическая и нефтегазовая промышленность. – 2009. – №4. – С. 46-48.
5. Сафонов, Б.П. Инженерная трибология: оценка износостойкости и ресурса трибосопряжений / Б.П. Сафонов, А.В. Бегова. – Новомосковск: РХТУ им. Менделеева, Новомосковский институт, 2004. – 65 с.
6. Lombard, M. Solidworks 2013 Bible / M. Lombard. – Concord: John Wiley & Sons, 2013. – 1299 p.
7. Обгадзе, Т.А. Решение стационарных задач гидродинамики на основе RO-метода Рвачева-Обгадзе / Т.А. Обгадзе. – Тбилиси: Грузинский технический университет, 2017. – 118 с.
8. Белоусов, В.В. Основы тепломассопереноса и теплофизика замкнутых объемов / В.В. Белоусов, Н.И. Болонов. – Донецк: Юго-Восток, 2003. – 135 с.
9. Выбор границ применимости математической модели турбулентности при формировании стального слитка / И.Л. Повх [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 1997. – Т.70, №1. – С. 45-49.
10. Методы вычислительной гидродинамики в расчетах движения жидкости в системах со сложной топологией / С.М. Аракелян [и др.]. – Владимир: Изд-во ВлГУ. – 2015. – 99 с.
11. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2 т. Т.1 / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990. – 384 с.
12. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1989. – 616 с.
13. Pardalos, P.M. Numerical Methods and Optimization: An Introduction / P.M. Pardalos, S. Butenko. – Abingdon: CRC Press: Taylor & Francis Group. – 2014. – 412 p.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

14. Garon, A.M. Velosity and heart transfer measurements in thermal convection / A.M. Garon, R.J. Goldstein // Phys. Fluids. – 1973. – Vol.16. – No.11. – P. 1818-1825.

15. Барилович, В.А. Основы технической термодинамики и теории тепло- и массообмена / В.А. Барилович, Ю.А. Смирнов. – М.: ИНФРА-М. – 2014. – 432 с.

A.Ya. Babanin /Dr. Sci. (Eng.)/
Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (Makeyevka)
M.Yu. Tkachev /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
V.V. Belousov /Dr. Sci. (Eng.)/
Donetsk National University (Donetsk)

INCREASING THE SERVICE LIFE OF LARGE DIAMETER PLUG VALVES BY OPTIMIZING HYDRODYNAMIC FLOW OF A SLURRY MIXTURE IN THEM

Background. *The failure of large diameter plug valves in conditions of intensive operation at the enterprises of mining and processing complex occurs most often due to the generation and development of abrasive wear of the main elements – plugs and housings. Currently, the elimination of the negative factor realized through the use of new, more durable materials in the product design, but this generally does not lead to a positive economic effect, since such measures entailed a significant increase in the cost of both the technological process and the equipment. The most effective method for improving reliability, in particular, the probability of failure-free operation of process equipment that implements the movement of liquid and gaseous media, is to eliminate the causes of certain failures. The optimization of pumped hydrodynamic flows of slurry mixture applied to this class of equipment.*

Materials and/or methods. *Based on the operation experience and the analysis of the character of the localization of abrasive wear places on the working surfaces of plug valves, modeling of the hydrodynamic structure of flows in their working cavities was carried out for different modes with the velocity vectors measurement of the slurry mixture medium. The study based on the provisions of the classical mechanics of liquids and gases and implemented using the SolidWorks software.*

Results*. Revealed that the structure of the hydrodynamic flow of the slurry mixture consists of the zones of low, medium, high and intense speeds. The increase rate of abrasive wear of the edge of the valve plug is due to its closure, which leads to an increase in the volume of the zone of intense speeds. The optimal angle of the valve opening, when the abrasive wear caused by the incorrect structure of hydrodynamic flows completely excluded, should be considered the angle value within the range of 68-90°.*

Conclusion. *The research allows proper adjustment of power systems for pumping slurry mixtures with large diameter valves which failure associated with intense abrasive wear.*

Keywords: *stop valves, plug valve, slurry mixture, hydrodynamic flow structure.*

Сведения об авторах

А.Я. Бабанин
Author ID: 25928278900
Телефон: +380 (71) 358-59-50
Эл. почта: Bay1957@mail.ua

М.Ю. Ткачев
SPIN-код: 9855-0447
Author ID: 57189358257
ORCID iD: 0000-0001-5795-9595
Телефон: +380 (71) 334-92-61
Эл. почта: mishel-tkachev@ya.ru

В.В. Белоусов
Author ID: 25928177100
Телефон: +380 (50) 805-49-58
Эл. почта: v.v.bilousov@gmail.com

Статья поступила 21.03.2018 г.
© А.Я. Бабанин, М.Ю. Ткачев, В.В. Белоусов, 2018
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько

УДК 621.771.294

С.А. Снитко /к.т.н./, А.Л. Сотников /д.т.н./, А.В. Яковченко /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ШТАМПОВКЕ КОЛЕСНЫХ ЗАГОТОВОК

На основе результатов конечно-элементного моделирования выполнен анализ влияния схем штамповки колесных заготовок на износ инструмента деформации применительно к современным прессопрокатным линиям. Установлено, что схема деформирования металла в формовочных штампах, обеспечивающая заполнение гребня при осевом обжатии металла в зоне обода, снижает проскальзывание металла относительно поверхности формовочных штампов в местах перехода от диска к ободу. Дополнительное снижение износа в этом случае составляет 27-33 %.

Ключевые слова: *железнодорожное колесо, схема штамповки, колесная заготовка, формовочный пресс, штампы, износ.*

Постановка проблемы

Проблемы модернизации прессопрокатного оборудования [1-3 и др.], совершенствования применяемой технологии в части реализации рациональных силовых режимов работы и высокой стойкости деталей [4,5 и др.] являются актуальными научно-техническими задачами металлургической отрасли.

Анализ последних исследований и публикаций

При освоении новой прессопрокатной линии ОАО «Евраз НТМК» специалистами комбината было установлено, что, несмотря на высокое качество исходной заготовки, высокую степень автоматизации технологического процесса, разработанная фирмой SMS-EUMUCO технология штамповки колесных заготовок, не позволила получить стабильные размеры черновых колес при использовании исходных заготовок из непрерывнолитого металла собственного производства [6].

Разработка и внедрение на заготовочном прессе силой 50 МН (R5000) технологии осадки заготовок в верхнем плавающем технологическом кольце позволили стабилизировать наружный диаметр заготовок, повысить точность размеров колесных заготовок на формовочном прессе и снизить брак на прокате [6].

Вместе с тем эта технология не позволяет выполнять разгонку заготовок. Указанная операция является крайне необходимой при производстве многих типоразмеров колес и, в первую очередь, при штамповке заготовок колес диаметром 957 мм с плоскоконическим диском по ГОСТ 10791-2011, доля которых в годовом объеме производства обычно велика.

При штамповке на формовочном прессе силой 90 МН (R9000) колесных заготовок для колес диаметром 957 мм из осаженной на прессе R5000 заготовки без разгонки («плюшки») имеет место односторонняя схема течения металла из зоны диска в зону обода при повышенной силе штамповки. Причиной является наличие избыточного объема металла в центральной части заготовки, который преждевременно заполняет формовочные штампы в зоне ступицы.

В работах [7,8] предложены новые способы штамповки колесных заготовок, которые позволяют выполнять на прессе R5000 регламентированное распределение металла между центральной и периферийной частями заготовки, обеспечивают их самоцентровку на формовочном прессе R9000 и получение стабильных размеров колесных заготовок.

Наряду с получением требуемых параметров по геометрии, макро- и микроструктуре, а также механических свойств изделий [6-15 и др.] одним и важных критериев оценки эффективности применяемых схем деформирования является их влияние на силовой режим прессопрокатного оборудования и износостойкость деформирующего инструмента. В колесопрокатном производстве повышение указанной стойкости является актуальной задачей, так как именно она во многом определяет затраты, связанные с выбором марки стали для штампов, технологии их изготовления и технологической смазки [12,13].

Цель (задачи) исследования

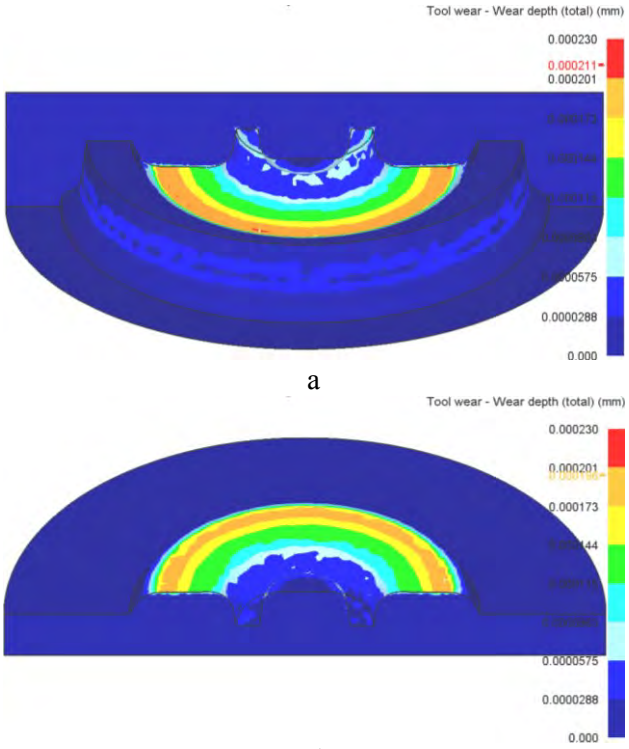
Целью настоящей работы является изучение влияния схем штамповки колесных заготовок на износ инструмента деформации формовочного пресса R9000.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Основной материал исследования

Анализ формоизменения металла, силовых параметров, а также износа штампов при формовке колесных заготовок на прессе R9000 был выполнен на основе результатов конечно-элементного моделирования процесса штамповки в системе DEFORM-3D. При этом решалась объемная задача для сектора, имеющего угол 90°. Штампы моделировали как недеформируемые объекты. В качестве материала для штампов использовали имеющуюся в библиотеке DFORM-3D штамповую сталь AISI-H-13 с соответствующими механическими и теплофизическими характеристиками, зависящими от температуры. Твердость материала штампов приняли независимой от температуры, равной 41HRC.

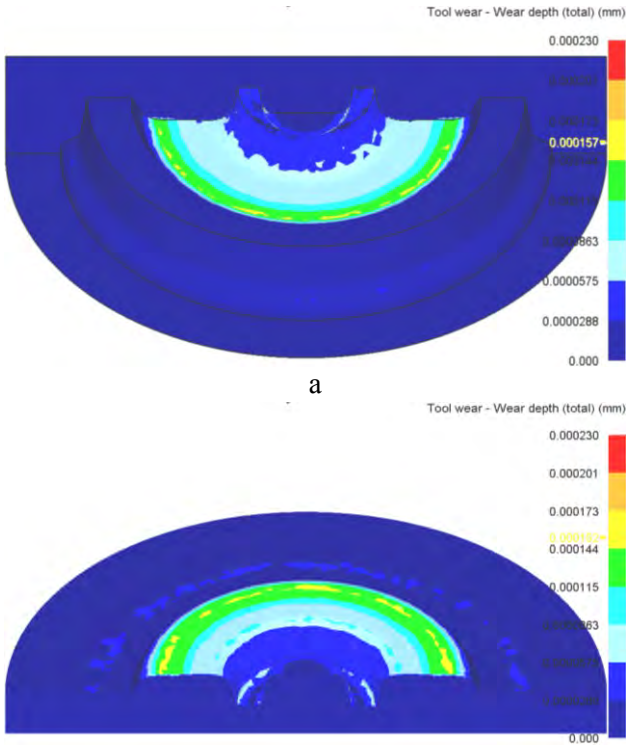
Для колесной заготовки использовали пластическую модель материала, кривые течения рассчитали для колесной стали марки 2 (ГОСТ 10791-2011) [16]. Используемые при моделировании теплофизические свойства колесной стали взяли из базы данных DEFORM-3D для высокоуглеродистой стали.



а

б

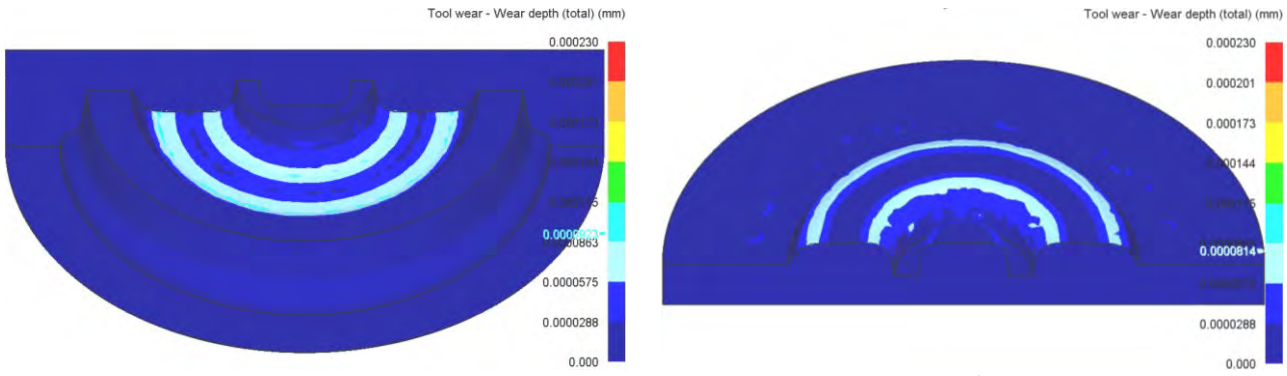
Рис. 1. Результаты моделирования износа штампов при штамповке колесной заготовки по схеме А:
а – верхний штамп;
б – нижний штамп



а

б

Рис. 2. Результаты моделирования износа штампов при штамповке колесной заготовки по схеме Б:
а – верхний штамп;
б – нижний штамп



а

б

Рис. 3. Результаты моделирования износа штампов при штамповке колесной заготовки по схеме В:
а – верхний штамп; *б* – нижний штамп

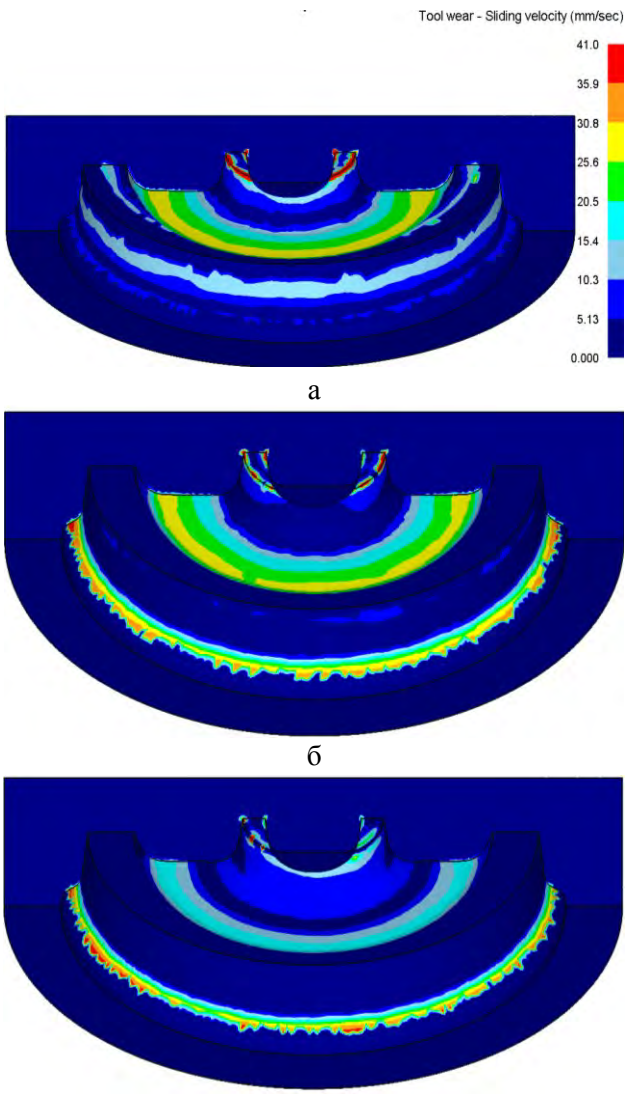
ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Начальную температуру штампов приняли равной 20 ºС. Заготовка перед штамповкой имела неравномерное температурное поле в диапазоне 1100-1260 ºС, полученное путем конечно-элементного моделирования транспортировки заготовки от нагревательной печи к прессу R5000 (с учетом гидросбива окалины с торцевых поверхностей заготовки), ее деформирования на прессе R5000 и транспортировки к прессу R9000. Используемые при моделировании значения скоростей рабочего хода траверс пресса были равны: 0,03 м/с – для пресса R5000, 0,01 м/с – для пресса R9000.

При сравнительной оценке различных схем штамповки колесных заготовок учитывали только абразивный износ. Для расчета износа (W) использовали модель Арчарда [14,15]:

$$W = \int_0^t K \frac{p^a \theta^b}{H^c} dt ,$$

где θ и p – соответственно скорость проскальзывания металла относительно инструмента и давление на контактной поверхности; K, a, b, c – эмпирические коэффициенты; H – твердость материала штампов; t – время протекания процесса. Значения эмпирических коэффициентов использовали следующие: $K=2\cdot10^{-6}$; $a=b=1$, $c=2$.

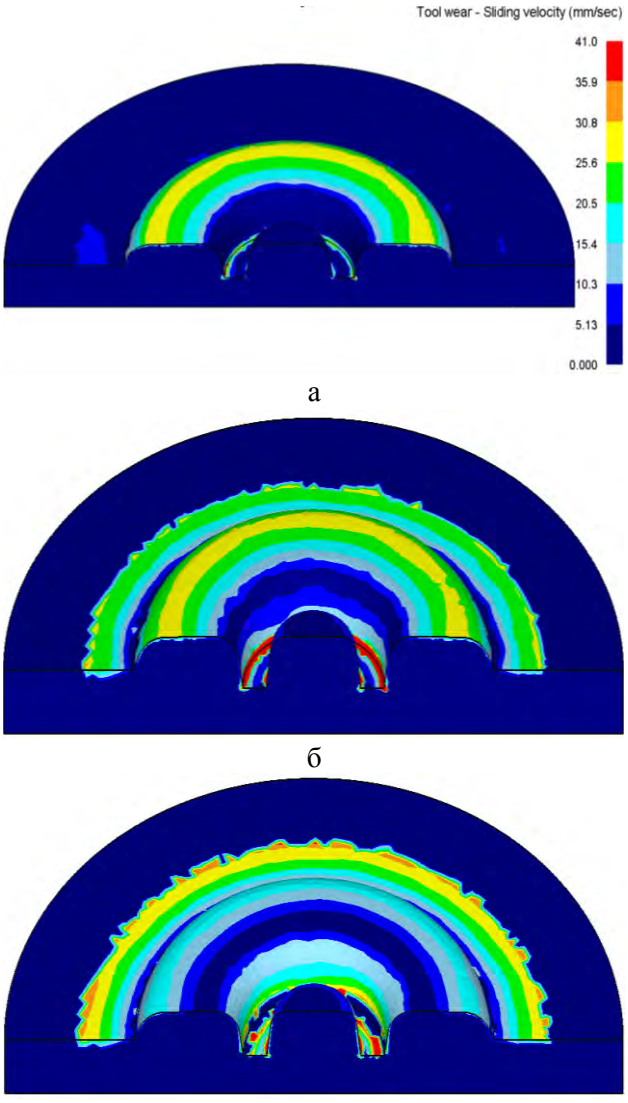


а

б

в

Рис. 4. Результаты моделирования скорости проскальзывания металла относительно верхнего инструмента деформации при штамповке колесной заготовки:
а – по схеме А; *б* – по схеме Б;
в – по схеме В



а

б

в

Рис. 5. Результаты моделирования скорости проскальзывания металла относительно нижнего инструмента деформации при штамповке колесной заготовки:
а – по схеме А; *б* – по схеме Б;
в – по схеме В

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В ходе исследования был выполнен анализ трех схем штамповки колесной заготовки для колес диаметром 957 мм с плоскоконическим диском по ГОСТ 10791-2011: А – схема штамповки колесной заготовки из «плюшки» [6] (используемая на прессопрокатной линии ОАО «Евраз НТМК»); Б – схема штамповки колесной заготовки [7] из заготовки с предварительно сформованными частями обода и ступицы с нижней стороны заготовки, которая предусматривает самоцентровку заготовки в формовочных штампах; В – схема штамповки колесной заготовки [8], предусматривающая самоцентровку заготовки в формовочном кольце.

Анализ результатов моделирования процесса износа инструмента деформации (рис. 1-3) позволил установить следующее. Исключение преждевременного заполнения ступицы (схема Б) и, соответственно, одностороннего течения металла на заключительной стадии штамповки способствует уменьшению средней (по верхнему и нижнему штампам) износа формовочных штампов на 20-24 %.

Как показали расчеты, наиболее существенным фактором, определяющим износ штампов, является проскальзывание деформируемого металла относительно поверхностей инструмента деформации (рис. 4, 5). По трем рассмотренным схемам получены близкие значения контактных давлений.

Установлено, что в процессе обжатия металла в области диска, чем раньше образуется подпор течению металла со стороны формовочного кольца, тем меньше проскальзывание деформируемого металла относительно поверхности формовочных штампов в зонах их наиболее интенсивного износа (переход от диска к ободу) (см. рис. 4, 5) и, как следствие, меньше износ. Как видно из рис. 4 и 5, для схем штамповки Б и В характерно наличие зон повышенного проскальзывания деформируемого металла по верхнему инструменту деформации в области сопряжения поверхности катания обода и гребня формуемой колесной заготовки и расположенной под ней плоской части нижнего инструмента деформации.

Вместе с тем указанные зоны наблюдаются непродолжительное время на заключительном этапе процесса штамповки (этапе формирования гребня) и не оказывают существенного влияния на суммарное значение износа, а также не приводят к образованию в них повышенного износа (см. рис. 2а, 3а).

Также установлено, что схема деформирования металла в формовочных штампах, обеспечивающая заполнение гребня при осевом обжатии металла в зоне обода (схема В), снижает проскальзывание деформируемого металла относительно поверхности формовочных штампов в местах перехода от диска к ободу (см. рис. 4, 5) и, в итоге, способствует уменьшению износа штампов (см. рис. 3). Дополнительное снижение износа при штамповке по схеме В составило 27-33 %.

Выводы

Исключение преждевременного заполнения ступицы и, соответственно, одностороннего течения металла на заключительной стадии штамповки колес способствует уменьшению среднего (по верхнему и нижнему штампам) значения износа формовочных штампов на 20-24 %. Установлено, что в процессе обжатия металла в области диска, чем раньше образуется подпор течению металла со стороны формовочного кольца, тем меньше проскальзывание деформируемого металла относительно поверхности формовочных штампов в зонах их наиболее интенсивного износа (перехода от диска к ободу) и, как следствие, меньше износ.

Также установлено, что схема деформирования металла в формовочных штампах, обеспечивающая заполнение гребня при осевом обжатии металла в зоне обода, снижает проскальзывание металла относительно поверхности формовочных штампов в местах перехода от диска к ободу и, в итоге, способствует уменьшению износа штампов. Дополнительное снижение износа в этом случае составляет 27-33 %.

Список литературы

1. Kushnarev, A.V. Modernization of Railroad Wheel Manufacturing Technology at Evraz NTMK / A.V. Kushnarev [et al.] // Metallurgist. – 2017. – No.60 (9-10). – P. 1080-1086.
2. Снитко, С.А. Взаимосвязь режимов прокатки с нагрузками и запасом прочности наклонных валков колесопрокатных станов горизонтального и вертикального типов / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, А.Л. Сотников // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – №3. – С. 14-29.
3. Снитко, С.А. Совершенствование технологии и оборудования в колесопрокатном производстве / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, А.Л. Сотников // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – №4. – С. 19-27.
4. Gorbatyuk, S.M. Method and equipment for mechanically strengthening the surface of rolling-mill rolls / S.M. Gorbatyuk, A.V. Kocha-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

nov. – Metallurgist. – 2012. – No.56(3-4). – P. 279-283.
5. Zakharov, A.N. Modernizing a press for making refractories / A.N. Zakharov, S.M. Gorbatyuk, V.G. Borisevich. – Metallurgist. – 2008. – No.52(7-8). – P. 420-423.
6. Кушнарев, А.В. Разработка научных основ и внедрение современной технологии производства железнодорожных колес с высокими эксплуатационными характеристиками // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: сб. науч. трудов Екатеринбургского ун-та. – Екатеринбург: унив. тип. «Альфа Принт», 2012. – С. 626-637.
7. Снитко, С.А. Механизм исправления асимметрии при штамповке колесных заготовок / С.А. Снитко, А.В. Яковченко // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. ДГМА. – Краматорск: ДГМА, 2012. – №4(33). – С. 95-99.
8. Снитко, С.А. Технологические схемы и механизмы, обеспечивающие повышение точности и стабильности размеров штампованных колесных заготовок // Сталь. – 2013. – №10. – С. 72-80.
9. Solomonov, K.N. Application of CAD/CAM Systems for Computer Simulation of Metal Forming Processes // Materials Science Forum. – 2012. – Vol.704-705. – P. 434-439.
10. Larin, S.N. Approach to assessment of microdamages accumulated during the constrained molding of shells made of the material subject to energy theory of creep and damage / S.N. Larin, V.I. Platonov, K.N. Solomonov // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2017. – Vol.52. No.4. – P. 679-684.
11. Данченко, В.Н. Исследование напряженнного состояния формовочных штампов и условий контактного трения с помощью компьютерного моделирования при штамповке заготовок железнодорожных колес / В.Н. Данченко и др. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2012. – №46(952). – С. 28-32.
12. Кушнарев, А.В. Стойкость штампового инструмента при изготовлении железнодорожных колес / А.В. Кушнарев, и др. // Производство проката. – 2015. – №5. – С. 46-48.
13. Бобырь, С.В. Влияние химического состава и типа поверхностных дефектов на стойкость штампов пресса 10000 тонн из низколегированных сталей / С.В. Бобырь и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – №1. – С. 65-69.
14. Дыя, Х. Теоретический анализ износа калибров в процессе прокатки круглых прутков / Х. Дыя, М. Сыгут // Вестник МГТУ им. Г.Н. Носова. – 2013. – №3. – С. 41-47.
15. Рычков, С.С. Моделирование износа валков методом конечных элементов при прокатке в калибрах простой формы / С.С. Рычков, Д.И. Кинзин // Калибровочное бюро. – 2013. – Вып.1. – С. 29-42.
16. Snitko, S. Features Finite-Element Modeling of the Deformation Exact Mass / S. Snitko, A. Duzhurzhi // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2012. – Vol.9. No.9. – P. 1505-1510.

S.A. Snitko /Cand. Sci. (Eng.)/, A.L. Sotnikov /Dr. Sci. (Eng.)/, A.V. Yakovchenko /(Dr. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE WEAR OF A DEFORMATION TOOL AT STAMPING WHEEL BLANKS

Background. *Ensuring rational power modes of presses and high durability of the metal deformation tool parts are relevant scientific and technical tasks. The tool durability largely determines the costs associated with the choice of steel grades for dies, their manufacturing technique, and process lubrication.*

Materials and/or methods. *The analysis of the influence of the wheel blanks stamping schemes on the main power modes of a forming press and the wear of the deformation tool in relation to modern press-rolling lines made on the basis of the results of finite-element modeling.*

Results. *Shown that the stamping schemes ensuring a regulated distribution of metal between the central and peripheral parts of the fed billet into the dies, characterized by a rational power mode of the forming press. The elimination of premature filling of the hub contributes to the wear of molding dies reduction by 20-24 %. Established that in the process of metal compression in the disk area, the earlier the resistance to metal flow formed from the forming ring, the less is the slippage of the deformable metal relative to the surface of the forming dies and, as a consequence, less is the wear.*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Conclusion. *The deformation scheme of metal in the molding dies ensuring filling of the flange under axial compression of metal in the rim zone reduces the slippage of the metal relative to the surface of the molding dies in the zones of transition from the disk to the rim. The additional decrease in wear is 27-33 %.*

Keywords: *railway wheel, stamping scheme, wheel blank, forming press, dies, wear.*

Сведения об авторах

С.А. Снитко
SPIN-код: 8463-3786
Author ID: 844696
Телефон: +380 (50) 473-14-52
Эл. почта: snitko_sa@mail.ru

А.В. Яковченко
SPIN-код: 1314-1795
Author ID: 850425
Телефон: +380 (50) 995-10-47
Эл. почта: mond1991@mail.ru

А.Л. Сотников
SPIN-код: 5203-7480
Author ID: 623331
Researcher ID: P-4344-2015
ORCID iD: 0000-0002-4537-858X
Телефон: +380 (71) 301-98-70
Эл. почта: 0713019870@mail.ru

Статья поступила 23.04.2018 г.
© С.А. Снитко, А.Л. Сотников, А.В. Яковченко, 2018
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 622.232.72

Н.М. Лысенко /к.т.н./, Е.Ю. Степаненко /к.т.н./, А.В. Гудинов
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

УСТАНОВЛЕНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА, ВСТРАИВАЕМОГО В ПОДСИСТЕМУ ПРИВОДА ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ

Приведена методика расчета диссипативных характеристик перспективного виброзащитного устройства (ВЗУ) зубчато-пружинного типа, встраиваемого в кинематическую цепь редуктора подсистемы привода исполнительных органов очистного комбайна. На основании данной методики конструктор на стадии проектирования рассматриваемого ВЗУ может довольно обоснованно выбирать основные его конструктивные параметры, обеспечивающие в конечном итоге достаточно высокую эффективность функционирования последнего с позиции максимально возможного снижения уровня динамической нагруженности силовых элементов редуктора подсистемы привода исполнительных органов очистного комбайна.

Ключевые слова: *очистной комбайн, виброзащитное устройство, методика расчета диссипативных характеристик.*

Постановка проблемы

В связи с высокой потребностью в угле и необходимостью снижения его себестоимости в ряде соответствующих постановлений и программ, а также тематических публикаций ведущих ученых [1-5 и др.], подчеркивается актуальность решения, в первую очередь, проблемы радикального повышения эффективности угледобычи на основе концентрации очистных работ и их интенсификации за счет применения современных очистных комплексов высокого технического уровня. Все вышесказанное в полной мере относится и к возрождающейся угольной промышленности Донецкой Народной Республики и является актуальной, жизненно важной проблемой, которую необходимо будет решать в ближайшем будущем соответствующему отраслевому министерству республики.

Следует считать весьма целесообразными и актуальными перспективные разработки и целенаправленные решения отдельных технических, инженерных локальных задач, которые в перспективе в своей совокупности будут способствовать решению комплексных задач в рамках отмеченной проблемы – создания и внедрения современного высокопроизводительного и надежного горно-шахтного оборудования.

Анализ последних исследований и публикаций

Одной из базовых машин современного очистного комплекса является очистной комбайн, конструкция и параметры которого играют определяющую роль в плане обеспечения высокопроизводительной работы всего комплекса. К числу интегральных показателей назначения очистного комбайна, характеризующих его технический уровень и конкурентоспособность, в первую очередь, принадлежит производительность, которая, как известно, тесно связана с уровнем его энерговооруженности. Увеличение энерговооруженности, как правило, способствует повышению производительности машины. Поэтому вполне закономерно, что в разработанной ИГД им. Скочинского и Гипроуглемашем (ведущими научным и проектно-конструкторским институтами угольной промышленности бывшего СССР) концепции развития комбайновой выемки и конвейерной доставки в очистных забоях на период еще до 2000 года была поставлена задача повышения ресурса очистных комбайнов в 1,5-2 раза, увеличения их производительности на 30-40 %, создания приводных электродвигателей мощностью до 400 кВт, повышения межремонтного ресурса исполнительных органов в 3-5 раз.

Высокие требования, предъявляемые к техническому уровню современных очистных комбайнов, при наличии жестких ограничений габаритных размеров последних, увеличении удельного веса вынимаемых угольных пластов с крепкими прослойками, твердыми включениями и присечками вмещающих пород, делают весьма актуальными разработки, способствующие повышению надежности рассматриваемых машин на основе их оптимального проектиро-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

вания как сложных динамических систем [6].

Вместе с тем, до настоящего времени в отрасли угольного комбайностроения сохраняется такое положение, когда при создании и совершенствовании выемочных комбайнов весьма мало внимания уделяется структурно-параметрической оптимизации данных машин на основе их динамического анализа и синтеза. Существующие методики прогнозирования исходных данных для прочностных расчетов и выбора рациональных параметров силовых подсистем очистных машин далеко не всегда соответствуют современному уровню, часто базируются на статическом детерминированном подходе. В отличие от станкостроения, судостроения и ряда других отраслей машиностроения при создании комбайнов не используются в полной мере уже имеющиеся разработки по виброзащитным устройствам. Поэтому необходимы дальнейшие практические разработки и теоретические исследования с целью создания пакета эффективных ВЗУ, обеспечивающих существенное снижение уровней динамической нагруженности силовых подсистем различных очистных машин.

В результате выполненных на кафедре «Горные машины» ДонНТУ на протяжении более двух десятилетий целого комплекса научно-исследовательских работ по установлению закономерностей формирования динамических нагрузок в силовых подсистемах целого ряда очистных комбайнов (ОК), как с цепной (гибкой), так и бесцепной (жесткой) системой подачи, и разработке средств и способов их снижения с целью повышения надежности, а, следовательно, и производительности этих комбайнов установлена целесообразность целенаправленного изменения динамических свойств основных силовых подсистем исследованных очистных машин путем введения в их структуру специальных корректирующих динамических звеньев в виде ВЗУ.

Применительно к подсистемам привода исполнительных органов (ПИО) очистных комбайнов прежних и новых поколений в качестве практического выхода выполненных НИР разработан ряд ВЗУ, в т.ч. устройств конструкции ДонНТУ и ЗАО «Горловский машиностроитель» [7,8,9 и др.].

Следует отметить, что при разработке указанных виброзащитных устройств конструктор должен, кроме установления рациональных прочностных свойств и приемлемых габаритных размеров их основных конструктивных параметров, также располагать соответствующей методикой, позволяющей уже на стадии проектирования рассчитывать достоверные значения упруго-диссипативных характеристик данных ВЗУ.

Таким образом, разработка методики установления достоверных значений упруго-диссипативных характеристик ВЗУ, встраиваемых в силовые подсистемы современных высоко энерговооруженных выемочных комбайнов с целью оптимизации их динамических свойств, является актуальной научно-практической задачей.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является разработка методики расчета диссипативных характеристик перспективного виброзащитного устройства зубчато-пружинного типа, встраиваемого в кинематическую цепь редуктора подсистемы привода исполнительных органов очистного комбайна.

Основной материал исследования

При решении поставленной задачи в качестве объекта исследования будем рассматривать перспективное, на наш взгляд, ВЗУ зубчато-пружинного типа на основе винтовых геликоидальных зубьев, встраиваемое в кинематическую цепь редуктора подсистемы ПИО [10], принципиальная конструктивная схема которого приведена на рис. 1. Здесь необходимо отметить, что данная конструктивная схема была проработана применительно к подсистеме ПИО высоко энерговооруженного очистного комбайна нового поколения типа КДК500 (адаптирована к конструкции третьего вала редуктора подсистемы ПИО, с сохранением функции разъединительной муфты, располагающейся на данном валу серийного комбайна).

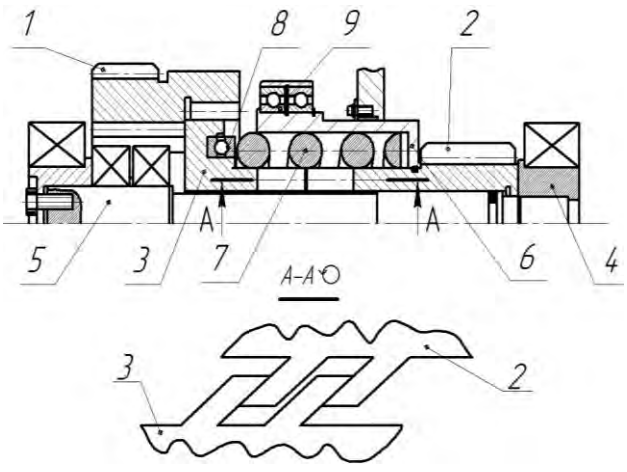


Рис. 1. Конструктивная схема ВЗУ зубчато-пружинного типа

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ВЗУ состоит из оси 5, на которой размещена шестерня 2, связанная винтовыми геликоидальными зубьями с втулкой 3. Последняя, с помощью эвольвентного шлицевого соединения (m=8 мм, z=28) сопрягается с колесом 1 и может перемещаться относительно этого колеса в осевом направлении. На цилиндрическом конце шестерни 2 с помощью штифта (условно не показан) жестко закреплен стакан 6. Между деталями 6 и 3 помещаются цилиндрическая пружина 7 и упорный шариковый подшипник 8. Соединение или рассоединение кинематической цепи осуществляется механизмом переключения 9 (на рис. 1 показан только фрагмент этого механизма) путем перемещения жестко соединенных деталей 6 и 2 соответственно влево или вправо.

При соединенной кинематической цепи вращающий момент от колеса 1 передается шлицевой втулке 3 и далее, с помощью винтовых зубьев, – шестерне 2. При соответствующем направлении вращения колеса 1 втулка 3 при увеличении вращающего момента под воздействием усилий, возникающих в винтовом сопряжении, будет перемещаться по направлению к шестерне 2, сжимая пружину 7, а при его снижении – в противоположном направлении. При перемещении втулки 3 формируется демпфирующий момент за счет сил трения в имеющихся парах трения, что обеспечивает снижение динамических нагрузок.

В качестве возможного диссипативного параметра виброзащитного устройства будем рассматривать относительное демпфирование ψ_y, безразмерная величина которого, в соответствии с теорией колебаний линейных динамических систем [11], может быть получена из следующей зависимости:

$$\psi_y = \frac{\delta_y}{2\pi}, \qquad (1)$$

где δ_y – логарифмический декремент колебаний.

Для дальнейших теоретических выкладок воспользуемся известной зависимостью:

$$\xi_y = e^{\delta_y} - e^{-\delta_y}, \qquad (2)$$

где ξ_y – коэффициент поглощения, определяемый как отношение энергии ΔW, рассеиваемой ВЗУ за один период гармонического колебания, к упругой энергии W.

В качестве допущения предполагаем, что в ВЗУ формируется трение рессорного типа. Такой вид трения установлен в результате исследований ВЗУ других типов с подобной физической природой трения [12].

Для вычисления коэффициента поглощения рассмотрим идеализированную упруго-диссипативную характеристику ВЗУ (рис. 2), которая, как показано в вышеуказанных работах ДонНТУ, достаточно корректно отражает работу устройства рассматриваемого типа при динамическом характере изменения крутящего момента M в подсистеме привода исполнительного органа.

Здесь $M_з$, M_a и $\varphi_з$, φ_a – соответственно моменты и углы: при запирании ВЗУ (индекс «з») и соответствующие их амплитудные значения (индекс «а»).

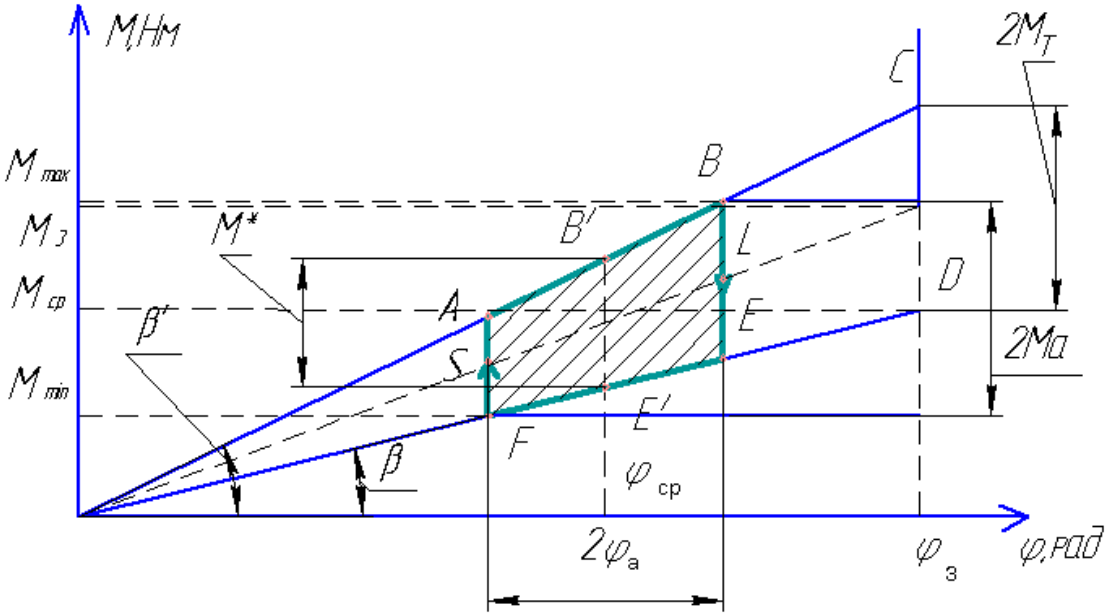


Рис. 2. График зависимости момента M, передаваемого устройством, от угла φ – относительного смещения шестерни 2 и втулки 3

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Из рис. 2 видно, что энергия ΔW численно равна площади заштрихованной трапеции *ABEF*. При этом в первом приближении считаем, что *AS=SF* и *BL=LE*. Значение площади определяется как произведение основания трапеции на ее высоту, т.е. $\Delta W=M^*\cdot 2\cdot\varphi_a$.

Из подобия треугольников *OB'E'* и *OCD* следует, что

$$\frac{2M_T}{\varphi_з}=\frac{M^*}{\varphi_{ср}}.$$

$$\text{Тогда } \Delta W=\frac{4M_T\cdot\varphi_{ср}\cdot\varphi_a}{\varphi_з},\ \text{Нм}. \qquad (4)$$

Значение упругой энергии W определяется по зависимости:

$$W=\frac{\varphi_a^2}{2e_y},\ \text{Нм}, \qquad (5)$$

где e_y – податливость ВЗУ.

Подставляя вышеприведенные выражения (4) и (5) соответственно для ΔW и W, получаем следующее уравнение для коэффициента поглощения:

$$\xi_y=\frac{\Delta W}{W}=\frac{8M_T\cdot\varphi_{ср}\cdot e_y}{\varphi_a\cdot\varphi_з}. \qquad (6)$$

Основываясь на целом ряде геометрических соотношений, вытекающих из рис. 2, между параметрами, входящими в выражение (6), и с учетом того, что:

$$M_a=r_b\cdot\sigma_м,\quad \frac{\sigma_м}{M_{ср}}=\upsilon,\quad \frac{\varphi_з}{M_з}=e_y,\quad \frac{M_T}{M_з}=K_T.$$

После ряда преобразований получим следующее финишное выражение для определения относительного демпфирования ψ_y в безразмерных параметрах:

$$\psi_y=\frac{\delta_y}{2\pi}=\frac{\ln\left(0{,}5\left(\xi_y+\sqrt{\xi_y{}^2+4}\right)\right)}{2\pi}=$$
$$=\frac{1}{2\pi}\ln\left(4\left(\frac{r_в\upsilon\left(1-K_T^2\right)}{r_в\upsilon-K_T}-1\right)+\sqrt{16\left(\frac{r_в\upsilon\left(1-K_T^2\right)}{r_в\upsilon-K_T}-1\right)^2+1}\right), \qquad (7)$$

где $r_в$ – вероятностный коэффициент, характеризующий вид случайного процесса M; σ_M – среднеквадратическое отклонение процесса M; υ – коэффициент вариации случайного процесса M; K_T – относительный момент трения в ВЗУ.

Таким образом, полученная в результате достаточно обширных теоретических выкладок и соответствующих преобразований зависимость (7) позволяет рассчитать численное значение безразмерной величины относительного демпфирования ψ_y ВЗУ, являющейся одной из диссипативных его характеристик. Однако при этом следует констатировать, что указанная характеристика, являясь, по сути, косвенной количественной оценкой демпфирующих свойств ВЗУ, вместе с тем не обладает с точки зрения конструктора достаточной информативностью для выбора или необходимой целенаправленной корректировки конкретных его конструктивных параметров на стадии проектирования данного устройства. Необходимой информативностью (практической ценностью) для конструктора может обладать зависимость (формула) для расчета величины относительного момента трения K_T в ВЗУ, которая, наряду с безразмерной величиной относительного демпфирования ψ_y, также является оценкой демпфирующих свойств рассматриваемого ВЗУ.

Для вывода зависимости, позволяющей на стадии проектирования рассчитывать величину относительного момента трения K_T в ВЗУ, воспользуемся энергетическим методом. Для этого сообщим элементарное относительное смещение $\Delta\varphi$ втулки 3 и шестерни 2 и проанализируем баланс сил, приложенных к основным элементам ВЗУ (рис. 3).

Найдем силы, действующие на втулку 3 и шестерню 2 ВЗУ. При этом потерями на трение в подшипниках качения и инерционными свойствами колеблющихся в осевом направлении элементов ВЗУ в первом приближении пренебрегаем. Поскольку шестерня 2 при включении устройства жестко связана с осью 5, то при работе ВЗУ тело 2 и тело 5 представляют единое целое.

При наличии на шестерне 2 момента сопротивления $M_2=F_{\tau 2}\cdot R_{\tau 2}$ на колесе 1 формируется противоположно направленный вращающий момент $M_1=F_{\tau 1}\cdot R_{\tau 1}=F_{\tau 3}\cdot R_{\tau 3}$, где F_τ и R_τ – соответственно окружное усилие в зацеплении и радиус его приложения.

На рис. 3 также обозначены $F_{ш3}$ – сила трения в шлицевом соединении, действующая на втулку 3; R – средний радиус винтовых геликоидальных зубьев; β – угол наклона винтовых геликоидальных зубьев; $F_{Пi}$ – сила сжатия пружины;

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

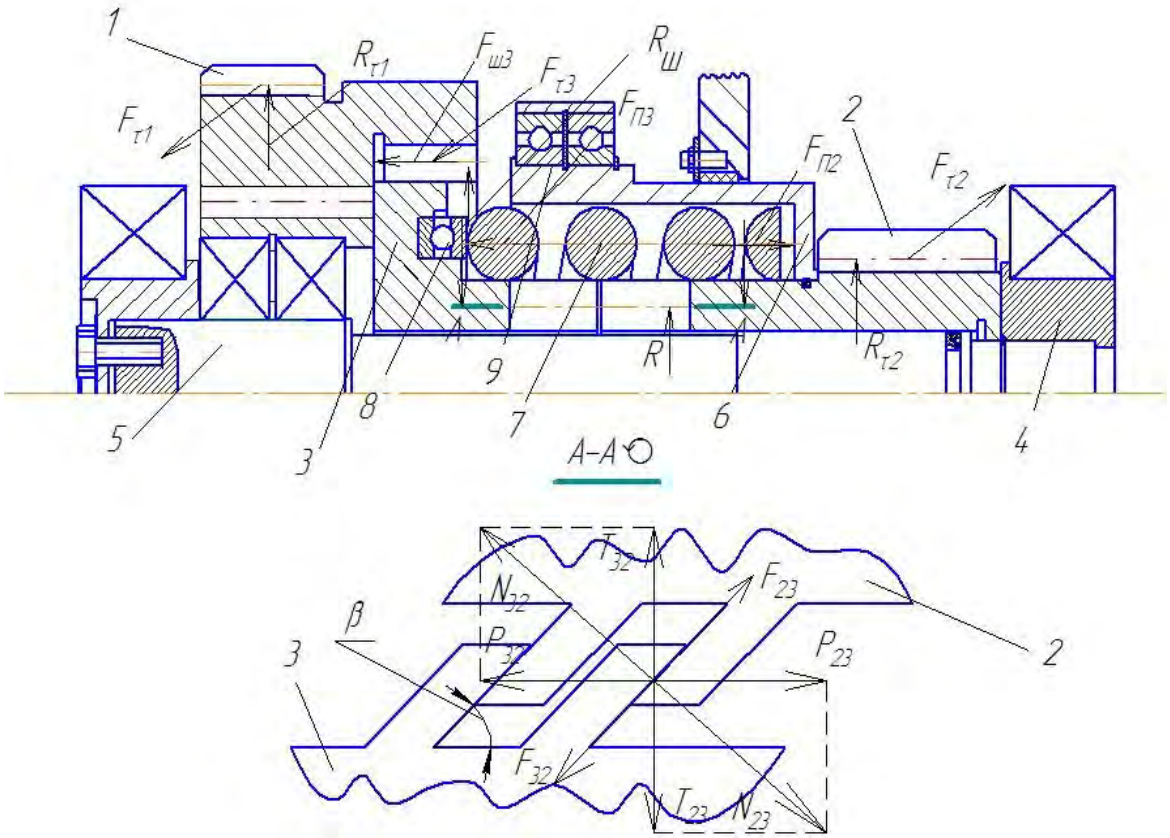


Рис. 3. Расчетная схема усилий, действующих на элементы ВЗУ

N_{ij}, P_{ij}, T_{ij}, F_{ij}, – соответственно нормальное, окружное, осевое усилия и сила трения, действующие в винтовом геликоидальном сопряжении. Здесь i – номер элемента, на который действует усилие; j – номер элемента, со стороны которого действует усилие.

Рассматривая отдельные элементы ВЗУ в равновесии, можно получить следующую систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &-F_{\tau 2}\cdot R_{\tau 2}+\Theta\cdot f_3\cdot P\cdot \mathrm{ctg}\beta\cdot R+P\cdot R=0,\\ &-P\cdot R+M_1-\Theta\cdot f_3\cdot P\cdot \mathrm{ctg}\beta\cdot R=0,\\ &P\cdot \mathrm{ctg}\beta-F_{П}-\Theta\cdot\left(f_3\cdot P+\frac{f_ш\cdot M_1}{R_ш}\right)=0 \end{aligned}\right\},$$

где $\Theta=\dfrac{dM_1}{dt}\left|\dfrac{dM_1}{dt}\right|^{-1}$ – показатель, отражающий характер рессорного трения и учитывающий направление движения втулки 3; Θ=+1 – при движении по направлению к втулке 2, и Θ=–1 – в противоположном направлении; f_3, $f_\varnothing$ – коэффициенты трения соответственно в винтовом геликоидальном и шлицевом соединениях; $R_ш$ – средний радиус шлицевого соединения; β – угол наклона винтовых геликоидальных зубьев (см. рис. 3).

Опуская ряд дальнейших выкладок и преобразований, достаточно подробно изложенных в работе [13], приведем окончательную зависимость для расчета оценочного значения относительного момента трения рассматриваемого ВЗУ:

$$K_T=\frac{A_{TP}}{\Delta\varphi\cdot M_1}=\frac{1}{M_1}\times$$
$$\times\left(\frac{f_ш\cdot \mathrm{tg}\beta\cdot R}{R_ш}+\frac{f_з}{\cos\beta\cdot\sin\beta\cdot\left(\Theta\cdot f_з\cdot \mathrm{ctg}\beta+1\right)}\right). \quad (8)$$

Как следует из приведенной зависимости, численное значение величины относительного момента трения в ВЗУ наряду с величинами коэффициентов трения в винтовом геликоидальном f_3 и шлицевом $f_ш$ соединениях также будет непосредственно определяться следующими конструктивными параметрами входящих в него элементов (см. рис. 3): $R_ш$ – величиной среднего радиуса шлицевого соединения зубчатого колеса 1 с втулкой 3; R – величиной среднего радиуса винтового геликоидального соединения втулки 3 с шестерней 2; β – углом наклона винтовых ге-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ликоидальных зубьев.

При этом возможное скачкообразное изменение величины K_T при движении втулки 3 по направлению к шестерне 2 и в обратном направлении обусловлено спецификой трения рессорного типа в ВЗУ.

В соответствии с рекомендациями известной работы [14] коэффициент трения для взаимно перемещающихся стальных поверхностей рекомендуется принимать: при их работе в масляной ванне: f=0,04, при слабой смазке: f=0,10. Представляется достаточно корректным применительно к рассматриваемому конструктивному исполнению ВЗУ в составе редуктора подсистемы привода очистного комбайна принять $f_з=f_ш$=0,04, так как шлицевое соединение и винтовая зубчатая передача характеризуются сходными условиями функционирования (находятся в одной масляной ванне редуктора). При выборе численных значений трех остальных вышеуказанных конструктивных параметров соответствующих деталей, входящих в состав ВЗУ, следует руководствоваться следующими соображениями:

– при установлении численных значений $R_ш$ и R, прежде всего, необходимо исходить из возможности вписываемости данных конструктивных элементов ВЗУ в габаритные размеры модернизируемого узла (в рассматриваемом случае второго вала) редуктора серийного комбайна (при условии обеспечения требуемых прочностных характеристик последних);

– при выборе численного значения β необходимо руководствоваться рациональной областью значений угла наклона винтовых поверхностей зубьев с позиции диссипативных свойств ВЗУ, зависящих от длительности этапов относительного застоя сопрягаемых его элементов (участки FA и BE на характеристике устройства $M=M(\varphi)$, см. рис. 2), в течение которых не происходит рассеивание энергии колебаний крутящего момента, воспринимаемого силовыми элементами редуктора подсистемы ПИО очистного комбайна.

Для установления рациональной с позиции диссипативных свойств рассматриваемого ВЗУ области значений угла наклона винтовых поверхностей зубьев сопрягаемых его элементов (втулки 3 и шестерни 2), рассчитаем значения относительного момента трения K_T в функции от угла β, задавшись предварительно из конструктивных соображений следующими параметрами винтового геликоидального и шлицевого соединений между его элементами: R=42 мм и $R_ш$=112 мм. Результаты данных расчетов с целью наглядности представлены в виде рис. 4.

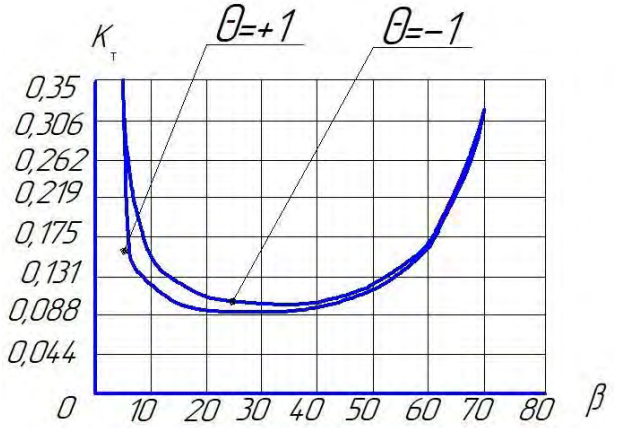


Рис. 4. График зависимости K_T от β

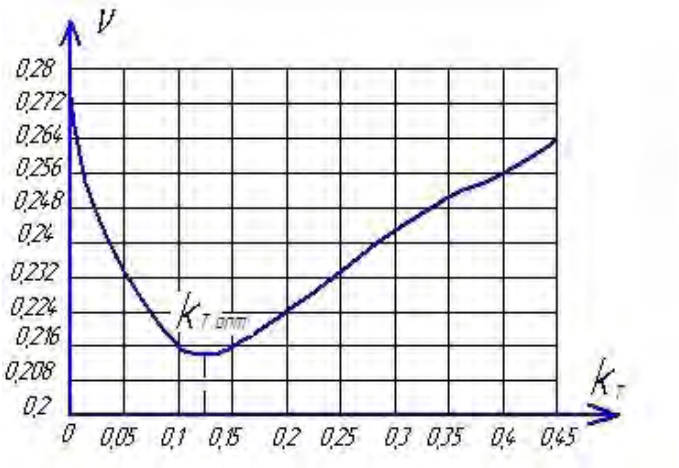


Рис. 5. График зависимости коэффициента вариации нагрузок υ в механической части (редукторе) подсистемы ПИО от параметра K_T

Для установления рациональной области значений β воспользуемся на качественном уровне результатами исследований (рис. 5), выполненных в работе [15] на основе имитационного моделирования применительно к конструкции ВЗУ с трением рессорного типа, которое в известной степени по структурно-параметрическим решениям аналогично рассматриваемому в настоящей работе ВЗУ.

Такой характер изменения υ объясняется тем, что с увеличением K_T от нуля до $K_{T.опт}$ происходит снижение динамичности нагрузок за счет более интенсивного рассеивания энергии колебаний, однако дальнейшее повышение K_T приводит к преобладанию этапов относительного застоя сопрягаемых элементов устройства [12], что, в свою очередь, приводит к росту υ.

С учетом сказанного выше рациональными значениями для угла β можно считать область от β=30° до β=60°, что соответствует значениям относительного момента трения в ВЗУ K_T=0,095-0,121.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Следует подчеркнуть, что при этом для обеспечения сравнительно низких значений K_T должно быть реализовано соответственно допускаемое конструктивными возможностями увеличение параметра $R_ш$ и уменьшение параметра R, а также такие условия функционирования сопрягаемых элементов ВЗУ, при которых величина коэффициента трения для взаимно перемещающихся стальных поверхностей данных элементов может составить всего 0,04.

Выводы

1. В соответствии с поставленной задачей разработана методика расчета диссипативных характеристик перспективного виброзащитного устройства зубчато-пружинного типа, встраиваемого в кинематическую цепь редуктора подсистемы привода исполнительных органов очистного комбайна.

2. С использованием известного математического аппарата теории колебаний линейных динамических систем, на основе рассмотренной идеализированной упруго-диссипативной характеристики ВЗУ, достаточно корректно отражающей работу сил рессорного трения, составляющих физическую основу демпфирующих свойств устройств данного типа при динамическом характере изменения внешней нагрузки, получена аналитическая зависимость, позволяющая рассчитать численное значение безразмерной величины относительного демпфирования ВЗУ.

3. Однако безразмерная величина относительного демпфирования, являясь, по сути, косвенной количественной оценкой демпфирующих свойств ВЗУ, вместе с тем не обладает с точки зрения конструктора достаточной информативностью для выбора или необходимой целенаправленной корректировки конкретных его конструктивных параметров на стадии проектирования данного устройства.

4. Необходимой информативностью (практической ценностью) для конструктора обладает зависимость для расчета величины относительного момента сил трения K_T в ВЗУ, при выводе которой был использован энергетический метод применительно к сформированному балансу внутренних сил, действующих на основные элементы рассматриваемого ВЗУ.

5. Основные теоретические результаты разработанной методики могут быть использованы как минимум при постановке и проведении имитационных вычислительных экспериментов для установления закономерностей формирования динамических процессов в подсистеме привода исполнительных органов очистных комбайнов при наличии в ее структуре корректирующих динамических звеньев в виде соответствующих виброзащитных устройств, в том числе и рассматриваемого типа, и как максимум – при выборе рациональных параметров ВЗУ на стадии проектирования его экспериментального образца.

Список литературы

1. Косарев, В.В. Новая горная техника ГП «Донгипроуглемаш» для подземной добычи угля // Сб. научных трудов ГП «Донгипроуглемаш». – Донецк: АСТРО, 2008. – С. 37-61.
2. Galvin, J.M. Ground Engineering: Principles and Practices for Underground Coal Mining / J.M. Galvin. – Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 693 p.
3. Ященко, Ю.П. Научно-технические решения по развитию угольных шахт Украины / Ю.П. Ященко, И.В. Косарев. – Киев: Логос, 2014. – С. 105-138.
4. Bilgin, N. Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries / N. Bilgin, H. Copur, C. Balci. – Boca Raton, Florida: CRC Press, 2013. – 378 p.
5. Singh, R.D. Principles and Practices of Modern Coal Mining / R.D. Singh. – New Delhi: New Age International, 2005. – P. 341-362.
6. Гуляев, В.Г. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. Ч.1. Выемочные комбайны. (Теория рабочих процессов и методы повышения надежности): Учеб. пособие. – Донецк: ДонНТУ, Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2011. – 322 с.
7. Горные машины для подземной добычи угля / П.А. Горбатов [и др.]. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – 669 с.
8. Разработать и внедрить средства повышения надежности и долговечности очистных комбайнов: отчет № ГР 01860040654; инв. № 0290.0001557 / В.Г. Гуляев, П.А. Горбатов. – Донецк: Донецк. политехн. ин-т, 1989. – 387 с.
9. А.с. 950909 (СССР), МКИ Е21С25/04. Исполнительный орган горной машины / Г.В. Малеев [и др.]; Донецкий политехнический институт; Горловский машзавод им. С.М. Кирова (СССР); заявл. 8.01.1981; опубл. 15.08.1982. Бюл.№30.
10. Декларационный патент на полезную модель «Привод горного комбайна» № 40872/ П.А. Горбатов [и др.]; заявл. 05.12.2008; опубл. 28.04.2009. Бюл.№8.
11. Бекшаев, С.Я. Основы теории колебаний: учебное пособие / С.Я. Бекшаев, В.М. Фомин. – Одесса: Одесская гос. академия строительства и архитектуры, 2013. – 103 с.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

12. Горбатов, П.А. Теория функционирования и совершенствования очистных комбайнов как нелинейных динамических систем: автореф. дис. … докт. техн. наук: специальность 05.05.06 / Горбатов Павел Анатольевич. – Донецк: ДонГТУ, 1991. – 35 с.
13. Разработка теории функционирования и методов оптимального проектирования для выемочных комбайнов нового поколения: отчет №ГР0106U002278, инв. №00009520 / П.А. Горбатов. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 434 с.
14. Крагельский, И.В. Коэффициенты трения: Справочное пособие. Изд. 2-е / И.В. Крагельский, И.Э. Виноградова. – М.: Машгиз, 1962. – 212 с.
15. Горбатов, П.А. Проектирование виброзащитно-отключающего устройства для подсистем приводов выемочных машин / П.А. Горбатов, Е.А. Воробьев, Н.И. Некрасова // Инженер. – 2003. – №4. – С. 110-112.

N.M. Lysenko /Cand. Sci. (Eng.)/, E.Yu. Stepanenko /Cand. Sci. (Eng.)/, A.V. Gudinov
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE DETERMINATION OF DISSIPATIVE CHARACTERISTICS OF THE VIBRATION PROTECTION DEVICE EMBEDDED IN A SUBSYSTEM OF THE SHEARER WORKING BODY DRIVE

Background. *When designing modern mining machines, including shearers, of a high technical level, along with a number of aspects of the progressive design concept, the problem of structural and parametric optimization of the dynamic properties of the heavily loaded power sub-systems should be solved on the basis of the introduction into their structure of the last various vibration protection devices with rational dynamic parameters and characteristics which act as a kind of "dynamic interfaces" as, for example, in shipbuilding, aviation, automotive and machine tool industry.*
Materials and/or methods. *When solving the tasks set used the analytical method based on repeatedly tested calculations of the classical theory of oscillations of linear dynamic systems, and the mathematical description of physical processes of vibration energy dispersion in the form of a balance of elastic and spring forces in the vibration protection device of the considered type with the dynamic nature of the torque change in the elastic reducer shaft line of the subsystem of the shearers working bodies drive.*
Results. *The technique for determination of dissipative parameters of a vibration protection device of a spring-toothed type developed on the basis of energy approach to its idealized elastic-dissipative characteristics, which quite correctly reflects the work of the considered type device. Derived the dependence for value calculation of the relative moment of friction forces in the vibration protection device, in which a number of its main design parameters appears.*
Conclusion. *The theoretical results of the developed technique are of an undoubted practical value since on their basis the designer consciously can choose or, if necessary, purposefully adjust the specific structural parameters of the designed vibration protection device of the spring-toothed type.*

Keywords: *shearer, vibration protection device, dissipative characteristics calculation method.*

Сведения об авторах
Н.М. Лысенко
SPIN-код: 6151-1280
Author ID: 853003
Телефон: +380 (71) 323-88-83
Эл. почта: lysenko_nm@ukr.net
А.В. Гудинов
Телефон: +380 (71) 319-90-56
Эл. почта: gudinov92@mail.ru
Е.Ю. Степаненко
Телефон: +380 (62) 301-08-93
Эл. почта: elena_step85@mail.ru

Статья поступила 23.03.2018 г.
© Н.М. Лысенко, Е.Ю. Степаненко, А.В. Гудинов, 2018
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин

УДК 622.284

Н.А. Скляров /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УВЕЛИЧЕНИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ГИДРОСТОЕК И ГИДРОДОМКРАТОВ ПЕРЕДВИЖКИ ЗАБОЙНОГО СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА

Изложены причины износа элементов поршневого узла гидростойки и гидродомкрата передвижки забойного конвейера, приведены схема лабораторной установки и результаты исследований грязезащитных элементов из эластичного пористого материала на основе полиуретана, приведены результаты шахтных испытаний гидростоек с грязезащитными элементами.

Ключевые слова: *гидростойка, гидродомкрат передвижки конвейера, износ, грязезащитный элемент, полиуретан, долговечность.*

Постановка проблемы

Основными силовыми элементами гидросистемы угледобывающего комплекса являются гидравлические стойки и гидродомкраты передвижки забойного скребкового конвейера. Загрязнение рабочей жидкости гидросистемы кварцевыми и пиритными частицами с микротвердостью 8500…10000 Н/мм^2 приводит к интенсивному абразивному износу поверхностей трения деталей гидроузлов [1-4].

Анализ результатов дефектации 50 гидростоек 1М88 и гидродомкратов передвижки мехкрепи «Донбасс-90» на Рутченковском заводе «Гормаш» позволили выявить характер износа внутренней поверхности гидроцилиндров. Поверхность зеркала цилиндров повреждена коррозией с глубиной раковин до 0,5 мм. Площадь замеренных очагов коррозии изменялась от 5 до 20 % общей рабочей площади цилиндра. Кроме того, на поверхности зеркала цилиндров имелось множество рисок и царапин длиной 100…500 мм, глубиной 0,02-0,14 мм и шириной 0,03-0,2 мм. Максимальное отклонение диаметра поршня от номинального размера составляло 0,8 мм. Отклонение диаметра штока, имеющего высокопрочное хромовое покрытие, составило до 0,15 мм. Зазоры сопряжения «цилиндр-поршень» достигали 1,10…1,20 мм. Конусность центрирующих элементов поршня 0,7…1,0º [5].

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ исследований износов элементов гидростоек и гидродомкратов показал, что основной причиной является наличие в рабочей жидкости кварцевых и пиритных частиц размерами 0,1…1,0 мм, количество которых в массовом соотношении составляло 0,212 %. Среднее их количество на один гидродомкрат составляло от 4,9 до 26,9 тыс. штук [5].

Одним из путей повышения долговечности гидростоек и гидродомкратов передвижки забойного конвейера является снижение чувствительности поршневого узла к абразивному действию загрязнителя рабочей жидкости за счет применения грязезащитных устройств нового технического уровня.

На основании всестороннего анализа причин износа элементов сопряжения «цилиндр-поршень» гидростоек в качестве грязезащитных элементов было предложено использовать эластичный материал открытоячеистой структуры и поверхности на основе полиуретана марки ППУ-ЭО-130 ТУ-6-05-221-710-83.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является увеличение ресурса гидростоек и гидродомкратов за счет применения в поршневом узле грязезащитных элементов, аккумулирующих в себе загрязняющие примеси.

Основной материал исследования

Наличие на внутренней поверхности цилиндров множества рисок глубиной до 0,14 мм вызывает износ уплотнительных манжет поршня (рис. 1), увеличение диаметрального зазора до максимального значения 0,35 мм и потерю силовым цилиндром способности выполнять свои функции по назначению. На рис. 2 представлены эпюры износа внутренней поверхности цилиндра.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

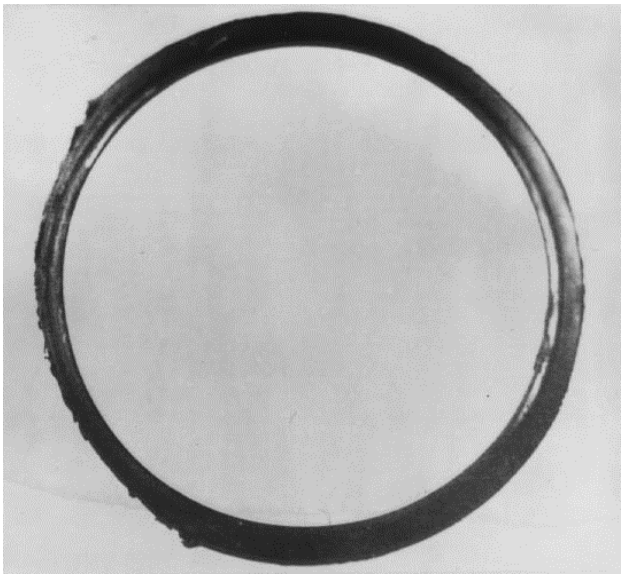


Рис. 1. Износ уплотняющей манжеты

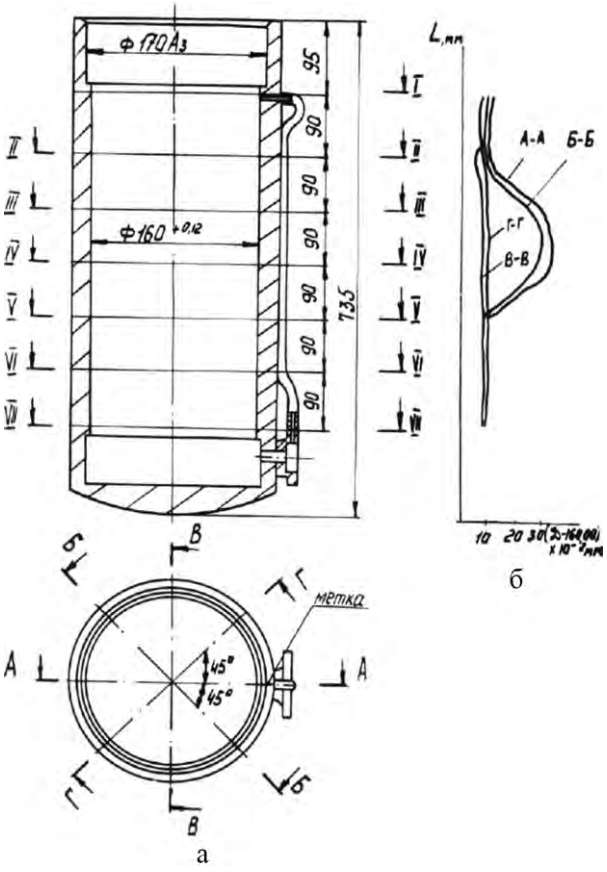
Защитные устройства, применяемые в поршневых узлах гидромашин [6-8,10-12], не обеспечивают полной или достаточно высокой степени защиты от проникновения твердых частиц, находящихся в рабочей жидкости, в зону трения и вызывают их преждевременный износ.

Для исследования кинетики перемещений опытных образцов из пористых полиуретанов и твердых частиц по поверхности трения была разработана лабораторная установка, схема которой приведена на рис. 3.

Лабораторная установка включает стакан 1 с основанием 2, в который с зазором вставлен корпус 3 с вклеенным опытным образцом из пенополиуритана 4. С одной стороны насыпают загрязняющие примеси 5, а все свободное пространство 6 и 7 заполняют рабочей жидкостью.

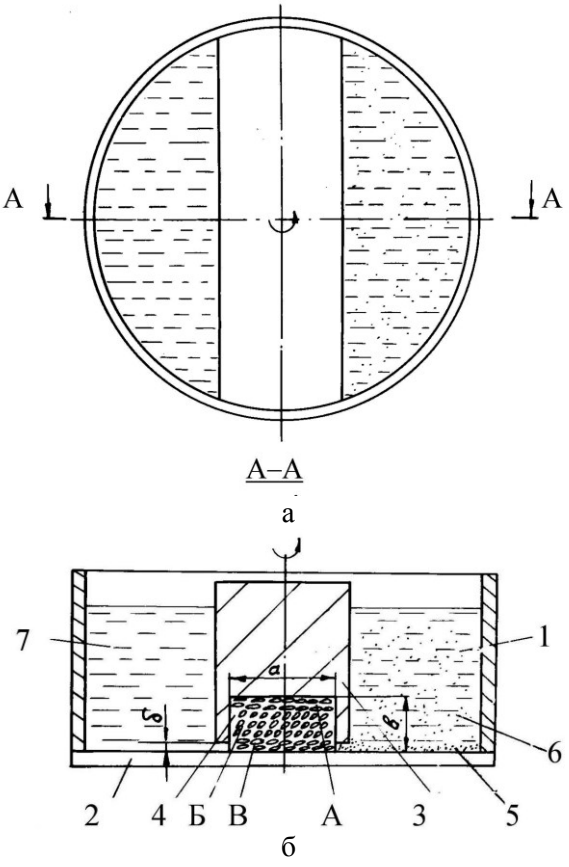
Следует отметить, что степень деформации опытного образца не оказывает существенного влияния на свойства контактной зоны образца 4, так как особенностью деформирования высокоэластичных пористых материалов является неравномерное распределение деформации по объему пористого элемента, при этом наблюдаются три характерные зоны А, Б и В. Зоны А и В у площадок контакта имеют наибольшую степень деформации 60…80 %, а деформация зоны Б – 0…5 % при общей степени деформации опытного образца 20…50 %.

В процессе предварительных исследований было установлено, что при максимальной скорости перемещения опытного образца 4 (0,05-0,1 м/с) зазор «б» между корпусом 3 и основанием 2



а б

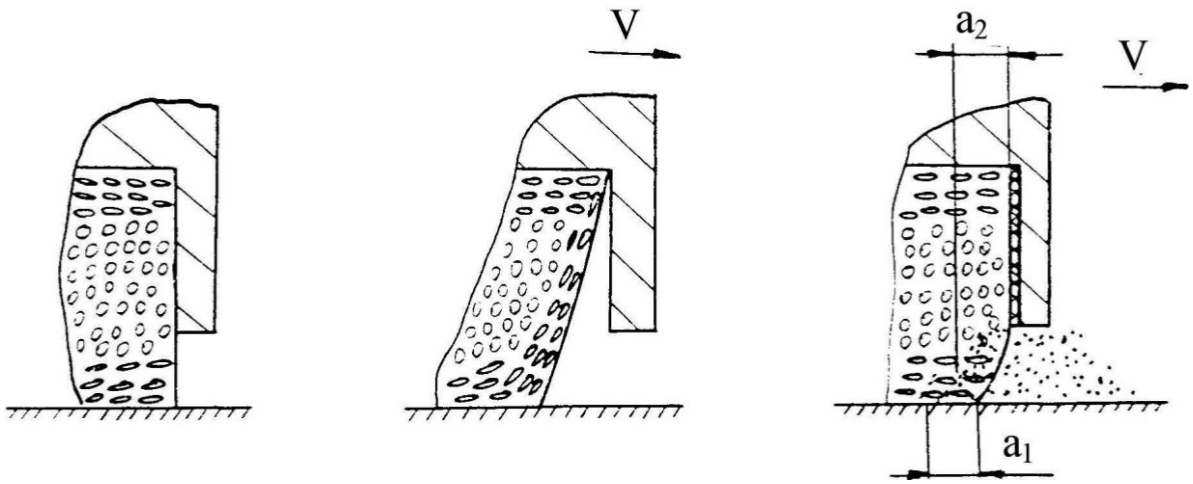
Рис. 2. Эпюры износа внутренней поверхности цилиндров:
а – схема замеров;
б – эпюры износов



а б

Рис. 3. Схема лабораторной установки для исследования кинетики перемещения твердых частиц и опытных образцов из пенополиуретана по поверхности трения

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б в

Рис. 4. Схемы деформаций передних кромок опытных образцов грязезащитных элементов: *а, б* – со свободной установкой; *в* – с вклеиванием боковых сторон

должен быть в пределах 1…6 мм, а боковые стороны испытуемого образца 4 необходимо вклеивать в паз корпуса 3, так как в противном случае имеет место опережающее движение корпуса 3 по отношению к опытному образцу и 4 передеформация последнего (рис. 4б). Деформация передней стенки значительно уменьшается при вклеивании опытного образца (рис. 4в).

При проведении лабораторных исследований на стеклянной поверхности трения были нанесены масштабные риски через каждые 10 мм, которые одновременно служили и ориентиром перемещения опытного образца и твердых частиц. При перемещении опытного образца поверхность трения полностью очищается от твердых частиц. В начале движения перед рабочей кромкой опытного образца образуется скопление твердых частиц, перерастающее затем в валик, который перемещается вместе с испытуемым образцом. В ходе дальнейших исследований опытному образцу сообщалось возвратно-вращательное движение с максимальной скоростью 0,02 м/с и максимальной линейной амплитудой перемещения 0,8 м, аналогично возвратно-поступательному движению поршня гидродомкрата. Число циклов перемещений определяли по формуле:

$$n = \frac{LK_1}{2AK_2},$$

где n – число циклов; L – средний суммарный путь трения поршня гидроцилинра за время эксплуатации, м; A – амплитуда перемещения опытного образца, м; K_1, K_2 – соответственно концентрация загрязнителя жидкости в гидроцилиндре и модели лабораторной установки, %.

Принимая L=800 м [5], K_1=0,2 % [2], K_2=20 %, A=0,8 м, получим число циклов перемещений опытных образцов, равное 50, эквивалентное числу циклов и пути трения поршня в гидроцилиндре за время его эксплуатации. При этом отмечена миграция твердых частиц по линии контакта площадки трения и через боковую поверхность испытуемого образца. Из-за колебаний и деформаций кромки испытуемого образца при возвратно-поступательном движении твердые частицы из зон миграции перемещаются вглубь материала образца. Значения величин зон миграции различных по размеру твердых частиц по линии контакта a_1 и через боковую поверхность пористого образца a_2 в проведенных испытаниях сведены в табл. 1.

При этом не было отмечено факта прохождения твердых частиц через опытный образец, так как его ширина была больше значений зон миграций.

Таким образом, с уменьшением размера твердых частиц глубина зон миграции отдельных частиц возрастает.

Лабораторные испытания модели подтвердили эффективность предложенного способа очистки рабочей поверхности детали с помощью открытоячеистого пенополиуретана и защиты гидравлического узла трения от проникновения в него твердых частиц.

Табл. 1. Значения величин зон миграции твердых загрязняющих частиц

Диаметр твердых частиц, мм	Величина зон миграции, мм	
	a_1	a_2
0,06…0,10	5…7	4…5
0,16…0,30	3…4	2…3
0,40…0,80	1…3	0…2

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

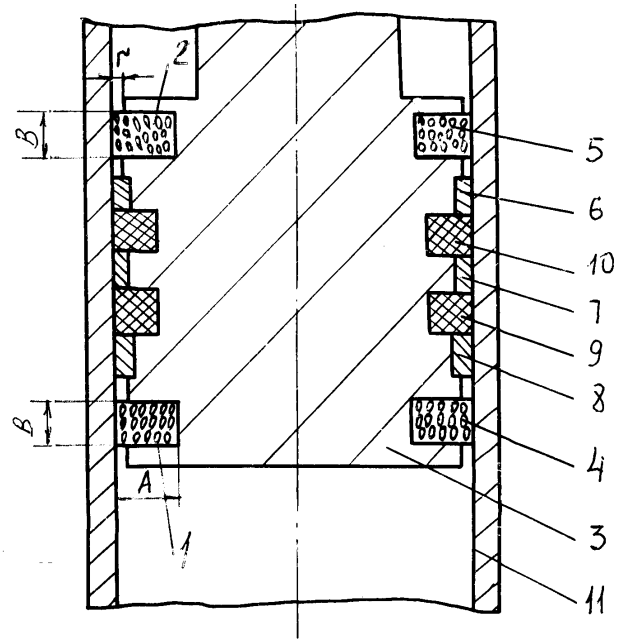


Рис. 5. Конструктивная схема поршневого узла с грязезащитными элементами

На основании проведенных лабораторных исследований с целью защиты пары трения «цилиндр-поршень» гидростойки или гидродомкрата передвижки от проникновения абразивных частиц в зону контакта решено было использовать специальные защитные элементы, выполненные из открытоячеистого пенополиуретана. Особенностью таких защитных элементов является свободное прохождение через них жидкости, вследствие этого на них не возникает перепада давления жидкости, и в то же время перемычки ячеек являются непреодолимым препятствием для абразивных частиц, содержащихся в жидкости.

На рис. 5 представлена конструктивная схема поршня гидродомкрата с защитными элементами из пенополиуретана. В кольцевых канавках 1 и 2 поршня 3 располагают защитные элементы 4 и 5 из открытоячеистого пенополиуретана с обеих сторон от центрирующих 6, 7, 8 и уплотняющих 9 и 10 элементов.

В качестве материала защитных элементов поршня рекомендуется использовать открытоячеистый пенополиуретан марок ППУ-ЭО-130 ТУ-6-05-221-710-83 или ППУ-ЭО-100 ТУ-6-05-5127-82 (отличается от предыдущего тем, что выполнен на основе сложных полиэфиров). Степень нормальной деформации защитного элемента необходимо выбирать в пределах 20…30 %. При увеличении степени деформации более 35 % может иметь место остаточная деформация в виде усадка материала.

Защитные элементы рекомендуется выполнять в виде полоски, устанавливаемой в кольцевую канавку поршня с шириной A=7…10 мм и высотой B=7…10 мм, чтобы обеспечивать достаточную его грязеемкость.



Рис. 6. Плунжеры с грязезащитными элементами из пенополиуретана в цехе № 1 Рутченковского завода «Гормаш»

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Величина зазора r между основой поршня и цилиндром (рис. 5) должна быть в пределах 2…5 мм.

Защитные элементы должны быть обязательно вклеены в канавки поршня водостойким клеем или закреплены там жестко каким-либо другим способом.

Для оценки долговечности грязезащитных элементов из пенополиуретана они были смонтированы на 20 поршневых узлах гидростоек 1М8 [9].

На рис. 6 представлены два плунжера с установленными в специальные кольцевые пазы защитными элементами из пенополиуретана.

Защитные элементы рекомендуется выполнять в виде полоски, устанавливаемой в кольцевую канавку поршня с шириной B=7…10 мм, чтобы обеспечивать достаточную его грязеемкость. Защитные элементы должны быть обязательно вклеены в канавки поршня водостойким клеем или закреплены там жестко каким-либо другим способом.

Исследования грязезащитных элементов, изъятых из гидроцилиндров после испытаний в шахтных условиях, показали, что уровень их загрязнения после 6 месяцев составил 20-25 % объема свободных пор.

Выводы

1. Впервые в отрасли для увеличения долговечности гидростоек и гидродомкратов передвижки забойного конвейера было предложено использовать грязезащитные элементы из пенополиуретана открытоячеистой структуры и поверхности марок ППУ-ЭО-130 ТУ-6-05-221-710-83 или ППУ-ЭО-ТУ-6-05-5187-82.

2. За время наблюдения на ш/у «Донбасс» в течение 20 месяцев отказов гидростоек с новыми грязезащитными элементами не выявлено, за тот же период эксплуатации гидростоек с обычными уплотнениями имели до 33 % отказов.

3. Исследования грязезащитных элементов, изъятых из гидроцилиндров после испытаний, показали, что уровень их загрязнения составил 20-25 % объема свободных пор. Это свидетельствует о том, что гидроцилиндры с грязезащитными элементами могли бы эффективно эксплуатироваться еще примерно 12-15 месяцев.

Список литературы

1. Барышев, А.И. Расчеты и проектирование транспортных средств непрерывного действия: Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е перераб. и доп. / А.И. Барышев и др. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – 689 с.
2. Галкин, В.И. Проблемы совершенствования транспортных систем в горной промышленности / В.И. Галкин, Е.Е. Шешко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал): Труды научного симпозиума «Неделя горняка-2011». Отдельный выпуск 1. – М.: Горная книга, 2011. – С. 458-507.
3. Обоснование и расчеты параметров грузоподъемных машин: Учеб. пос. для вузов / А.И. Барышев [и др.]. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 307 с.
4. Теоретические основы и расчеты транспорта энергоемких производств: Учеб. пособие для вузов / В.А. Будишевский [и др.]. Под общ. ред. В.П. Кондрахина. 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – 216 с.
5. Семик, П.Е. Пути увеличения долговечности стоек крепи 1М88 / П.Е. Семик, Н.А. Скляров, Ю.С. Панчеха // Уголь Украины. – 1984. – №7. – С. 24-25.
6. Ермак, Н.И. Технология изготовления гидравлических устройств угольных машин и комплексов / Н.И. Ермак, И.Н. Энтин, И.А. Элькинсон. – М.: Недра, 1973. – 228 с.
7. Мустафеев, С.И. Уплотнение двустороннего действия для гидравлических стоек и домкратов / С.И. Мустафеев, В.М. Соболь, А.А. Руденко // Уголь Украины. – 1982. – №9. – С. 38-40.
8. Соломахин, А.Н. Исследование и разработка уплотнительных узлов гидравлических стоек механизированных крепей: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Соломахин Александр Николаевич. – М.: ИГД им. Скочинского, 1976. – 13 с.
9. А. с. № 1273580 SU A2. Гидравлическая стойка шахтной крепи / П.Е. Семик [и др.]. – №3949375/22-03; заявл. 05.07.85; опубл. 30.11.86. Бюл.№44. – 3 с.
10. Bureček, A. Determination of undissolved air content in oil by means of compression method / A. Bureček, L. Hružík, M. Vašina // Strojniški vestnik. Journal of Mechanical Engineering. – 2015. – Vol.61. – No.7-8. – P. 477-485.
11. Petrović, R. Influence of air content entrained in fluid of a vane pump with double effect operating parameters / R. Petrović [et al.] // Tehnički vjesnik. Technical Gazette. – 2014. – Vol.21. No.2. – P. 401-407.
12. Laceklis-Bertmanis, J. Pressure oscillation in hydraulic hitch-system during implement transport / J. Laceklis-Bertmanis [et al.] // Žemės Ūkio Inžinerija. Mokslo Darbai. – 2010. – Vol.42. – No.2/3. – P. 22-31.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

N.A. Sklyarov /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE STUDY AND DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS TO INCREASE THE DURABILITY OF HYDRAULIC STANDS AND JACKS FOR MOVING A DOWNHOLE SCRAPER CONVEYOR

Background. *The paper deals with the causes of premature wear of the surfaces of elements in the "cylinder-piston" coupling of hydraulic stands and jacks for moving the downhole scraper conveyor.*
Materials and/or methods. *The author carried out the analysis of research and publications specific to the topic under consideration, including the results of 30 hydraulic stands fault detection, the composition and amount of quartz and pyrite particles within the cylinder, a plot of wear of the cylinders inner surface obtained.*
Results. *To study the kinetics of the movement of prototypes from porous polyurethane, a laboratory facility developed and the process of impurity accumulation by a polyurethane sample tested for 50 cycles. The values of the zones of migration of the particles into the test sample determined. Developed structural diagram of the piston of the hydraulic stand (hydraulic jack), made 20 hydraulic stands with dirt-resistant devices.*
Conclusion. *During the 20 months observation at ShU "Donbass" no failure of hydraulic stands with new dirt-resistant elements revealed, over the same period of operation hydraulic stands with the usual seals had up to 33 % failures. Studies of the dirt-resistant elements removed from the hydraulic cylinders after the tests showed that the level of contamination was 20-25 % of the free pores. This indicates that the hydraulic cylinders with dirt-resistant elements could effectively operate for about 12-15 months.*

Keywords: *hydraulic stand, hydraulic jack for moving conveyor, dirt-resistant element, wear, polyurethane, durability.*

Сведения об авторе
Н.А. Скляров
SPIN-код: 8015-9609
Author ID: 850367
ORCID iD: 0000-0002-2961-3164
Телефон: +380 (62) 301-07-78
Эл. почта: nikolay.sklyarov@mail.ru

Статья поступила 28.02.2018 г.
© Н.А. Скляров, 2018
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко



УДК 539.3:622.245

С.Н. Царенко /к.т.н./, И.И. Бридун /к.т.н./, М.В. Бридун
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

УСТОЙЧИВОСТЬ НЕВЕСОМОГО РАСТЯНУТО-СЖАТОГО СТЕРЖНЯ, МОДЕЛИРУЮЩЕГО РАБОТУ СТАЛЬНОЙ КРЕПИ ПРИ СПУСКЕ НА ПЛАВУ

В статье рассмотрена задача устойчивости стальной крепи во время спуска на плаву как упругого невесомого стержня, испытывающего сжатие с растяжением. Расчетная схема имеет существенное отличие от схем, которые были рассмотрены в задачах устойчивости бурильных труб. Таким образом, сформулирована задача об определении критической нагрузки и получены расчетные зависимости, описывающие напряженно-деформированное состояние продольно-поперечного изгиба обсадной колонны с учетом состыковки растянутого и сжатого участков. На основе исследования уравнения устойчивости получена графическая зависимость влияния гибкости обсадных труб на значение критической нагрузки. В качестве примера найдена критическая длина обсадной колонны в соответствии с принятой технологической схемой спуска, которая была использована для крепления ствола диаметром 4,3 м и глубиной 385 м на шахте «Юбилейной» в Донецкой области в 2012 г. Выполнено сравнение значения критической длины колонны с известным результатом, полученным на основе модели весомого стержня.

Ключевые слова: *стальная крепь, спуск на плаву, устойчивость сжатого стержня, обсадная труба, продольно-поперечный изгиб.*

Постановка проблемы

Сооружение скважин большого диаметра включает в себя следующие этапы: оснащение комплекса поверхности, проходку устья, бурение, крепление и тампонаж, откачку буровой жидкости, проверку состояния крепи. Значительное влияние на технико-экономическую эффективность способа бурения оказывают конструкция крепи и технология ее возведения.

В отечественной практике после окончания бурения скважины большого диаметра крепят обсадными металлическими трубами. В состав работ по креплению скважины входят: монтаж обсадных колонн и заполнение закрепного пространства. В свою очередь, монтаж осуществляется одним из двух способов: секционным способом – скважины крепят секциями, или погружным способом – сплошной колонной. Секции или колонна свариваются из отдельных обсадных труб. При креплении скважины секции стыкуют с помощью специальных стыковочных устройств. Погружной способ включает в себя спуск на плаву или на воздушной подушке.

Закрепное пространство тампонируют с целью обеспечения равномерного воздействия на крепь горного и гидростатического давления; предотвращения водогазопроявления; защиты обсадных труб от коррозии; закрепления промежуточных колонн в процессе бурения скважин.

Снижение функциональности стальной крепи происходит с увеличением диаметра стволов, то есть перехода от элемента крепления к роли постоянной опалубки, при этом неизбежно снижается технологичность возведения и увеличивается ее материалоемкость. С учетом этого технология эксплуатации ствола предусматривает организацию дренажа, что позволяет разгрузить стальную оболочку от внешнего давления и тем самым упразднить ее работу как элемента крепления. Таким образом, основная нагрузка, которую воспринимает стальная крепь, сводится к той, что возникает во время монтажа.

Зачастую при бурении скважин большого диаметра грузоподъемность буровой установки выбирают по весу обсадной колонны, которую предстоит опускать в скважину. В последнее время наиболее распространен спуск колонн секциями, но он сопряжен со значительным увеличением времени крепления скважин, причем не исключаются случаи неплотной стыковки секций, что осложняет тампонаж и последующую эксплуатацию скважин. В свою очередь, спуск колонны на плаву является наиболее простым и эффективным способом, но ограничен допустимым внешним давлением на колонну.

Анализ последних исследований и публикаций

При креплении ствола диаметром 4,3 м, глубиной 385 м, который предполагалось оборудо-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

вать для клетевого подъема на шахте «Юбилейной» в Донецкой области (Украина), ПАО «Донецкое ШПУ» был выбран способ спуска обсадной трубы на плаву с целью обеспечения вертикальности ствола в соответствии с требованиями СОУ 10.1.00174131.004-2006 [1]. Профилировка, составленная после осушения ствола, показала, что, начиная с отметки 110 м, происходит искривление оси ствола, а ее увод от вертикали на максимальной глубине составил 0,5 м (при 0,1 м допускаемой величины). С учетом того, что пробуренный ствол имел необходимое сечение в свету для отвесного спуска колонны, возникло предположение, что искривление оси обсадной трубы произошло за счет потери продольной устойчивости.

Проектирование крепи было выполнено в соответствии с ОНТП 03-80 [2], где обсадная труба рассчитывается как цилиндрическая оболочка, усиленная шпангоутами, под действием внешнего давления на прочность и устойчивость. Расчет технологических параметров спуска на плаву сделан с учетом рекомендаций [3,4], согласно которым влияние осевой нагрузки в прочностных расчетах учитывается как дополнительное напряжение от сжатия. Таким образом, принятые на предприятии методы расчета и проектирования обсадной колонны не рассматривают специфику ее работы при спуске на плаву как гибкого весомого стержня.

Впервые задача об устойчивости весомого стержня с двумя опертыми концами была поставлена и решалась учеными Р. Эйлером, а в дальнейшем А. Гринхиллом для свободного верхнего и защемленного нижнего концов [5]. Впервые в горном деле для расчета бурильных колонн решение по определению критических длин с применением функций Бесселя было получено А.Н. Динником [6], однако в своей работе он использовал ту же постановку задачи, что и А. Гринхилл, поэтому найденное решение позволило рассмотреть лишь некоторые случаи граничных условий. Задачи устойчивости растянуто-сжатого стержня применительно к расчету бурильных колонн были впервые рассмотрены Г. Вудсом и А. Лубинским [7] с использованием степенных рядов и А.Е. Сарояном [8] с использованием функций Бесселя. При этом А.Е. Сароян полагал, что уравнение равновесия на участках растяжения и сжатия одно и то же, и поэтому не использовал условия сопряжения этих участков. Решение для продольно-поперечного изгиба весомого стержня с использованием степенных рядов найдено Ф.Л. Шевченко [9]. Универсальная формула для расчета напряженно-деформированного состояния весомого стержня при различных внешних нагрузках и граничных условиях в функциях Бесселя и Ломмеля получена Г.М. Улитиным [10]. Отдельные задачи продольно-поперечного изгиба и устойчивости неклассических стержневых систем с применением специальных функций рассмотрены в работах [11-14]. Обзор основных методов исследования деформирования и устойчивости конструкций при статическом и динамическом нагружении представлен в литературе [15-17].

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является разработка инженерного подхода к оценке устойчивости обсадной колонны, учитывающего специфику технологии спуска на плаву как гибкого невесомого стержня.

Основной материал исследования

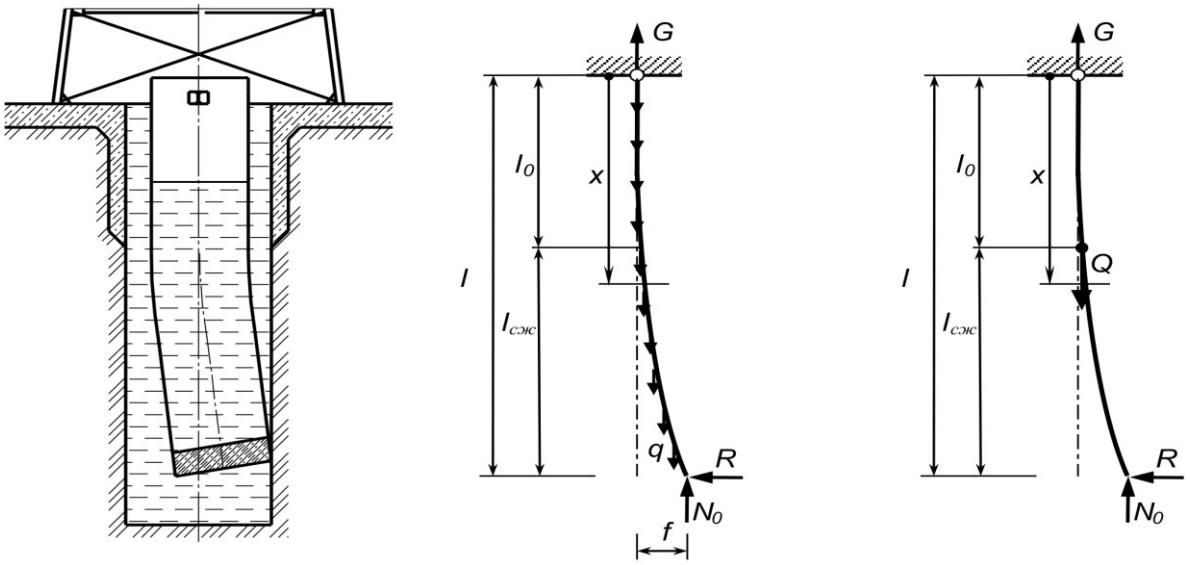
С учетом специфики расчетной схемы (рис. 1), которая является геометрически изменяемой, что влияет на постановку задачи об определении критической нагрузки, а не длины, нельзя непосредственно использовать расчетные зависимости, полученные в работе [10].

Спуск обсадной колонны на плаву является одним из наиболее распространенных способов монтажа. Суть процесса заключается в ограничении нагрузки на буровую установку за счет постепенного погружения трубы с заглушенным торцом. Таким образом, верхний участок трубы испытывает состояние растяжения. На днище действует выталкивающая сила, вызывая сжатие нижней части колонны. В качестве расчетной модели рассмотрим упругий стержень длиной l и весом, приложенным к нейтральному сечению (см. рис. 1). Положение нейтрального сечения (длину участка растяжения l_p) определим через грузоподъемность буровой установки G и погонную плотность трубы q, $l_p = \dfrac{G}{q}$. Длина участка сжатия будет определяться через выталкивающую силу N_0, действующую на нижний конец стержня $l_c = \dfrac{N_0}{q}$. Решение дифференциального уравнения в случае продольно-поперечного изгиба однородного стержня известно, и по методу начальных параметров уравнение изогнутой оси имеет вид [9]:

– на участке растяжения $\left(0 \le x \le l_p\right)$

$$y(x) = y_0 + \frac{\theta_0}{k_1}\sinh k_1 x - \frac{M_0}{k_1^2 EJ}\left(1-\cosh k_1 x\right) - \\ - \frac{P_0}{k_1^3 EJ}\left(k_1 x - \sinh k_1 x\right), \qquad (1)$$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 1. Схема потери устойчивости обсадной трубы:
а – расчетная схема колонны как весомого стержня;
б – расчетная схема колонны как невесомого стержня

– на участке сжатия $\left(0 \le x \le l_p\right)$

$$y(x) = y_0^* + \frac{\theta_0^*}{k_2}\sin k_2 x + \frac{M_0^*}{k_2^2 EJ}\left(1-\cos k_2 x\right) + \\ + \frac{P_0^*}{k_2^3 EJ}\left(k_2 x - \sin k_2 x\right), \quad (2)$$

где y_0, θ_0, M_0, P_0 – начальные параметры: прогиб, угол поворота, изгибающий момент, поперечная сила при (x=0), соответственно для участков растяжения и сжатия, EJ – изгибная жесткость трубы, $k_1 = \sqrt{\frac{G}{EJ}}$, $k_2 = \sqrt{\frac{N_0}{EJ}}$.

Исходя из специфики рассматриваемой схемы для задачи устойчивости, используем аналогичный подход, как в работе [18], введем следующие обозначения: $\lambda = \sqrt{\frac{q l_p^3}{EJ}}$, $\xi = \frac{x}{l_p}$, $\chi = \frac{l_c}{l_p}$. Подставляя принятые обозначения в уравнения (1)-(2), а также учитывая, что $\frac{d\xi}{dx} = \frac{1}{l_p}$, из дифференциальных зависимостей получаем уравнения прогибов, углов поворота, изгибающих моментов и поперечных сил:

– на участке растяжения $\left(0 \le \xi \le 1\right)$

$$y(\xi) = l_p\left(\begin{array}{l} y_0 + \frac{\theta_0}{\lambda}\sinh\lambda\xi - \frac{M_0}{q l_p^2}\times \\ \times\left(1-\cosh\lambda\xi\right) - \frac{P_0}{\lambda q l_p}\left(\lambda\xi - \sinh\lambda\xi\right) \end{array}\right),$$

$$\theta(\xi) = \theta_0\cosh\lambda\xi + \frac{M_0\lambda}{q l_p^2}\sinh\lambda\xi - \frac{P_0}{q l_p}\left(1-\cosh\lambda\xi\right), \quad (3)$$

$$M(\xi) = \frac{EJ}{l_p}\left(\begin{array}{l} \theta_0\lambda\sinh\lambda\xi + \frac{M_0\lambda^2}{q l_p^2}\cosh\lambda\xi + \\ + \frac{P_0\lambda}{q l_p}\sinh\lambda\xi \end{array}\right),$$

$$Q(\xi) = \frac{EJ}{l_p^2}\left(\begin{array}{l} \theta_0\lambda^2\cosh\lambda\xi + \frac{M_0\lambda^3}{q l_p^2}\sinh\lambda\xi + \\ + \frac{P_0\lambda^2}{q l_p}\cosh\lambda\xi \end{array}\right),$$

– на участке сжатия $\left(0 \le \xi \le \chi\right)$

$$y(\xi) = l_p\left(\begin{array}{l} y_0^* + \frac{\theta_0^*}{\lambda\sqrt{\chi}}\sin\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right) + \\ + \frac{M_0^*}{\chi q l_p^2}\left(1-\cos\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)\right) + \\ + \frac{P_0^*}{\lambda\chi^{3/2} q l_p}\left(\lambda\xi\sqrt{\chi} - \sin\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)\right) \end{array}\right),$$

$$\theta(\xi) = \theta_0^*\cos\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right) + \frac{M_0^*\lambda}{\sqrt{\chi} q l_p^2}\sin\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right) + \\ + \frac{P_0^*}{\chi q l_p}\left(1-\cos\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)\right), \quad (4)$$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

$$M(\xi)=\frac{EJ}{l_p}\left(\begin{array}{l}-\theta_0^*\lambda\sqrt{\chi}\sin\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)+\\+\dfrac{M_0^*\lambda^2}{ql_p^2}\cos\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)+\\+\dfrac{P_0^*\lambda}{\sqrt{\chi}ql_p}\sin\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)\end{array}\right),$$

$$Q(\xi)=\frac{EJ}{l_p^2}\left(\begin{array}{l}-\theta_0^*\lambda^2\chi\cos\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)-\\-\dfrac{M_0^*\lambda^3\sqrt{\chi}}{ql_p^2}\sin\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)+\\+\dfrac{P_0^*\lambda^2}{ql_p}\cos\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)\end{array}\right).$$

Рассмотрим устойчивость обсадной трубы в процессе спуска, для этого необходимо, чтобы уравнения (3) и (4) удовлетворяли условию сопряжения растянутого и сжатого участков и граничным условиям закрепления.

Из шарнирного закрепления верхнего торца получаем: y_0=0, M_0=0. Оставшиеся шесть условий имеют вид:

$$\begin{aligned}&y_0^*=y_1(0),\ \theta_0^*=\theta_1(0),\ M_0^*=M_1(0),\\&P_0^*=P_0,\ M_2(\chi)=0,\ Q_2(\chi)+ql_c\theta_2(\chi)=0,\end{aligned}\qquad(5)$$

где индекс «1» использован для участка растяжения, «2» – сжатия.

Используя первые четыре соотношения из условий (5), составим выражения для углов поворота и поперечных сил на участке сжатия:

$$\theta_2(\xi)=\theta_0\left(\begin{array}{l}\cosh\lambda\cos\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)+\\+\dfrac{1}{\sqrt{\chi}}\sinh\lambda\sin\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)\end{array}\right)+$$
$$+\frac{P_0}{ql_p}\left(\begin{array}{l}-(1-\cosh\lambda)\cos\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)+\\+\dfrac{1}{\sqrt{\chi}}\sinh\lambda\sin\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)+\\+\dfrac{1}{\chi}\left(1-\cos\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)\right)\end{array}\right),\qquad(6)$$

$$Q_2(\xi)=\frac{EJ}{l_p^2}\left(\theta_0\lambda^2\chi\left(\begin{array}{l}-\cosh\lambda\cos\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)-\\-\dfrac{1}{\sqrt{\chi}}\sinh\lambda\sin\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)\end{array}\right)+\right.$$
$$\left.+\frac{P_0\lambda^2\chi}{ql_p}\left(\begin{array}{l}(1-\cosh\lambda)\cos\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)-\\-\dfrac{1}{\sqrt{\chi}}\sinh\lambda\sin\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)+\dfrac{1}{\chi}\cos\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right)\end{array}\right)\right).\qquad(7)$$

Подставив полученные соотношения (6) и (7) в последнее из условий (5), находим P_0=0, тогда из предпоследнего условия (5) получим выражение для нахождения собственных значений уравнения устойчивости:

$$\tanh\lambda=\sqrt{\chi}\tan\left(\lambda\xi\sqrt{\chi}\right).\qquad(8)$$

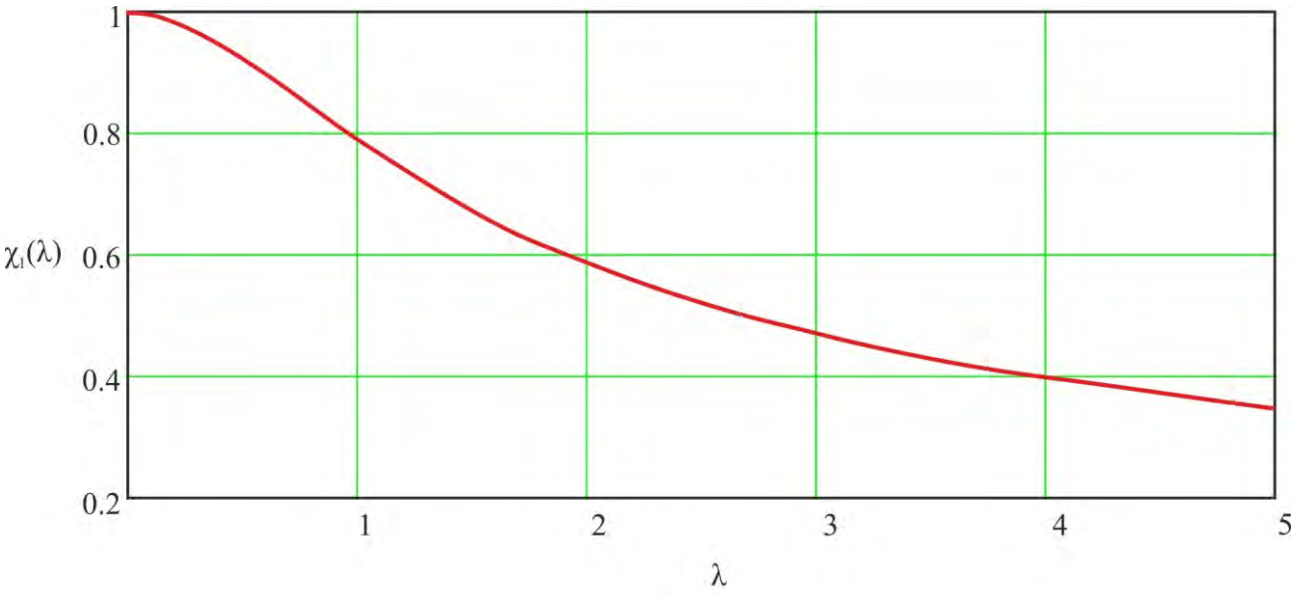


Рис. 2. Зависимость относительной длины сжатого участка от гибкости колонны

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Численные исследования зависимости (8) представлены на графике рис. 2. Из графика следует, что при $\lambda \to 0$ ($EJ \to \infty$) $\chi \to 1$, что соответствует предельному значению χ, при котором обсадная труба находится в состоянии устойчивого равновесия, как «абсолютно жесткий» стержень.

Рассмотрим устойчивость исследуемой трубы в процессе спуска. Параметры конструкции имеют следующие значения: диаметр трубы 4,3 м, толщина стенки 16 мм (EJ=1,02·10^{11} Нм^2), погонный вес q=21 кН/м, максимальная нагрузка на монтажную балку 2,8 МН, длина участка растяжения составит: $l_p = \frac{2{,}8 \cdot 10^3}{21} = 133$ м, соответственно, найдем значение параметра гибкости: $\lambda = \sqrt{\frac{q l_p^3}{EJ}} = 0{,}695$, χ=0,877, откуда находим $l_c = \chi l_p$=117 м, соответственно, полная длина колонны составит: $l_{кр}$=250 м. Следует отметить, что для весомого стержня критическое значение длины для рассматриваемого случая составляет: $l_{кр}$=253 м [18].

Выводы

В работе предложена модель невесомой стержневой системы, находящейся в состоянии продольно-поперечного изгиба. Верхняя часть системы находится в состоянии растяжения, а нижняя – в состоянии сжатия. Система моделирует колонну в процессе ее спуска и позволяет исследовать ее параметры напряженно-деформированного состояния и устойчивости. Сравнение результатов расчета на устойчивость по упрощенной невесомой модели с известными результатами, полученными для весомого стержня, моделирующего колонну [11], показало высокую точность (для рассматриваемого примера погрешность составила менее 1 %).

Таким образом, предлагаемая модель может быть положена в основу инженерных методов выбора технологического регламента при спуске обсадных колонн на плаву.

Список литературы

1. Подземные горные выработки угольных шахт. Правила выполнения работ / Стандарт Организации Украины СОУ 10.1.00174131. 004-2006. – К.: Минуглепром Украины, 2006. – 72 с.
2. Общесоюзные нормы технологического проектирования шахтных стволов и скважин, сооружаемых способом реактивно-турбинного бурения (РТБ): ОНТП 03-80. – М.: Минуглепром СССР, 1980. – 74 с.
3. Жиленко, Н.П. Справочное пособие по реактивно-турбинному бурению / Н.П. Жиленко, А.А. Краснощек. – М.: Недра, 1987. – 309 с.
4. Добровольский, Г.Б. Крепление скважин большого диаметра / Г.Б. Добровольский, Д.М. Казикаев, В.П. Петриченко. – М.: Недра, 1988. – 238 с.
5. Пановко, Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем / Я.Г. Пановко, И.И. Губанова. – М.: Недра, 1979. – 384 с.
6. Динник, А.Н. Избранные труды. – К.: АН УССР, 1958. – Т.1. – 151 с.
7. Вудс, Г. Искривление скважин при бурении / Г. Вудс, А. Лубинский. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 161 с.
8. Сароян, А.Е. Теория и практика работы бурильной колонны. – М.: Недра, 1990. – 264 с.
9. Шевченко, Ф.Л. Механика упругих деформируемых систем. В 2-х ч. Ч.1. Напряженно-дефомированное состояние стержней. – Донецк: ДГТУ, 2006. – 293 с.
10. Улитин, Г.М. Устойчивость буровой установки роторного типа // Проблемы прочности. – 2002. – №1. – С. 130-135.
11. Tsarenko, S.N. Investigation of strained deformed state of variable stiffness rod [Электронный ресурс] / S.N. Tsarenko. – Режим доступа: https://springerplus.springeropen.com/articles/10.1186/2193-1801-3-367
12. Царенко, С.Н. Продольно-поперечный изгиб стержней переменной жесткости / С.Н. Царенко // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – №1(685). – С. 5-13.
13. Царенко, С.Н. Устойчивость весомых стержней переменного сечения / С.Н. Царенко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура. – 2016. – №46(65). – С. 68-74.
14. Улитин, Г.М. Продольно-поперечный изгиб и устойчивость весомой стержневой системы / Г.М. Улитин, С.Н. Царенко // Строительная механика и расчет сооружений. – 2017. – №2 (271). – С. 18-23.
15. Yoo, C.H. Stability of structures: principles and applications / C.H. Yoo, S.C. Lee. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. – 536 p.
16. Yang, B. Stress, Strain and Structural Dynamics: An Interactive Handbook of Formulas, Solutions, and MATLAB Toolboxes. – Cambridge: Elsevier Academic Press, 2005. – 960 p.
17. Clough, R.W. Dynamics of structures / R.W. Clough., J. Penzien. – McGraw-Hill, 1975. – 634 p.
18. Царенко, С.Н. Устойчивость стальной крепи при спуске на плаву // Изв. вузов. Горный журнал. – 2014. – Вып.7. – С. 48-55.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

S.N. Tsarenko /Cand. Sci. (Eng.)/, I.I. Bridun /Cand. Sci. (Eng.)/, M.V. Bridun
Donetsk National Technical University (Donetsk)

STABILITY OF WEIGHTLESS STRETCHED-COMPRESSED ROD SIMULATING THE WORK OF STEEL SUPPORTS AT DESCENT AFLOAT

Background. *As a rule, when drilling large diameter wells, the loading capacity of the drilling rig is selected by the weight of the casing string, which will be lowered into the well. There are three special ways of lowering the casing, if its weight exceeds the carrying capacity of the drilling rig: on the air cushion, afloat or by sections.*
Materials and/or methods. *When mounting a shaft of diameter 4.3 m, depth 385 m, for the crate hoist at the mine "Yubileynaya", PJSC "Donetsk ShPU", the floating method of the casing descent chosen to ensure the verticality of the shaft in accordance with the requirements of SOU 10.1.00174131.004-2006. Given that the drilled well had the necessary cross-section in the light for the vertical descent of the casing assumed that the curvature of the casing axis was due to the loss of longitudinal stability. The essence of the process of lowering the casing afloat is to limit the load on the drilling rig* due *to the gradual immersion of the pipe with a muffled end. Thus, the upper section of the pipe experiences a state of tension. The buoyancy force acts at the bottom, causing compression of the lower part of the casing. As a computation model considered an elastic rod of length l and weight Qattached to the neutral section. The position of the neutral section (the length of the stretch section l_p) determined by the carrying capacity of the drilling rig and the linear density of the pipe q,* $l_p = \frac{G}{q}$. *The length of the compression section determined by the buoyancy force* N_0 *acting on the lower end of the rod* $l_c = \frac{N_0}{q}$.
Results. *A model of a weightless rod system, which is in a state of longitudinal-transverse bending, proposed. The upper part of the system is in a state of tension, and the lower in a state of compression. The system simulates the casing during its descent and allows investigating its parameters of stress-strain state and stability. Comparison of the stability calculation results for the simplified weightless model with the known results obtained for the weight rod of the modeling casing string showed high accuracy (in the example considered the error was less than 1 %).*
Conclusion. *Thus, the proposed model can be used as a basis for engineering methods of selecting technological regulations when lowering casing strings afloat.*

Keywords: *steel support, descent afloat, stability of compressed rod, casing string, longitudinal-transverse bending.*

Сведения об авторах

С.Н. Царенко
SPIN-код: 4554-4579
Author ID: 758077
Телефон: +380 (66) 031-53-01
Эл. почта: tzarenko@gmail.com

М.В. Бридун
Телефон: +380 (95) 335-64-48
Эл. почта: noktian@yandex.ua

И.И. Бридун
SPIN-код: 4856-8561
Author ID: 851115
ORCID iD: 0000-0002-3199-8518
Телефон: +380 (71) 332-80-60
Эл. почта: ss13835@yandex.ru

Статья поступила 30.03.2018 г.
© С.Н. Царенко, И.И. Бридун, М.В. Бридун, 2018
Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев

УДК 629.3.02-83-843

В.И. Калашников /к.т.н./, А.В. Алдошин
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

АНАЛИЗ СИСТЕМ СИНХРОННОГО ПРИВОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Развитие теории и практики применения электромобилей поставило на повестку дня их серийное производство. Для использования электромобилей важными требованиями являются регулирование скорости электродвигателя, плавный пуск и торможение. В работе описаны основные способы регулирования синхронного двигателя с постоянными магнитами.

Ключевые слова: *синхронный привод, постоянные магниты, двигатель, векторное регулирование, датчик положения.*

Постановка проблемы

В настоящее время идет бурное внедрение в серийное производство электромобилей. Это позволяет решить проблему сокращения выбросов вредных отходов транспортных средств и повышения энергоэффективности автомобиля [1]. Различные фирмы – производители электромобилей ориентируются либо на асинхронный, либо на синхронный привод. В данной работе рассматриваются особенности привода электромобиля на базе синхронного двигателя с векторным регулированием [2].

Анализ последних исследований и публикаций

Главное различие между синхронным двигателем с постоянными магнитами (СДПМ) и асинхронным двигателем заключается в конструкции ротора. Проведенные исследования показывают, что СДПМ имеет КПД примерно на 2 % больше, чем высокоэффективный (IE3) асинхронный электродвигатель, при условии, что статор имеет одинаковую конструкцию, а для регулирования используется один и тот же частотный преобразователь [3]. При этом синхронный электродвигатель с постоянными магнитами по сравнению с асинхронным двигателем обладает лучшими показателями: мощность/объем, момент/инерция [4].

Цель (задачи) исследования

Цели настоящей работы: 1. Представить конструкции и типы СДПМ. 2. Показать основные способы регулирования синхронного привода. 3. Рассмотреть преимущества и недостатки векторного регулирования с датчиком и без датчика положения.

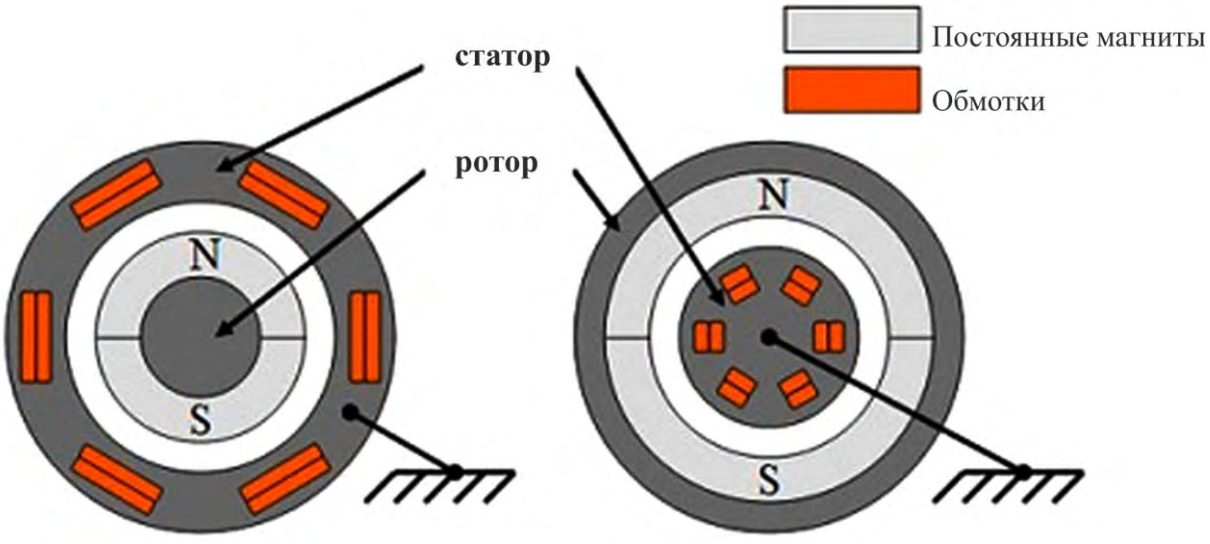
Основной материал исследования

Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами, как и любой вращающийся электродвигатель, состоит из ротора и статора (рис. 1).



Рис. 1. Синхронный электродвигатель со встроенными постоянными магнитами

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 2. Конструкции синхронного двигателя с постоянными магнитами:
а – стандартная; *б* – обращенная

Обычно ротор располагается внутри статора электродвигателя, также существуют конструкции с внешним ротором – электродвигатели обращенного типа (рис. 2).

Принцип действия синхронного электродвигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и постоянного магнитного поля ротора. Концепция вращающегося магнитного поля статора синхронного электродвигателя такая же, как и у трехфазного асинхронного электродвигателя [3].

Для работы синхронного двигателя с постоянными магнитами требуется частотный преобразователь на базе инвертора напряжения. Выбор оптимального способа управления главным образом зависит от задачи, которая ставится перед электроприводом. Для решения задач привода электромобиля, требующих высоких динамических характеристик, обычно выбирается векторное регулирование с ориентированием по полю ротора.

Характеристики основного метода управления синхронным электродвигателем с постоянными магнитами приведены в табл. 1.

Векторное регулирование с ориентированием по полю ротора позволяет плавно, точно и независимо управлять скоростью и моментом двигателя. Для работы векторного регулирования с ориентированием по полю необходимо знать положение ротора синхронного двигателя относительно поля статора.

Существует два способа определения положения ротора:

– по датчику положения;

– без датчика – посредством вычисления угла системой управления в реальном времени на основе имеющейся информации о токах и напряжении статора.

Табл. 1. Характеристики векторного регулирования синхронного привода

Регулирование		Преимущества	Недостатки
Векторное регулирование с ориентированием по полю	С датчиком положения	Плавная и точная установка положения ротора и скорости вращения двигателя, большой диапазон регулирования	Требуется датчик положения ротора и микропроцессорная система регулирования
	Без датчика положения	Не требуется датчик положения ротора. Плавная и точная установка положения ротора и скорости вращения двигателя, ограниченный диапазон регулирования	Бездатчиковое регулирование во всем диапазоне скоростей возможно только для СДПМ с ротором с явно выраженными полюсами, требуется мощная система управления

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

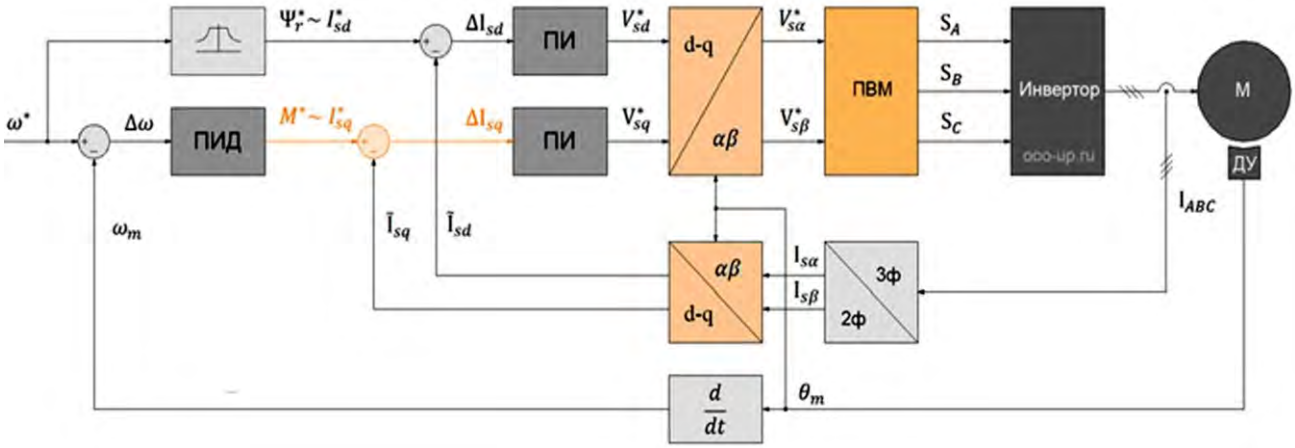


Рис. 3. Векторное регулирование синхронного двигателя с постоянными магнитами с датчиком положения ротора

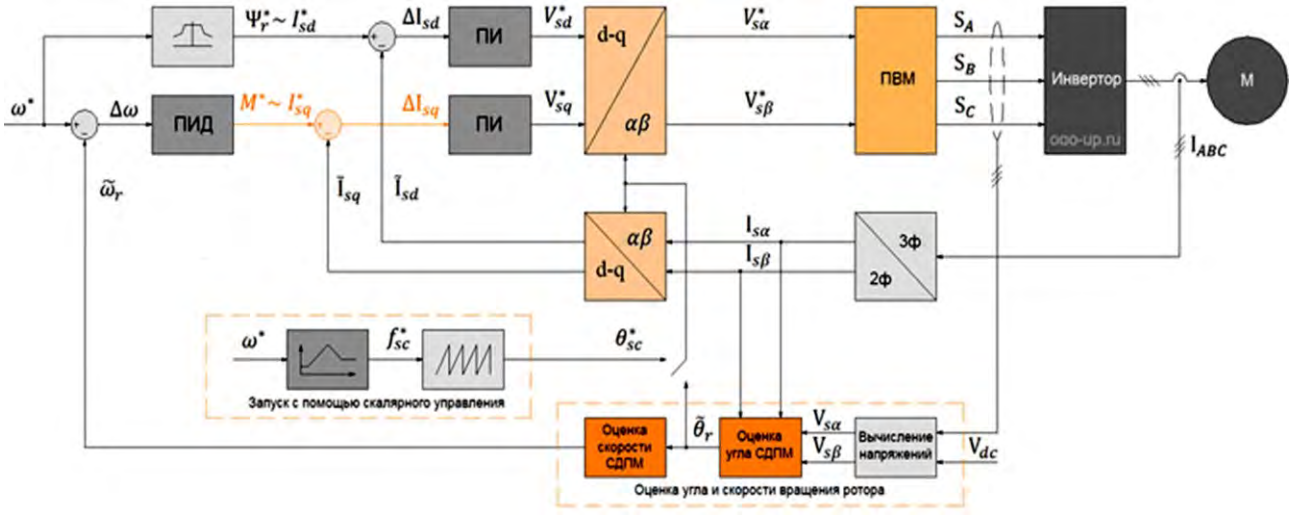


Рис. 4. Векторное регулирование синхронного двигателя с постоянными магнитами без датчика положения ротора со скалярным запуском

В качестве датчика угла используются следующие типы датчиков:

– индуктивный: синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ);

– оптический.

На рис. 3 приведена структурная схема векторного регулирования синхронного двигателя с постоянными магнитами с использованием датчика угла положения ротора [4].

В последнее время ведутся интенсивные разработки по системам векторного регулирования СДПМ без датчика положения. Первые бездатчиковые методы определения угла были основаны на использовании противо-ЭДС двигателя. Противо-ЭДС двигатель содержит в себе информацию о положении ротора, поэтому, вычислив величину противо-ЭДС в неподвижной системе координат, можно рассчитать положение ротора. Однако при неподвижном роторе противо-ЭДС отсутствует, а на низких оборотах противо-ЭДС имеет низкую амплитуду, которую сложно отличить от шума. Поэтому в системах регулирования необходимо предусмотреть запуск привода при низких частотах.

Существует два распространенных варианта запуска СДПМ:

– скалярный метод – запуск по заранее определенной характеристике зависимости напряжения от частоты;

– метод наложения высокочастотного сигнала [5].

На рис. 4 представлена структурная схема векторного регулирования синхронного двигателя с постоянными магнитами без датчика положения ротора со скалярным запуском.

Выводы

В настоящее время для привода электромобиля различными фирмами-производителями используется как асинхронный, так и синхрон-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ный электропривод с векторным регулированием. Однозначного определения выбора привода электромобиля не существует. Решение этой задачи, прежде всего, связано с успехами разработки бездатчикового регулирования скорости и положения ротора на низких оборотах.

Список литературы

1. Тиматков, В.В. Переход в новый энергетический мир как фактор роста экономики / В.В. Тиматков // Энергетическая политика. – Вып.6. – 2014. – С. 82-87.
2. Schroeder, D. Elektrische Antriebe-Regelung von Antriebssystemen / D. Schroeder. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verl., 2009. – 1336 p.
3. Hofer, K. Elektrotraktion: elektrische Antriebe in Fahrzeugen / K. Hofer. – Berlin; Offenbach: VDE, 2006. – 280 p.
4. Бербиренков, И.А. Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе электромобиля / И.А. Бербиренков, В.В. Лохнин // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т.318. – №4. – С. 148-150.
5. Schrödl, M. Neue Elektroantriebe für die Mobilität der Zukunft [Электронный ресурс] / M. Schrödl. – Режим доступа: https://www.tuwien.ac.at/fileadmin/t/ttransfer/Dokumente/Firmenservice_fuer_Untern/Schroedl_Neue_Elektrobetriebe_fuer_die_Mobilitaet_der_Zukunft.pdf

V.I. Kalashnikov /Dr. Sci. (Eng.)/, A.V. Aldoshin
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE ANALYSIS OF SYNCHRONOUS DRIVE SYSTEMS OF ELECTRIC VEHICLES

Background. *There is no doubt that the future belongs to electric cars. Today the world leaders in the automotive industry create and sell vehicles of this type. One of the main advantages of the electric car is the absence of such a mechanism as the gearbox. The speed change is performed through the use of a frequency changer, and it does not matter which motor is the basis of this vehicle.*

Materials and/or methods. *Various manufacturers of electric vehicles are focused either on induction or synchronous drives. The main difference between a permanent magnet synchronous motor and an induction motor is the rotor design. Studies have shown that the synchronous motor has the efficiency factor of about 2 % higher than the high-efficiency induction motor, provided that the stator is of the same design. In order to solve the problems of the electric vehicle drive control requiring high dynamic characteristics, the vector control usually chosen with the orientation on the rotor field using a rotor position sensor or without it.*

Results. *Thus, it is possible to make a key distinction between the electric drive control methods. Mainly, vector control with the rotor position sensor or without a speed sensor used, but there is a limit to the speed control range.*

Conclusion. *Today various producers use in electric cars both induction and synchronous electric drives with vector control. There is no single choice of electric vehicle drives. The solution to this problem is, first of all, connected with the success of developing the sensorless speed and rotor position control at low speeds.*

Keywords: *synchronous drive, permanent magnets, motor, vector control, position sensor.*

Сведения об авторах

В.И. Калашников
SPIN-код: 8002-9286
Author ID: 855701
ORCID iD: 0000-0001-5116-1486
Телефон: +380 (71) 334-92-91
Эл. почта: viktor_kalashnikov@donntu.org

А.В. Алдошин
Телефон: +380 (71) 346-08-64
Эл. почта: alex_haus@mail.ru

Статья поступила 02.03.2018 г.

© В.И. Калашников, А.В. Алдошин, 2018

Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский

УДК 614.838.001.18

А.П. Ковалев /д.т.н./, Д.И. Воронин, А.С. Петренко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

О РАСЧЕТЕ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНО СЛОЖНЫХ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СИСТЕМ, ЭЛЕМЕНТЫ КОТОРЫХ МОГУТ НАХОДИТЬСЯ В ТРЕХ НЕСОВМЕСТНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Предложена методика оценки надежности структурно сложных мостиковых структур с учетом двух видов отказов средств защиты: отказ типа обрыв цепи и отказ в срабатывании. Сложные мостиковые структуры приводятся к одному эквивалентному элементу с помощью преобразования логического треугольника в эквивалентную по надежности звезду и обратного преобразования логического соединения в виде звезды к эквивалентному по надежности соединению в виде треугольника. Приведен пример расчета.

Ключевые слова: *надежность, система, сложная структура, мостиковая структура, треугольник, звезда, вероятность отказов, отказ типа обрыв, отказ в срабатывании, вероятность безотказной работы.*

Постановка проблемы

К не восстанавливаемым в процессе эксплуатации системам будем относить такие системы, восстановление которых по каким-либо причинам невозможно непосредственно в рассматриваемый период времени [1]. Под сложной по структуре схемой в данном случае будем понимать такую систему, в состав которой входит хотя бы одна мостиковая структура [2].

В тех случаях, когда необходимо повысить надежность проектируемой системы без изменения надежности комплектующих ее элементов, обычно вводят избыточные (резервные) элементы или группы элементов, либо вносятся определенные изменения в схему, что позволяет оптимизировать ее структуру.

Методика оценки надежности невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться только в двух несовместных состояниях – работоспособном и отказавшем (отказ типа обрыв цепи), разработаны в достаточно полной мере [3-6].

В перечисленных методиках расчетов надежности сложных по структуре систем предполагается, что средства их защиты абсолютно надежны. В реальных же системах электроснабжения, газоснабжения, водоснабжения и т.д. средства защиты могут работать правильно, отключать поврежденный участок сети (ручное, автоматическое отключение). Такие повреждения в системе будем относить к отказам типа обрыв цепи, либо отказывать и его не отключать – отказ в срабатывании.

Поэтому учет надежности средств защиты сложных по структуре систем является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит в значительной степени повысить точность расчетов и тем самым прогнозировать живучесть разрабатываемой системы на этапе проектирования или реконструкции.

Анализ последних исследований и публикаций

Для оценки надежности сложных невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях, известны методы, основанные на использовании разложения сложной структуры по базовому элементу, применении метода «треугольник – звезда» и «звезда – треугольник», а также на использовании алгебры кортежей [7-10].

Полученные в этих работах формулы не очень удобны к применению, поэтому для систем, у которых вероятность отказов элементов меньше либо равна 0,1 (к таким элементам относится электрооборудование электрических систем и систем электроснабжения предприятий), следует использовать приближенные формулы переходов «треугольник – звезда» и «звезда – треугольник» и разработать принцип построения схем замещения систем, чтобы оценить их надежность.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является совершенствование методики оценки надежности систем с учетом двух видов несовместных отказов средств защиты.

Основной материал исследования

Под системой в данном случае будем понимать совокупность взаимосвязанных, конструк-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

тивно независимых изделий, которые обладают свойством перестраивать свою структуру в результате случайного повреждения ее элементов, без нарушения (либо частичного нарушения) выполняемой задачи. Предположим, что все рассматриваемые элементы, из которых состоит система, могут отказывать независимо друг от друга; каждый элемент системы может находиться в трех несовместных состояниях: работоспособном, неработоспособном – отказ типа обрыв цепи, неработоспособном – отказ в срабатывании; потоки отказов элементов (обрыв цепи) и отказ в срабатывании простейшие; пропускная способность элементов неограниченна, так же как и способность сдерживать поток энергии (электрического тока, жидкости, газа, информации и т.д.), независимо от количества короткозамкнутых элементов, после выхода из строя элемент не восстанавливается (не заменяется на новый) в рассматриваемый период времени [7].

Обозначим через P_i вероятность безотказной работы i-того элемента системы, q_{oi} – вероятность появления отказов в i-том элементе типа обрыв цепи, а через q_{si} – вероятность появления отказов в i-том элементе типа отказ в срабатывании. Эти три состояния составляют полную группу несовместных событий.

$$P_i + q_{oi} + q_{si} = 1. \qquad (1)$$

Индексы o и s в формуле (1) указывают на то, что учитываются повреждения элемента, которые приводят к отказам типа обрыв цепи либо отказам в срабатывании, соответственно.

В том случае, если в элементах системы электроснабжения наблюдается два типа несовместных отказов: отказ типа обрыв цепи и отказ в срабатывании, вероятность отказов элемента i, с учетом двух типов несовместных отказов, в течение времени t можно определить, пользуясь формулами [8]:

$$q_{oi}(t) = \frac{\lambda_{oi}}{\lambda_{oi} + \lambda_{si}} \cdot \left[1 - e^{-(\lambda_{oi}+\lambda_{si})\cdot t}\right], \quad (2)$$

$$q_{si}(t) = \frac{\lambda_{si}}{\lambda_{oi} + \lambda_{si}} \cdot \left[1 - e^{-(\lambda_{oi}+\lambda_{si})\cdot t}\right], \quad (3)$$

где λ_{oi}, λ_{si}, – постоянные интенсивности отказов i-того элемента при учете его отказов «обрыв цепи» и отказов в срабатывании, соответственно; t – текущее время работы i-того элемента системы.

Под простой по структуре схемой замещения исходной системы будем понимать такую схему, элементы которой могут соединяться последовательно, параллельно, последовательно-параллельно либо параллельно-последовательно.

Для простой по определению схемы замещения системы, которая состоит из n логически последовательно соединенных элементов, отказ типа обрыв цепи любого из i-элементов $\left(i = \overline{1,n}\right)$ приводит к разрыву связи между ее входом и выходом.

Если заданы вероятности отказов элементов схемы замещения q_{oi}, то вероятность разрыва связи между точками входа и выхода Q_o определим следующим образом:

$$Q_o = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - q_{oi}). \qquad (4)$$

Если у каждого из n логически последовательно соединенных элементов произойдет отказ в срабатывании в каждом из i элементов, то это приведет к тому, что между точками входа и выхода схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток.

Если заданы вероятности отказов элементов схемы замещения q_{si}, то вероятность Q_s того, что между точками входа и выхода схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток, определим с помощью формулы:

$$Q_s = \prod_{i=1}^{n} q_{si}. \qquad (5)$$

Для простой по определению схемы замещения системы, которая состоит из m логически параллельно соединенных элементов, отказ типа обрыв цепи в каждом из j $\left(j = \overline{1,m}\right)$ элементов приводит к обрыву связи между точками входа и выхода.

Если заданы вероятности отказов элементов схемы замещения q_{oi}, то вероятность Q_o того, что произойдет разрыв связи между точками входа и выхода, определим с помощью формулы:

$$Q_o = \prod_{j=1}^{m} q_{oj}. \qquad (6)$$

В случае, если у любого из m логически параллельно соединенных элементов произойдет отказ в срабатывании, это приведет к тому, что между точками «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток.

Если заданы вероятности отказов q_{si} $\left(j = \overline{1,m}\right)$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

элементов схемы замещения, которая состоит из m логически параллельно соединенных элементов, тогда Q_s – вероятность того, что между точками входа и выхода схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток, найдем, используя формулу:

$$Q_s = 1 - \prod_{j=1}^{m}(1 - q_{sj}). \qquad (7)$$

Чтобы сложную схему замещения системы электроснабжения привести к простой по определению, следует использовать способ переходов от логического треугольника к эквивалентной по надежности звезде либо использовать способ переходов от логической звезды к эквивалентному по надежности логическому треугольнику (рис. 1а, б).

Точные формулы переходов от логического треугольника к эквивалентной по надежности звезде и от логической звезды к эквивалентному по надежности логическому треугольнику приведены в [8,9].

Пусть каждый элемент логического треугольника, обозначим их символами *x, y, z* (см. рис. 1а), характеризуется вероятностями P_{ox}, q_{sx}; P_{oy}, q_{sy}; P_{oz}, q_{sz}, а элементы *i, j, k* логической звезды – вероятностями P_{oi}, q_{si}; P_{oj}, q_{sj}; P_{ok}, q_{sk} (см. рис. 1б).

Сущность преобразования логического треугольника в эквивалентную по надежности логическую звезду заключается в том, что соединение (см. рис. 1а) заменяется эквивалентным по надежности соединением в виде (см. рис. 1б).

Если заданы параметры надежности элементов логического треугольника P_{ox}, P_{oy}, P_{oz} и q_{sx}, q_{sy}, q_{sz}, то эквивалентные по надежности параметры звезды P_{oi}, P_{oj}, P_{ok} и q_{si}, q_{sj}, q_{sk} находим, пользуясь формулами [8]:

$$P_{oi} = \left\{ \frac{\left[1-(1-P_{ox})\cdot(1-P_{oy}\cdot P_{oz})\right]\cdot\left[1-(1-P_{oy})\cdot(1-P_{ox}\cdot P_{oz})\right]}{\left[1-(1-P_{oz})\cdot(1-P_{ox}\cdot P_{oy})\right]} \right\}^{\frac{1}{2}}, \qquad (8)$$

$$P_{oj} = \left\{ \frac{\left[1-(1-P_{oy})\cdot(1-P_{ox}\cdot P_{oz})\right]\cdot\left[1-(1-P_{oz})\cdot(1-P_{ox}\cdot P_{oy})\right]}{\left[1-(1-P_{ox})\cdot(1-P_{oy}\cdot P_{oz})\right]} \right\}^{\frac{1}{2}}, \qquad (9)$$

$$P_{ok} = \left\{ \frac{\left[1-(1-P_{oz})\cdot(1-P_{ox}\cdot P_{oy})\right]\cdot\left[1-(1-P_{ox})\cdot(1-P_{oy}\cdot P_{oz})\right]}{\left[1-(1-P_{oy})\cdot(1-P_{ox}\cdot P_{oz})\right]} \right\}^{\frac{1}{2}}. \qquad (10)$$

Отсюда:

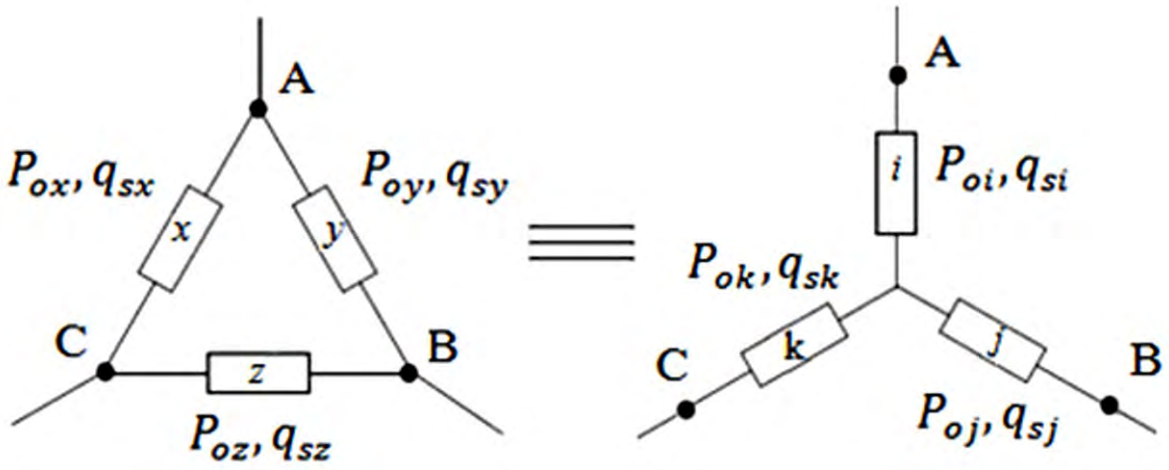
$$q_{oi} = 1 - P_{oi}, \quad q_{oj} = 1 - P_{oj}, \quad q_{ok} = 1 - P_{ok}.$$

$$q_{si} = \left\{ \frac{\left[1-(1-q_{sz}\cdot q_{sy})\cdot(1-q_{sx})\right]\cdot\left[1-(1-q_{sx}\cdot q_{sz})\cdot(1-q_{sy})\right]}{\left[1-(1-q_{sx}\cdot q_{sy})\cdot(1-q_{sz})\right]} \right\}^{\frac{1}{2}}, \qquad (11)$$

$$q_{sj} = \left\{ \frac{\left[1-(1-q_{sx}\cdot q_{sz})\cdot(1-q_{sy})\right]\cdot\left[1-(1-q_{sx}\cdot q_{sy})\cdot(1-q_{sz})\right]}{\left[1-(1-q_{sz}\cdot q_{sy})\cdot(1-q_{sx})\right]} \right\}^{\frac{1}{2}}, \qquad (12)$$

$$q_{sk} = \left\{ \frac{\left[1-(1-q_{sx}\cdot q_{sy})\cdot(1-q_{sz})\right]\cdot\left[1-(1-q_{sz}\cdot q_{sy})\cdot(1-q_{sx})\right]}{\left[1-(1-q_{sx}\cdot q_{sz})\cdot(1-q_{sy})\right]} \right\}^{\frac{1}{2}}. \qquad (13)$$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 1. Логическое соединение элементов в виде:
а – треугольника; *б* – звезды

Для высоконадежных систем, для которых соблюдается условие:

$$\begin{aligned} &q_{oi}\cdot q_{ok}\le 0{,}01,\ \ q_{oi}\cdot q_{oj}\le 0{,}01,\\ &q_{ok}\cdot q_{oj}\le 0{,}01,\ \ q_{ox}\cdot q_{oy}\cdot q_{oz}\le 0{,}001,\\ &q_{sy}\cdot q_{sz}\le 0{,}01,\ \ q_{sx}\cdot q_{sz}\le 0{,}01,\\ &q_{sx}\cdot q_{sy}\le 0{,}01,\ \ q_{sx}\cdot q_{sy}\cdot q_{sz}\le 0{,}001, \end{aligned} \qquad (14)$$

этими произведениями можно пренебречь, тогда формулы (8)-(13) примут вид:

$$\widetilde{P}_{oi}=1-(1-P_{ox})(1-P_{oy}), \qquad (15)$$

$$\widetilde{P}_{oj}=1-(1-P_{oy})(1-P_{oz}), \qquad (16)$$

$$\widetilde{P}_{ok}=1-(1-P_{ox})(1-P_{oz}), \qquad (17)$$

$$\widetilde{q}_{si}=\left[\frac{q_{sx}\cdot q_{sy}}{q_{sz}}\right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (18)$$

$$\widetilde{q}_{sj}=\left[\frac{q_{sy}\cdot q_{sz}}{q_{sx}}\right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (19)$$

$$\widetilde{q}_{sk}=\left[\frac{q_{sx}\cdot q_{sz}}{q_{sy}}\right]^{\frac{1}{2}}. \qquad (20)$$

Формулы (8)-(13) и (15)-(20) позволяют логический треугольник заменить эквивалентной по надежности звездой, используя точные и приближенные формулы.

Если заданы параметры надежности элементов логической звезды (см. рис. 1б): P_{oi}, q_{si}; P_{oj}, q_{sj}; P_{ok}, q_{sk}, то эквивалентные по надежности элементы треугольника P_{ox}, q_{sx}; P_{oy}, q_{sy}; P_{oz}, q_{sz} (см. рис. 1а) найдем, пользуясь формулами [9]:

$$q_{ox}=\frac{2}{\left[2\cdot q_{oj}+q_{oi}\cdot q_{ok}-q_{oj}\cdot(q_{oi}+q_{ok})\right]\cdot\gamma+1}, \qquad (21)$$

$$q_{oy}=\frac{2}{\left[2\cdot q_{ok}+q_{oi}\cdot q_{oj}-q_{ok}\cdot(q_{oi}+q_{oj})\right]\cdot\gamma+1}, \qquad (22)$$

$$q_{oz}=\frac{2}{\left[2\cdot q_{oi}+q_{oj}\cdot q_{ok}-q_{oi}\cdot(q_{oj}+q_{ok})\right]\cdot\gamma+1}. \qquad (23)$$

Отсюда:

$$P_{ox}=1-q_{ox},\quad P_{oy}=1-q_{oy},\quad P_{oz}=1-q_{oz}.$$

Параметр γ в формулах (21)-(23) находится из решения кубического уравнения вида:

$$\gamma^3+\alpha_1\gamma^2+\alpha_2\gamma+\alpha_3=0, \qquad (24)$$

где

$$\alpha_1=\frac{1}{b+c\quad a}+\frac{1}{a+b\quad c}+\frac{1}{a+c\quad b},$$

$$\alpha_2=\frac{a+b+c-8}{(b+c-a)\cdot(a+b-c)\cdot(a+c-b)}, \qquad (25)$$

$$\alpha_3=\frac{1}{(b+c-a)\cdot(a+b-c)\cdot(a+c-b)},$$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

где

$$a = q_{oi} + q_{ok} - q_{oi} \cdot q_{ok},$$

$$b = q_{oi} + q_{oj} - q_{oi} \cdot q_{oj}, \qquad (26)$$

$$c = q_{oj} + q_{ok} - q_{oj} \cdot q_{ok}.$$

В кубическом уравнении (24) производится замена [11]:

$$\gamma = Y - \frac{\alpha_1}{3}. \qquad (27)$$

Уравнение (24) примет вид:

$$Y^3 + \alpha_4 Y^2 + \alpha_5 = 0, \qquad (28)$$

где

$$\alpha_4 = -\frac{\alpha_1^2}{3} + \alpha_2,$$

$$\alpha_5 = 2\left(\frac{\alpha_1}{3}\right)^3 - \frac{\alpha_1\alpha_2}{3} + \alpha_3,$$

$$\alpha_6 = \left(\frac{\alpha_4}{3}\right)^3 + \left(\frac{\alpha_5}{2}\right)^2,$$

а) если $\alpha_6<0$, $\alpha_4<0$, тогда:

$$Y_1 = 2\sqrt{-\frac{\alpha_4}{3}}\cos\frac{\alpha}{3}, \qquad (29)$$

$$Y_2 = -2\sqrt{-\frac{\alpha_4}{3}}\cos\left(\frac{\alpha}{3} + \frac{2\pi}{3}\right), \qquad (30)$$

$$Y_3 = -2\sqrt{-\frac{\alpha_4}{3}}\cos\left(\frac{\alpha}{3} - \frac{2\pi}{3}\right), \qquad (31)$$

$$\cos\alpha = -\frac{\alpha_5}{2\cdot\sqrt{\left[-\left(\frac{\alpha_4}{3}\right)\right]^3}},$$

б) если $\alpha_6\geq 0$, $\alpha_4<0$, тогда:

$$Y_1 = -2\sqrt{-\frac{\alpha_4}{3}}\operatorname{cosec} 2\alpha, \qquad (32)$$

$$Y_2 = \sqrt{-\frac{\alpha_4}{3}}\left(\operatorname{cosec} 2\alpha + i\sqrt{3}\operatorname{ctg} 2\alpha\right), \qquad (33)$$

$$Y_3 = \sqrt{-\frac{\alpha_4}{3}}\left(\operatorname{cosec} 2\alpha - i\sqrt{3}\operatorname{ctg} 2\alpha\right), \qquad (34)$$

где

$$\operatorname{tg}\alpha = \sqrt[3]{\operatorname{tg}\frac{\beta}{2}}, \qquad \left(|\alpha| \leq \frac{\pi}{4}\right),$$

$$\sin\beta = \frac{2}{\alpha_5}\sqrt{\left(-\frac{\alpha_4}{3}\right)^3}, \qquad \left(|\beta| \leq \frac{\pi}{2}\right).$$

с) если $\alpha_6\geq 0$, $\alpha_4>0$, тогда:

$$Y_1 = -2\sqrt{\frac{\alpha_4}{3}}\operatorname{ctg} 2\alpha, \qquad (35)$$

$$Y_2 = \sqrt{\frac{\alpha_4}{3}}\left(\operatorname{ctg} 2\alpha - i\sqrt{3}\operatorname{cosec} 2\alpha\right), \qquad (36)$$

$$Y_3 = \sqrt{\frac{\alpha_4}{3}}\left(\operatorname{ctg} 2\alpha + i\sqrt{3}\operatorname{cosec} 2\alpha\right), \qquad (37)$$

где

$$\operatorname{tg}\alpha = \sqrt[3]{tg\frac{\beta}{2}}, \qquad \left(|\alpha| \leq \frac{\pi}{4}\right),$$

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{2}{\alpha_5}\sqrt{\left(\frac{\alpha_4}{3}\right)^3}, \qquad \left(|\beta| \leq \frac{\pi}{2}\right).$$

Подставляя найденные значения: Y_1, Y_2, Y_3 в формулу (27), получим:

$$\gamma_1 = Y_1 - \frac{\alpha_1}{3}, \qquad (38)$$

$$\gamma_2 = Y_2 - \frac{\alpha_1}{3}, \qquad (39)$$

$$\gamma_3 = Y_3 - \frac{\alpha_1}{3}. \qquad (40)$$

Подставляются поочередно найденные корни γ_1, γ_2, γ_3 в формулы (21)-(23) и выбирается тот корень, для которого выполняется условие:

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

$$0<q_{ox}<1; \quad 0<q_{oy}<1; \quad 0<q_{oz}<1. \qquad (41)$$

Формулы переходов от соединения в виде звезды к эквивалентному по надежности соединению в виде треугольника, при учете отказов элементов типа отказ в срабатывании, примут вид:

$$q_{sx}=1-\frac{2}{\left[2P_{sj}+P_{si}\cdot P_{sk}-P_{sj}\left(P_{si}+P_{sk}\right)\right]\cdot\gamma+1}, \qquad (42)$$

$$q_{sy}=1-\frac{2}{\left[2P_{sk}+P_{si}\cdot P_{sj}-P_{sk}\left(P_{si}+P_{sj}\right)\right]\cdot\gamma+1}, \qquad (43)$$

$$q_{sz}=1-\frac{2}{\left[2P_{si}+P_{sj}\cdot P_{sk}-P_{si}\left(P_{sj}+P_{sk}\right)\right]\cdot\gamma+1}. \qquad (44)$$

Значение корней кубического уравнения (24) γ_1, γ_2, γ_3 находим из его решения.

Коэффициенты кубического уравнения α_1, α_2, α_3 находятся с помощью формул (25), а коэффициенты *a, b* и *c* определяются по формулам:

$$a=P_{si}+P_{sk}-P_{si}\cdot P_{sk},$$

$$b=P_{si}+P_{sj}-P_{si}\cdot P_{sj}, \qquad (45)$$

$$c=P_{sj}+P_{sk}-P_{sj}\cdot P_{sk}.$$

Выбирается то значение корня, при котором:

$$0<q_{sx}<1, \quad 0<q_{sy}<1, \quad 0<q_{sz}<1. \qquad (46)$$

Для высоконадежных систем, если выполняется условие (14), то формулы (21)-(23) и (42)-(44) переходов от логической звезды к эквивалентному по надежности соединению в виде треугольника примут вид:

$$\widetilde{q}_{ox}=\left[\frac{q_{oi}\cdot q_{ok}}{q_{oj}}\right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (47)$$

$$\widetilde{q}_{oy}=\left[\frac{q_{oi}\cdot q_{oj}}{q_{ok}}\right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (48)$$

$$\widetilde{q}_{oz}=\left[\frac{q_{ok}\cdot q_{oj}}{q_{oi}}\right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (49)$$

$$\widetilde{q}_{sx}=q_{si}\cdot q_{sk}, \qquad (50)$$

$$\widetilde{q}_{sy}=q_{si}\cdot q_{sj}, \qquad (51)$$

$$\widetilde{q}_{sz}=q_{sx}\cdot q_{sj}. \qquad (52)$$

Формулы (21)-(23), (42)-(44) и (47)-(52) позволяют логическую звезду заменить эквивалентным по надежности логическим треугольником, используя точные и приближенные формулы.

Для невосстанавливаемой системы справедлива формула [8]:

$$R=R_o-Q_s, \qquad (53)$$

где R – вероятность того, что в течение времени t не произойдет разрыв связи и не пройдет сквозной аварийный ток между точками «вход» и «выход» схемы замещения; R_o – вероятность того, что в течение времени t не произойдет разрыв связи между точками «вход» и «выход» схемы замещения; Q_s – вероятность того, что в течение времени t между точками «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток.

Пример. Для схемы замещения системы (рис. 2), заданы вероятности отказов ее элементов для t=0,1 года.

$$q_{o1}=0{,}0482, \quad q_{o2}=0{,}0405,$$
$$q_{o3}=0{,}0557, \quad q_{o4}=0{,}0637,$$
$$q_{o5}=0{,}0717, \quad q_{o6}=0{,}0786,$$
$$q_{o7}=0{,}0855, \quad q_{o8}=0{,}0401,$$
$$q_{o9}=0{,}0245, \quad q_{o10}=0{,}0714,$$
$$q_{o11}=0{,}0557, \quad q_{o12}=0{,}0478,$$
$$q_{o13}=0{,}0790, \quad q_{o14}=0{,}0858,$$

$$q_{s1}=0{,}0241, \quad q_{s2}=0{,}0162,$$
$$q_{s3}=0{,}0318, \quad q_{s4}=0{,}0239,$$
$$q_{s5}=0{,}0159, \quad q_{s6}=0{,}0315,$$
$$q_{s7}=0{,}0466, \quad q_{s8}=0{,}0321,$$
$$q_{s9}=0{,}0163, \quad q_{s10}=0{,}0238,$$
$$q_{s11}=0{,}0318, \quad q_{s12}=0{,}0398,$$
$$q_{s13}=0{,}0237, \quad q_{s14}=0{,}039.$$

Определить вероятность R того, что в течение времени t=0,1 года не произойдет разрыв связи и не пройдет сквозной аварийный ток между точками «вход» и «выход» схемы замещения (см. рис. 2).

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

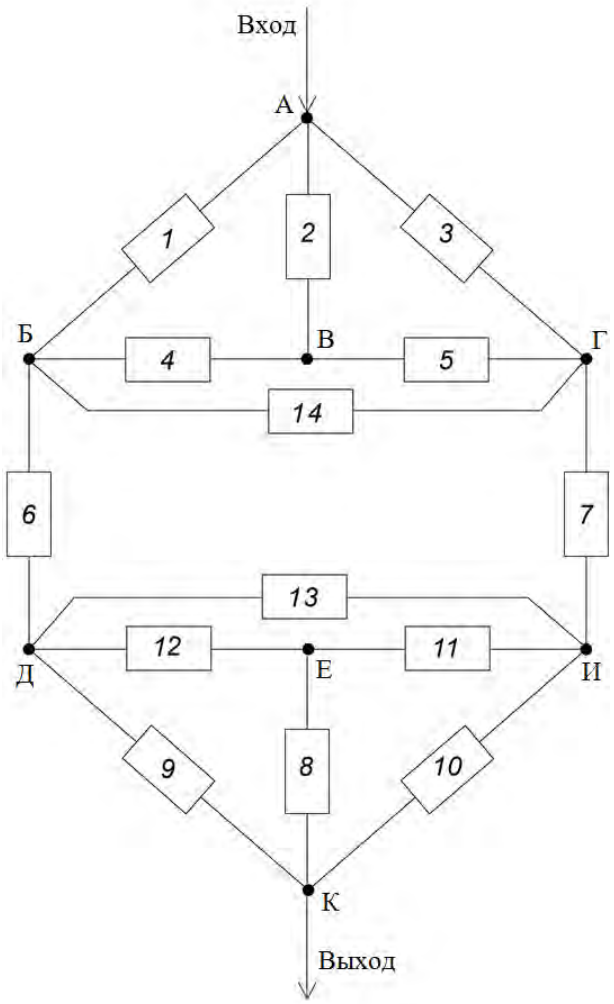


Рис. 2. Схема замещения системы

Решение. Используя исходные данные примера, схему замещения (см. рис. 2), точные формулы (21)-(23) и (42)-(44) переходов от логической звезды АБВГ к эквивалентному по надежности треугольнику АБГ, находим эквивалентные вероятности отказов элементов треугольника:

$$q_{o21}=0{,}2080,\ \ q_{o22}=0{,}2309,\ \ q_{o23}=0{,}3346,$$
$$q_{s21}=0{,}0004,\ \ q_{s22}=0{,}0003,\ \ q_{s23}=0{,}0004.$$

Используя приближенные формулы (47)-(52) переходов от логической звезды АБВГ к эквивалентному по надежности треугольнику АБГ, находим:

$$\widetilde{q}_{o21}=0{,}1897,\ \ \widetilde{q}_{o22}=0{,}2134,\ \ \widetilde{q}_{o23}=0{,}3358,$$
$$\widetilde{q}_{s21}=0{,}0004,\ \ \widetilde{q}_{s22}=0{,}0003,\ \ \widetilde{q}_{s23}=0{,}0004.$$

Логическую звезду КДЕИ заменим эквивалентным по надежности треугольником (рис. 3а), используя точные и приближенные формулы, тогда эквивалентные вероятности отказов логического треугольника примут следующие значения:

$$q_{o24}=0{,}2642,\ \ q_{o25}=0{,}1990,\ \ q_{o26}=0{,}2280,$$
$$q_{s24}=0{,}0001,\ \ q_{s25}=0{,}1855,\ \ q_{s26}=0{,}001,$$
$$\widetilde{q}_{o24}=0{,}2576,\ \ \widetilde{q}_{o25}=0{,}1855,\ \ \widetilde{q}_{o26}=0{,}2164,$$
$$\widetilde{q}_{s24}=0{,}0013,\ \ \widetilde{q}_{s25}=0{,}0013,\ \ \widetilde{q}_{s26}=0{,}001.$$

Используя формулы (6,7), параллельно соединенные элементы 1 и 21; 3 и 22; 12 и 23; 13 и 24; 10 и 26; 9 и 25 схемы замещения (см. рис. 3а), заменим эквивалентными 31, 32, 33, 34, 35, 36 (см. рис. 3б), соответственно.

Эквивалентные вероятности отказов элементов будут иметь следующие значения:

$$q_{o31}=0{,}0100,\ \ q_{o32}=0{,}0129,\ \ q_{o33}=0{,}0287,$$
$$q_{s31}=0{,}0245,\ \ q_{s32}=0{,}0321,\ \ q_{s33}=0{,}0394,$$
$$\widetilde{q}_{o31}=0{,}0091,\ \ \widetilde{q}_{o32}=0{,}0119,\ \ \widetilde{q}_{o33}=0{,}0288,$$
$$\widetilde{q}_{s31}=0{,}0245,\ \ \widetilde{q}_{s32}=0{,}0321,\ \ \widetilde{q}_{s33}=0{,}0394,$$
$$q_{o34}=0{,}0209,\ \ q_{o35}=0{,}0049,\ \ q_{o36}=0{,}0163,$$
$$q_{s34}=0{,}0249,\ \ q_{s35}=0{,}0176,\ \ q_{s36}=0{,}0248,$$
$$\widetilde{q}_{o34}=0{,}0203,\ \ \widetilde{q}_{o35}=0{,}0045,\ \ \widetilde{q}_{o36}=0{,}0154,$$
$$\widetilde{q}_{s34}=0{,}0249,\ \ \widetilde{q}_{s35}=0{,}0176,\ \ \widetilde{q}_{s36}=0{,}0248.$$

Логический треугольник АБГ (см. рис. 3б) заменим эквивалентной по надежности звездой, используя точные (8)-(13) и приближенные формулы (15)-(20), тогда эквивалентные вероятности безотказной работы элементов, при учете отказов типа обрыв цепи и вероятности отказов при учете отказов в срабатывании будут иметь следующие значения:

$$P_{o41}=0{,}9998,\ \ P_{o42}=0{,}9997,\ \ P_{o43}=0{,}9996,$$
$$q_{s41}=0{,}1454,\ \ q_{s42}=0{,}1767,\ \ q_{s43}=0{,}2271,$$
$$\widetilde{P}_{o41}=0{,}9998,\ \ \widetilde{P}_{o42}=0{,}9997,\ \ \widetilde{P}_{o43}=0{,}9996,$$
$$\widetilde{q}_{s41}=0{,}1412,\ \ \widetilde{q}_{s42}=0{,}1732,\ \ \widetilde{q}_{s43}=0{,}2273.$$

Логический треугольник ДИК заменим эквивалентной по надежности звездой (см. рис. 3б), используя точные и приближенные формулы:

$$P_{o44}=0{,}9999,\ \ P_{o45}=0{,}9997,\ \ P_{o46}=0{,}9999,$$
$$q_{s44}=0{,}1352,\ \ q_{s45}=0{,}1875,\ \ q_{s46}=0{,}1345,$$
$$\widetilde{P}_{o44}=0{,}9999,\ \ \widetilde{P}_{o45}=0{,}9997,\ \ \widetilde{P}_{o46}=0{,}9999,$$
$$\widetilde{q}_{s44}=0{,}1330,\ \ \widetilde{q}_{s45}=0{,}1875,\ \ \widetilde{q}_{s46}=0{,}1322.$$

Используя схему замещения (см. рис. 3в), находим:

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

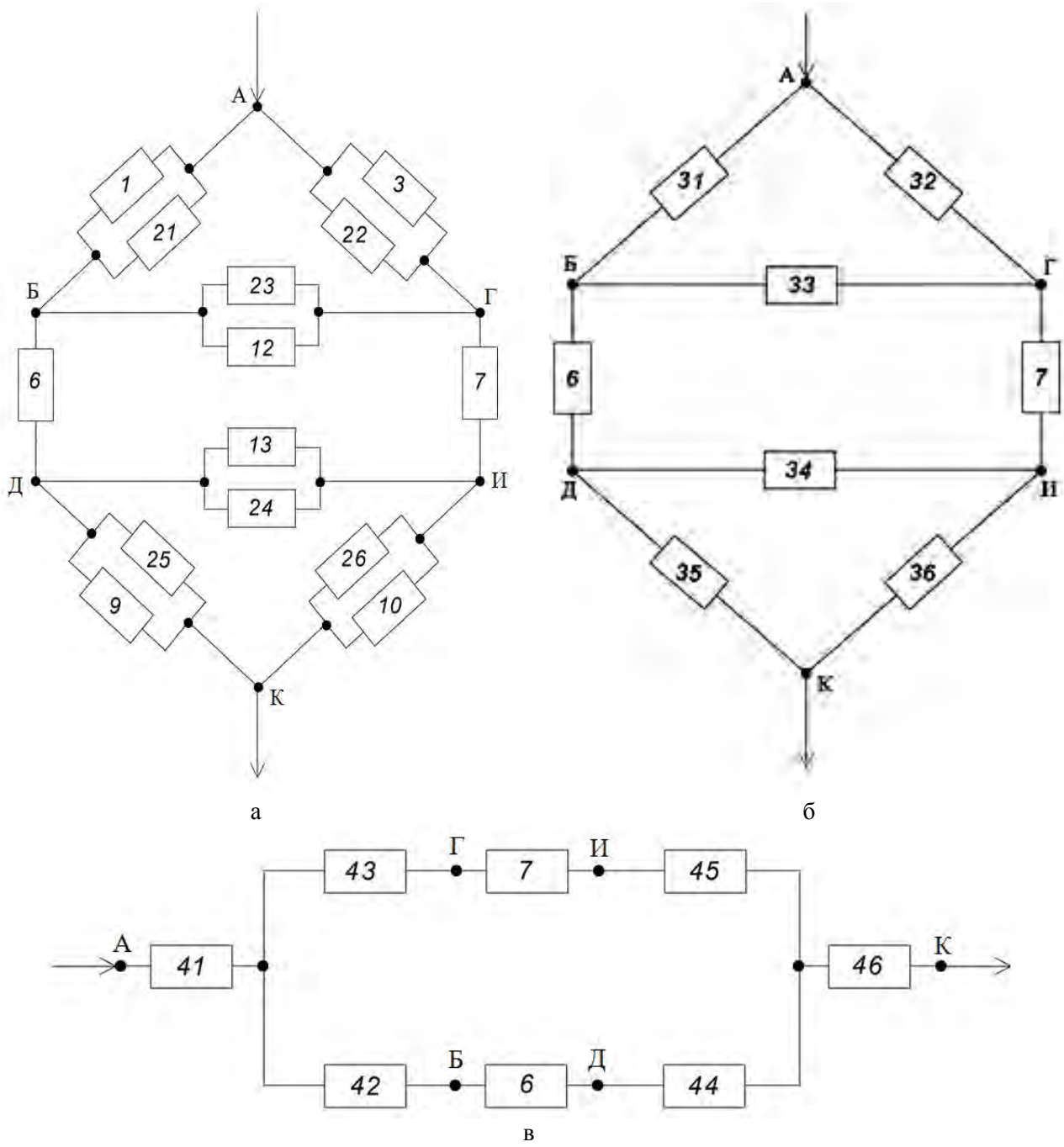


Рис. 3. Способ преобразования схемы замещения системы

$$R_o = P_{o41}P_{o46}\left[1-\left(1-P_{o43}P_{o7}P_{o45}\right)\left(1-P_{o42}P_{o6}P_{o44}\right)\right] =$$
$$= 0{,}9998\cdot 0{,}9999\left[1-\left(1-0{,}9996\cdot 0{,}9145\cdot 0{,}9997\right)\left(1-0{,}9997\cdot 0{,}9213\cdot 0{,}9999\right)\right] = 0{,}9929,$$

$$\widetilde{R}_o = \widetilde{P}_{o41}\widetilde{P}_{o46}\left[1-\left(1-\widetilde{P}_{o43}P_{o7}\widetilde{P}_{o45}\right)\left(1-\widetilde{P}_{o42}P_{o6}\widetilde{P}_{o44}\right)\right] =$$
$$= 0{,}9998\cdot 0{,}9999\left[1-\left(1-0{,}9996\cdot 0{,}9145\cdot 0{,}9997\right)\left(1-0{,}9997\cdot 0{,}9213\cdot 0{,}9999\right)\right] = 0{,}9929,$$

$$Q_s = q_{s41}q_{s46}\left[1-\left(1-q_{s43}q_{s7}q_{s45}\right)\left(1-q_{s42}q_{s6}q_{s44}\right)\right] =$$
$$= 0{,}1454\cdot 0{,}1345\left[1-\left(1-0{,}2271\cdot 0{,}0466\cdot 0{,}1875\right)\left(1-0{,}1767\cdot 0{,}0315\cdot 0{,}1352\right)\right] = 0{,}00005,$$

$$\widetilde{Q}_s = \widetilde{q}_{s41}\widetilde{q}_{s46}\left[1-\left(1-\widetilde{q}_{s43}q_{s7}\widetilde{q}_{s45}\right)\left(1-\widetilde{q}_{s42}q_{s6}\widetilde{q}_{s44}\right)\right] =$$
$$= 0{,}1412\cdot 0{,}1322\left[1-\left(1-0{,}2273\cdot 0{,}0466\cdot 0{,}1875\right)\left(1-0{,}1732\cdot 0{,}0315\cdot 0{,}1330\right)\right] = 0{,}00005.$$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Используя формулу (53), находим:

$$R = R_o - Q_s = 0{,}9929 - 0{,}00005 = 0{,}99285,$$

$$\widetilde{R} = \widetilde{R}_o - \widetilde{Q}_s = 0{,}9929 - 0{,}00005 = 0{,}99285.$$

Из анализа полученных результатов видно, что использование точного и приближенного методов преобразования логического треугольника в эквивалентную по надежности логическую звезду и логической звезды в эквивалентный по надежности треугольник для высоконадежной системы, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях, дало одинаковый результат.

Выводы

1. Предложена методика оценки надежности сложных по структуре систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях.

2. Предлагаемую методику целесообразно использовать для случая, когда $q_{oi} \leq 0{,}1$ и $q_{si} \leq 0{,}1$ где $i = \overline{1, n}$.

Список литературы

1. Козлов, Б.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б.А. Козлов, И.С. Ушаков. – М.: Советское радио, 1975. – 472 с.
2. Ковалев, А.П. Метод расчета надежности сложных систем электроснабжения с учетом восстановления элементов / А.П. Ковалев, Л.И. Сердюк // Электричество. – 1985. – №10. – С. 52-53.
3. Рябинин, И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем / И.А. Рябинин. – 2-е изд. – Л.: Судостроение, 1971. – 456 с.
4. Надежность и эффективность в технике: Справочник. Т.5: Проектный анализ надежности. – М.: Машиностроение, 1988. – 316 с.
5. Рябинин, И.А. Логико-вероятностная теория безопасности технических систем / И.А. Рябинин, Ю.М. Парфенов, О.Д. Цыпин // Электричество. – 1994. – №7. – С. 35-40.
6. Разгильдеев, И.А. О надежности систем электроснабжения угольных шахт / И.А. Разгильдеев, А.П. Ковалев, Л.И. Сердюк // Уголь Украины. – 1985. – №1. – С. 18-22.
7. Ковалев, А.П. Применение логико-вероятностных методов для оценки надежности структурно сложных схем / А.П. Ковалев, А.В. Спиваковский // Электричество. – 2000. – №9. – С. 66-70.
8. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
9. Ковалев, А.П. О преобразовании «звезда-треугольник» при расчетах надежности сложных по структуре схем / А.П. Ковалев, А.В. Спиваковский // Электричество. – 1989. – №10. – С. 70-74.
10. Кулик, Б.А. Логико-вероятностные методы и алгебра кортежей: В сб. «Теория, информационная техника моделирования безотказности сложных систем». – Санкт-Петербург: ИПМАШРАН, Препринт 123. Вып.1995. – 5 с.
11. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВУЗов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 544 с.
12. Billinton, R. Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1996-1999 / R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, L. Settling // IEEE Transactions on Power Systems. – Vol.16. Iss.4. – 2001. – P. 17-19.
13. Billinton, R. Reliability Evaluation of Power Systems / R. Billinton, R. N. Allan. // New York Plenum Press, 1986. – 540 p.
14. Singh, C. System Reliability Modeling and Evaluation / C. Singh, R. Billinton. – London: Hutchinson Educational, 1977. – 248 p.
15. Конесев, С.Г. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем [Электронный ресурс] / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №1. – Режим доступа: https://www.science-education.ru
16. Ковалев, А.П. Оценка надежности сложных по структуре невосстанавливаемых систем // А.П. Ковалев, Д.И. Воронин, Д.Ю. Дьяченко // Инновационные перспективы Донбасса: материалы III Международной научно-практической конференции, 24-25 мая 2017 г., г. Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 266-271.
17. Гришко, А.К. Определение показателей надежности структурных элементов сложной системы с учетом отказов и изменения параметров / А.К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – №2 (16). – С. 51-57.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

A.P. Kovalev /Dr. Sci. (Eng.)/, D.I. Voronin, A.S. Petrenko
Donetsk National Technical University (Donetsk)

RELIABILITY CALCULATION OF STRUCTURALLY COMPLEX NONRECOVERABLE SYSTEMS, THE ELEMENTS OF WHICH MAY BE IN THREE INCOMPATIBLE STATES

Background. *For highly reliable nonrecoverable systems, the elements of which may be in three incompatible sates (operable; failure of the open circuit type; failure to trigger) using the transformation of "triangle-star" and "star-triangle" the method of reliability calculations proposed, which differs from the known ones in the obtained simplified formulas of transitions "triangle-star" and "star-triangle", which significantly reduced the volume and complexity of calculations. The accuracy of calculations according to the proposed method is not inferior to the existing tested methods (see calculation example).*

Materials and/or methods. *Using exact formulas of transformation of the logical triangle into the equivalently reliable star and the formula of transitions from the logical star to the equivalently reliable triangle for nonrecoverable structurally complex systems, the elements of which can be in three incompatible sates, and if the condition met (q_{oi}≤0,1; q_{si}≤0,1), the simplified formulas of transitions "triangle – star" and "star – triangle" obtained which were the development basis of engineering methods of reliability calculations of highly reliable systems.*

Results *The use in highly reliable systems of the proposed simplified formulas of transitions from a logical triangle to the equivalently reliable star and the formula of transitions from a logical star to equivalently reliable triangle, taking into account two incompatible types of failures of system components, an engineering method for calculation of system reliability obtained with consideration of the open circuit type failure and type of failures in operation of protection means.*

Conclusion. *The end result of this work is the proposed method of assessment of the reliability of nonrecoverable structurally complex systems, the elements of which may be incompatible in three states (operable; failure of the open circuit type; failure to trigger). The example of calculations is given.*

Keywords: *reliability, system, complex structure, bridge structure, triangle, star, the probability of failure, open circuit type failure, failure to trigger, the probability of trouble-free operation.*

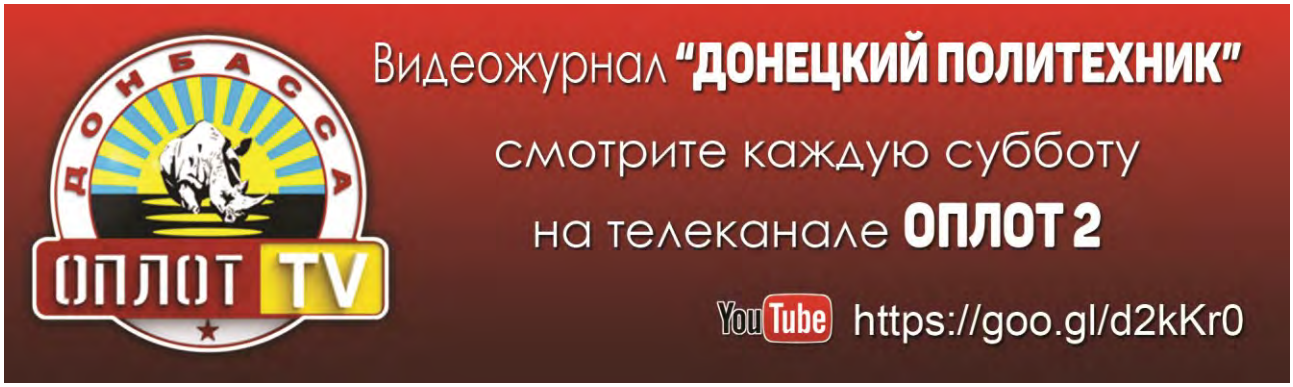
Сведения об авторах

А.П. Ковалев
Телефон: +380 (95) 671-37-28
Эл. почта: AbrecAP@mail.ru

А.С. Петренко
Телефон: +380 (95) 850-50-95
Эл. почта: andreyskiff@gmail.com

Д.И. Воронин
Телефон: +380 (66) 802-78-79
Эл.почта: den9.sport@mail.ru

Статья поступила 20.12.2017 г.
© А.П. Ковалев, Д.И. Воронин, А.С. Петренко, 2018
Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 621.316.722.076.12

А.П. Ковалев /д.т.н./, Д.Ю. Дьяченко, А.А. Мартынов
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СИСТЕМ, ЭЛЕМЕНТЫ КОТОРЫХ МОГУТ НАХОДИТЬСЯ В ТРЕХ НЕСОВМЕСТНЫХ СОСТОЯНИЯХ

С использованием понятий «сечение» и «минимальное сечение» предложен метод оценки надежности сложных по структуре систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях: работоспособном, отказавшем – отказ типа обрыв цепи и отказавшем – отказ типа короткое замыкание. Приведен пример расчета.

Ключевые слова: *система, минимальное сечение, сложная схема, вероятность, узел нагрузки.*

Постановка проблемы

Для оценки надежности сложных невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях, используют метод минимальных сечений [1,2].

Следует разобрать новый принцип построения схем замещения для оценки надежности сложных невосстанавливаемых систем таким образом, чтобы этот метод позволил оценивать надежность систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях (работоспособное, неработоспособное – отказ типа обрыв цепи, неработоспособное – отказ типа короткое замыкание). Это позволит учитывать в схемах замещения систем электроснабжения отказы в срабатывании защитных коммутационных аппаратов и таким образом значительно повысить точность расчетов.

Анализ последних исследований и публикаций

Для оценки надежности сложных невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях, известны три метода, основанные на использовании: разложения сложной структуры по базовому элементу, применения преобразований треугольник-звезда и звезда-треугольник, а также на использовании алгебры кортежей [3-6].

Все предлагаемые методы достаточно сложны в использовании для инженерных расчетов, поэтому усовершенствование метода минимальных сечений позволит достаточно просто получить нижнюю оценку вероятности безотказной работы системы при учете двух видов несовместных отказов ее элементов.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является совершенствование метода оценки надежности сложных невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях.

Основной материал исследования

К невосстанавливаемым будем относить такие системы, восстановление которых по каким-либо причинам невозможно в рассматриваемый период времени [1].

Под системой в данном случае будем понимать совокупность взаимосвязанных, конструктивно независимых изделий, которые обладают свойством перестраивать свою структуру в результате случайного повреждения ее элементов, без нарушения (либо частичного нарушения) выполняемой задачи.

Элементы с тремя несовместными состояниями: работоспособное, отказ типа обрыв цепи и отказ типа короткое замыкание (КЗ) можно выделить в таких системах, как водопровод, воздухоподающие трубопроводы, газопроводы, продуктопроводы и т.п.

Аналогами элементов с тремя состояниями в таких системах могут быть краны, вентили различных типов, запорная арматура, заглушки и другие виды прерывателей потока (жидкости, газа и т.д.), для которых в неработоспособном состоянии поток не прерывается (короткое замыкание) или не передается (обрыв цепи) [3].

Защитный коммутационный аппарат и электрооборудование, которое входит в зону действия его автоматических средств защиты, будем рассматривать как элемент системы, который может находиться в трех несовместных состояниях.

Например, при КЗ в элементе сети, который находится в зоне действия релейной защиты (РЗ) коммутационного аппарата, происходит отключение его от источника электроснабжения. Такие повреждения будем относить к отказам типа обрыв цепи.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

К отказам типа короткое замыкание будем относить такие повреждения: КЗ в защищаемом элементе сети, при котором происходит отказ в срабатывании автоматической системы отключения коммутационного аппарата, т.е. когда через данный коммутационный аппарат проходит сквозной аварийный ток, а система его РЗ не срабатывает.

Для оценки надежности технических систем широкое распространение получили элементные методы [7-17]. В этих методах предполагается, что электрооборудование в схемах замещения систем электроснабжения состоит из самостоятельных (в смысле анализа надежности) элементов.

Под узлами схемы замещения понимаются физические пункты, которые непосредственно связаны не менее чем с тремя направлениями передачи энергии, т.е. это обычно сборные шины или секции распределительных пунктов [9].

С использованием принципиальной схемы системы электроснабжения составляется схема замещения для оценки надежности потребителей, которые получают электроэнергию от рассматриваемого узла нагрузки.

Все независимые источники электроснабжения системы объединяются в одну точку, и она считается абсолютно надежной и является входом схемы замещения [8-10].

Все повреждения в схеме электроснабжения выше выбранной точки входа в расчетах не учитываются.

Под элементом i $(i=\overline{1,n})$ в схеме замещения системы электроснабжения будем понимать совокупность оборудования: защитный коммутационный аппарат и электрооборудование, которое входит в зону действия его РЗ.

Выходом схемы замещения системы электроснабжения являются сборные шины, от которых получают электроэнергию потребители.

Если отказ i-го элемента (отказ типа обрыв цепи) не влияет на работоспособность граничных ему узлов, то в этом случае расчетная схема замещения совпадает с электрической [9].

Предположим, что все рассматриваемые элементы, из которых состоит система, могут отказывать независимо друг от друга; каждый элемент системы может находиться в трех несовместных состояниях: работоспособном, неработоспособном – отказ типа обрыв цепи, неработоспособном – отказ типа короткое замыкание; потоки отказов элементов типа обрыв цепи и типа короткое замыкание – простейшие; пропускная способность элементов не ограничена, также как и способность сдерживать поток энергии (жидкости, газа, электрического тока) независимо от количества короткозамкнутых элементов; после выхода из строя элемент не восстанавливается (не заменяется новым) в рассматриваемый период времени [3].

Обозначим через P_i вероятность безотказной работы i-го элемента системы, q_{Oi} – вероятность появления отказов в i-м элементе типа обрыв цепи, а через q_{Si} – вероятность появления отказов в i-м элементе типа короткое замыкание. Эти три состояния составляют полную группу несовместных событий.

$$P_i + q_{Oi} + q_{Si} = 1. \qquad (1)$$

Индексы O и S в формуле (1) указывают на то, что учитываются повреждения элемента, которые приводят к отказам типа обрыв цепи либо отказам типа короткое замыкание, соответственно.

В случае, если элементы системы подвержены двум типам несовместных отказов: отказ типа обрыв цепи и отказ типа короткое замыкание, вероятность его отказов в течение времени t можно определить следующим образом [4]:

$$q_{Oi}(t) = \frac{\lambda_{Oi}}{\lambda_{Oi} + \lambda_{Si}} \cdot [1 - e^{(\lambda_{Oi}+\lambda_{Si})t}]; \qquad (2)$$

$$q_{Si}(t) = \frac{\lambda_{Si}}{\lambda_{Oi} + \lambda_{Si}} \cdot [1 - e^{(\lambda_{Oi}+\lambda_{Si})t}], \qquad (3)$$

где λ_{Oi}, λ_{Si} – постоянные интенсивности отказов i-го элемента при учете его отказов типа обрыв цепи и типа короткое замыкание, соответственно; i – текущее время работы i-го элемента системы.

Под вероятностью безотказной работы невосстанавливаемой системы, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях, будем принимать меру ее надежности, которая характеризуется вероятностью того, что в течение заданного интервала времени не произойдут такие случайные события, в результате которых разрывается связь или проходит сквозной аварийный ток между входом и выходом схемы замещения, при условии, что в начальный момент времени все ее элементы находились в работоспособном состоянии.

Для невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях, справедлива формула:

$$R_H = 1 - Q_{OH} - Q_{SH}, \qquad (4)$$

где R_H – нижняя оценка вероятности того, что не произойдут такие случайные события, в результате которых разорвется связь или пройдет

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения; Q_{OH}, Q_{SO} – нижняя оценка вероятности того, что произойдет разрыв связи или пройдет сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения, соответственно.

Под простой по определению схемой замещения системы будем понимать схему, элементы которой могут соединиться последовательно, параллельно, последовательно-параллельно либо параллельно-последовательно.

Для простой по определению схемы замещения системы, которая состоит из n логически последовательно соединенных элементов, отказ типа обрыв цепи любого из i элементов $(i=\overline{1,n})$, приводит к разрыву связи между узлами «вход» и «выход».

Если заданы вероятности отказов элементов схемы замещения q_{Oi}, то вероятность разрыва связи между узлами «вход» и «выход» Q_O определим следующим образом:

$$Q_O = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - q_{Oi}). \qquad (5)$$

В том случае, если у каждого из n логически последовательно соединенных элементов произойдет отказ типа короткое замыкание в каждом из i элементов, это приведет к тому, что между узлами «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток.

Если заданы вероятности отказов элементов схемы замещения q_{Si}, то вероятность Q_S того, что между узлами «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток, найдем с помощью формулы:

$$Q_S = \prod_{i=1}^{n} q_{Si}. \qquad (6)$$

Используя формулы (4-6), находим для системы, которая состоит из n логически последовательного соединения элементов, вероятность R_n того, что не пройдут такие случайные события, в результате чего разорвется связь или пройдет сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения:

$$R_n = \prod_{i=1}^{n} (1 - q_{Oi}) - \prod_{i=1}^{n} q_{Si}. \qquad (7)$$

Для простой схемы замещения системы, которая состоит из m логически параллельно соединенных элементов, отказ типа обрыв цепи любого из j элементов $(j=\overline{1,m})$ приводит к обрыву связи между узлами «вход» и «выход».

Если заданы вероятности отказов элементов схемы замещения q_{Oi}, то вероятность Q_O того, что произойдет разрыв между узлами «вход» и «выход», находим, пользуясь формулой:

$$Q_O = \prod_{j=1}^{m} q_{Oj}. \qquad (8)$$

В том случае, если у каждого из m логически параллельно соединенных элементов произойдет отказ типа короткое замыкание, это приведет к тому, что между узлами «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток.

Если заданы вероятности отказов q_{Sj} $(j=\overline{1,m})$ элементов схемы замещения, которая состоит из m логически параллельно соединенных элементов, тогда Q_S – вероятность того, что между узлами «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток. Найдем Q_S, используя формулу:

$$Q_S = 1 - \prod_{j=1}^{m} (1 - q_{Sj}). \qquad (9)$$

Подставив формулы (8-9) в формулу (4), находим для системы, которая состоит из m логически параллельно соединенных элементов, вероятность R_m того, что не произойдут такие случайные события, в результате которых рвется связь или пройдет сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения:

$$R_m = \prod_{j=1}^{m} (1 - q_{Sj}) - \prod_{j=1}^{m} q_{Oj}. \qquad (10)$$

Формулы (7) и (10) справедливы при выполнении условия: $q_{Oi}+q_{Si}<1$, $q_{Oj}+q_{Sj}<1$ и получены различными способами [4,5].

Под сложной по структуре схемой замещения системы будем понимать схему, в состав которой входит хотя бы одна группа элементов, соединенных в виде логической звезды или треугольника.

Для приведения сложной схемы замещения, элементы которой подвергаются отказам типа обрыв цепи, к схеме простой воспользуемся понятиями «сечение» и «минимальное сечение» [1].

Сложную по определению схему замещения системы, при учете двух несовместных типов отказов элементов (типа обрыв цепи и типа короткое замыкание), можно заменить двумя эквивалентными по надежности простыми, используя понятия «сечение» и «минимальное сечение».

Под отказом сложной по определению схемы замещения системы, при учете отказов ее элементов типа обрыв цепи будем понимать появ-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ление такого случайного события, в результате которого происходит повреждение некоторых ее элементов и прерывается связь между ее узлами «вход» и «выход» (между источниками энергоснабжения и его потребителями).

Под сечением C схемы замещения сложной системы будем понимать совокупность элементов, выход из строя которых (отказ типа обрыв цепи) приводит к разрыву связи между узлами «вход» и «выход».

Под минимальным сечением $C_{\min}$ схемы замещения сложной системы будем понимать сечение, у которого предполагается, что хотя бы один элемент оказался абсолютно надежным, в результате чего отказы типа обрыв цепи оставшихся в этом сечении элементов не будут более составлять сечение, так как при этом не происходит разрыв связи между входом и выходом.

С использованием исходной схемы замещения сложной структуры, понятия «минимальное сечение» $C_{\min}$, учитывая, что элементы системы подвергаются отказам типа обрыв цепи, и если заданы вероятности отказов каждого из i элементов q_{Oi} $(i=\overline{1,n})$, строятся схемы минимальных сечений.

При построении схемы замещения минимальных сечений $C_{\min}$, при учете отказов элементов типа обрыв цепи, выделяют одноэлементные, двухэлементные, трехэлементные и т.д. минимальные сечения. После получения отдельных групп минимальных сечений их соединяют последовательно между собой, начиная от минимального сечения, которое состоит из одного или двух параллельно соединенных элементов, и заканчивая минимальным сечением, которое состоит из максимально возможного числа параллельно соединенных элементов.

Используя простую по определению схему замещения минимальных сечений, формулы (5) и (8), определяем нижнюю оценку ее вероятности отказов Q_{OH} [1].

Под отказом сложной схемы замещения системы, при учете отказов элементов типа короткое замыкание, будем понимать появление такого случайного события, в результате которого между узлами «вход» и «выход» схемы замещения протекает сквозной аварийный ток.

Под сечением $\widetilde{C}$ сложной схемы замещения системы будем понимать совокупность элементов, выход из строя которых (учитывая отказы элементов типа короткое замыкание) приводит к тому, что между узлами «вход» и «выход» схемы замещения протекает сквозной аварийный ток.

Под минимальным сечением $\widetilde{C}_{\min}$ сложной схемы замещения системы будем понимать сечение, у которого предполагаем, что хотя бы один элемент оказался абсолютно надежным, в результате чего отказы типа короткое замыкание оставшихся в этом сечении элементов уже не будут более составлять сечение, так как при этом не происходит протекание сквозного аварийного тока между узлами «вход» и «выход».

Используя исходную схему замещения сложной системы, понятия $\widetilde{C}_{\min}$, учитывая, что в элементах системы наблюдаются отказы типа короткое замыкание и известны вероятности отказов каждого из ее i элементов q_{Si} $(i=\overline{1,n})$, строим схему минимальных сечений следующим образом.

Каждое минимальное сечение представляет собой минимальный набор логически последовательно соединенных элементов, отказ которых (учитывая отказ типа короткое замыкание) приводит к тому, что происходит протекание сквозного аварийного тока между узлами «вход» и «выход» схемы замещения системы.

Все полученные минимальные сечения соединяются между собой в параллельную группу, в результате чего получим простую по определению схему замещения минимальных сечений системы, при учете отказов элементов схемы замещения типа короткое замыкание.

Используя простую по определению схему замещения минимальных сечений, при учете отказов элементов типа короткое замыкание, формулы (6) и (9), находим нижнюю оценку ее вероятности отказов Q_{SH}.

Исходными данными для построения схемы минимальных сечений (учитывая отказы элементов схемы замещения типа обрыв цепи) являются: схема замещения системы с указанием всех ее узлов; номера элементов, которые соединяют узлы между собой; известны узлы «вход» и «выход»; вероятности безотказной работы элементов q_{Oi} $(i=\overline{1,n})$.

Для построения схемы замещения минимальных сечений следует заполнить табл. 1 следующим образом:

– в колонку 1 первой строки ставим символ A_O – узел, который обозначает вход в схеме замещения;

– в колонку 2 первой строки записываются номера элементов схемы замещения, непосредственно связанных с узлом A_O;

– в колонку 3 записываются эти же номера элементов схемы замещения, которые и являются сечением, его же заносят в колонку 4, так как эти сечения будут минимальными по определению;

– в колонку 1 второй строки ставим узлы A_O

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

и A_i, которые соединяются между собой с помощью элемента j $(j=\overline{1,m})$, где n – число элементов в схеме замещения, непосредственно связанных с узлом A_O;

– в колонку 2 ставим столбец, который состоит из двух строк: в верхнюю строку записываем номера элементов схемы замещения, которые соединяются с узлом A_O, а во вторую строку записываются номера элементов, которые непосредственно соединяют узел A_j с другими узлами;

– одинаковые номера элементов схемы замещения, которые входят в первую и вторую строки, вычеркиваем и получаем сечение. Полученное таким образом сечение заносим в колонку 3, затем его анализируем. Если полученное сечение является минимальным (по определению), то его заносят в колонку 4, если нет, то четвертая колонка остается незаполненной (т.е. такого минимального сечения не существует);

– после установления всех связей между узлами A_O и A_j и построения минимальных сечений к этой группе прибавляется узел A_i $(i=\overline{1,n})$, который через элемент j схемы замещения связан с узлом A_j, или он связан элементом с узлом A_O (имеет место при числе элементов, непосредственно связанных с A_O, $n\geq 3$), и процедура получения минимального сечения повторяется, т.е. в колонку 1 заносятся узлы A_O, A_j, A_i;

– в колонку 2 заносят столбец, который состоит из трех строк: в первую строку записываются номера элементов схемы замещения, которые соединяются с узлом A_O, во вторую – элементы, которые соединяются с узлом A_j, и в третью – элементы, которые соединяются с узлом A_i;

– четное число одинаковых номеров элементов, которые входят в разные строки, вычеркиваются, полученное сечение записывается в колонку 3 и после его анализа, если оно является минимальным (по определению), его записывают в колонку 4;

– описанная выше процедура получения минимальных сечений будет повторяться до тех пор, пока в первую колонку табл. 1 не будут внесены все узлы схемы замещения без последнего, который обозначает выход схемы замещения, а затем составляются столбцы из строк, каждая из которых состоит из номеров элементов, соединяющихся с данным узлом;

– вычеркиваем четное число номеров элементов схемы замещения, которые входят в разные строки, а затем получаем последнее минимальное сечение;

– номера элементов каждой строки колонки 4 соответствуют определенному минимальному сечению, которое представляется в виде их параллельного соединения (отказ элементов данного минимального сечения приводит к тому, что связь между узлами «вход» и «выход» будет нарушена);

– последовательное соединение минимальных сечений позволяет получить расчетную схему для определения нижней оценки вероятности отказов системы при учете отказов ее элементов типа обрыв цепи.

Для получения схемы замещения минимальных сечений, при учете отказов элементов системы типа короткое замыкание, следует заполнить табл. 2, используя следующие правила:

– в первый столбец первой строки заносится минимальное число узлов схемы замещения, начиная с A_O – узел входа, и заканчивая узлом выхода – A_n $(i=\overline{1,n})$, через которые может пройти сквозной аварийный ток;

Табл. 1. Алгоритм получения минимальных сечений при учете отказов элементов схемы замещения типа обрыв цепи

№ строки	Узел схемы замещения	Элементы связи между узлами	Сечение	Минимальное сечение
0	1	2	3	4
1				
2				
...				

Табл. 2. Алгоритм получения минимальных сечений при учете отказов элементов схемы замещения типа короткое замыкание

№ строки	Минимальное число узлов между входом A_O и выходом A_n	Элементы связи между узлами, i	Сечение	Минимальное сечение
0	1	2	3	4
1				
2				
…				

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

– во второй столбец первой строки записываются номера элементов схемы замещения, которые соединяют между собой отдельные узлы, занесенные в первый столбец первой строки;

– в третий столбец первой строки схемы замещения записываем номера элементов второго столбца первой строки, повреждения которых (отказ типа короткое замыкание) приводят к тому, что через узлы A_O и A_n пройдет сквозной аварийный ток, т.е. получится сечение;

– анализируем полученное сечение: если оно получилось минимальным (по определению), то номера его элементов записываем в колонку 4 первой строки, а если нет – четвертая колонка остается незаполненной, т.е. такого минимального сечения не существует;

– после получения первого минимального сечения процедура повторяется до тех пор, пока не будут перечислены все существующие в приведенной схеме замещения минимальные сечения;

– каждое полученное минимальное сечение (табл. 2, четвертый столбец) представляется в виде последовательно соединенных элементов (номера элементов занесены в колонку 4);

– параллельное соединение всех полученных минимальных сечений позволяет получить расчетную схему для определения нижней оценки вероятности отказов системы при учете отказов ее элементов типа короткое замыкание.

С использованием полученных алгоритмов построения схем минимальных сечений с учетом двух несовместных типов отказов элементов схемы замещения (отказ типа обрыв цепи и отказ типа короткое замыкание) – составляются схемы замещения минимальных сечений. Используя формулы (5), (8) и (6), (9), заданные (из условия задачи) вероятности q_{Oi}, q_{Si} $(i=\overline{1,n})$ элементов схемы замещения, можно определить нижнюю оценку Q_{OH} вероятности того, что не произойдет разрыв связи между узлами «вход» и «выход» схемы замещения и Q_{SH} вероятности того, что между узлами «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной аварийный ток.

Нижняя оценка вероятности R_H того, что не произойдет разрыв связи или не пройдет сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения, определяется с помощью формулы (4).

Описанная выше методика построения схем замещения минимальных сечений позволяет оценивать надежность сложных систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях.

Пример. Для схемы замещения системы (рис. 1) заданы следующие исходные данные:

q_{O1}=0,0127, q_{O2}=0,0327, q_{O3}=0,0182, q_{O4}=0,0335,
q_{O5}=0,0721, q_{O6}=0,0117, q_{O7}=0,0823,
q_{S1}=0,0107, q_{S2}=0,0182, q_{S3}=0,0115, q_{S4}=0,0132,
q_{S5}=0,0128, q_{S6}=0,0173, q_{S7}=0,0125.

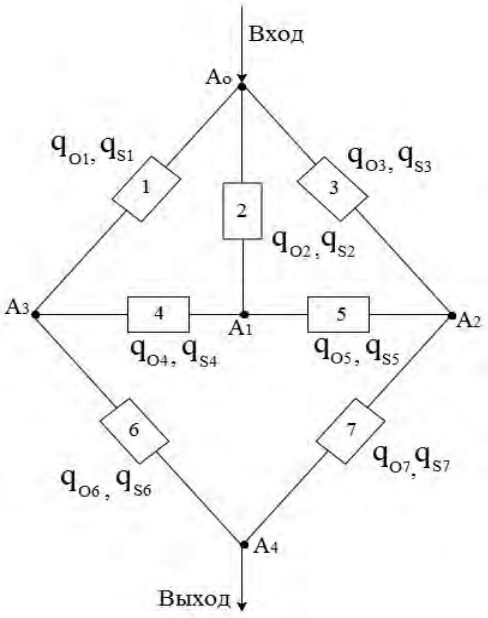


Рис. 1. Схема замещения системы

Табл. 3. Алгоритм получения минимальных сечений при учете отказов элементов схемы замещения типа обрыв цепи

№ строки	Узел схемы замещения	Элементы связи между узлами	Сечение	Минимальное сечение
0	1	2	3	4
1	A_0	1.2.3	1.2.3	1.2.3
2	$A_0 + A_1$	1.2.3, 2.4.5	1.3.4.5	1.3.4.5
3	$A_0 + A_2$	1.2.3, 3.5.7	1.2.5.7	1.2.5.7
4	$A_0 + A_3$	1.2.3, 1.4.6	2.3.4.6	2.3.4.6
5	$A_0, A_1 + A_3$	1.2.3, 2.4.5, 1.4.6	3.5.6	3.5.6
6	$A_0, A_1 + A_2$	1.2.3, 2.4.5, 3.5.7	1.4.7	1.4.7
7	$A_0, A_2 + A_3$	1.2.3, 3.5.7, 1.4.6	2.4.5.6.7	-
8	$A_0, A_1, A_3 + A_2$	1.2.3, 1.4.6, 2.4.5, 3.5.7	6.7	6.7

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 4. Алгоритм получения минимальных сечений при учете отказов элементов схемы замещения типа короткое замыкание

№ строки	Минимальное число узлов между входом A_O и выходом A_n	Элементы связи между узлами, i	Сечение	Минимальное сечение
0	1	2	3	4
1	$A_0 + A_2 + A_4$	3.7	3.7	3.7
2	$A_0 + A_3 + A_4$	1.6	1.6	1.6
3	$A_0 + A_1 + A_2 + A_4$	2.5.7	2.5.7	2.5.7
4	$A_0 + A_1 + A_3 + A_4$	2.4.6	2.4.6	2.4.6
5	$A_0 + A_2 + A_1 + A_3 + A_4$	3.5.4.6	3.5.4.6	3.5.4.6
6	$A_0 + A_3 + A_1 + A_2 + A_4$	1.4.5.7	1.4.5.7	1.4.5.7

Определить нижнюю оценку R_H того, что не произойдет разрыв связи или не пройдет сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения. Используя описанный выше алгоритм получения схем минимальных сечений, заполняем табл. 3 и 4.

Сечение № 7 (2.4.5.6.7) (см. табл. 3) не является минимальным, так как включает в себя уже минимальное сечение № 8 (6.7), поэтому колонка 4 в этом случае остается пустой. Используя полученную четвертую колонку табл. 3, строим схему минимальных сечений (рис. 2):

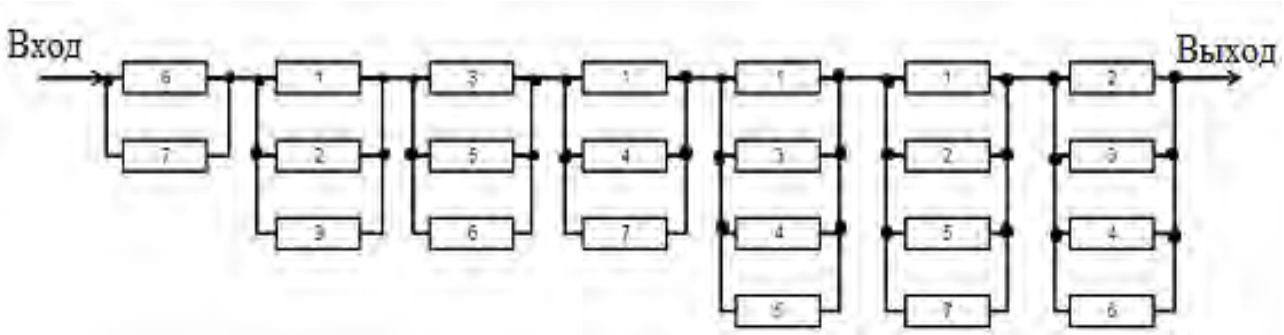


Рис. 2. Схема минимальных сечений при учете отказов элементов типа обрыв цепи

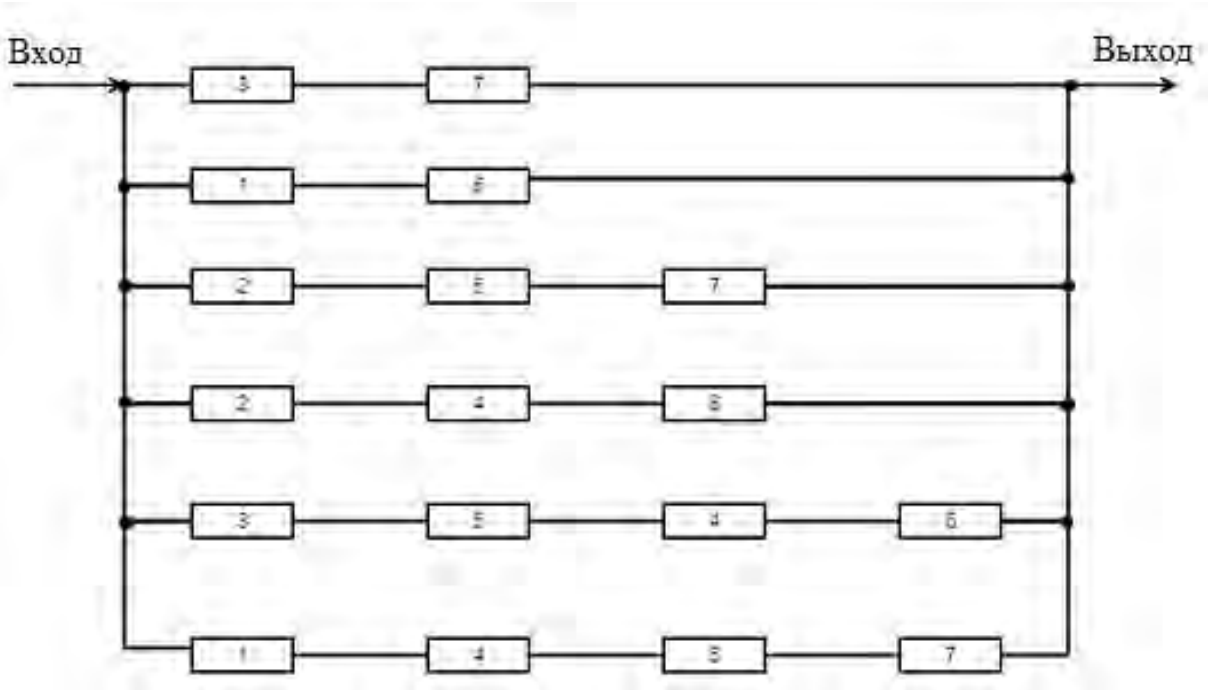


Рис. 3. Схема минимальных сечений при учете отказов элементов типа короткое замыкание

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Используя схему замещения (см. рис. 2), формулы (5), (8), находим:

$$Q_{OH}=1-(1-q_{O6}q_{O7})\cdot(1-q_{O1}q_{O2}q_{O3})\cdot(1-q_{O3}q_{O5}q_{O6})\times \times(1-q_{O1}q_{O4}q_{O7})\cdot(1-q_{O1}q_{O3}q_{O4}q_{O5})\times \times(1-q_{O1}q_{O2}q_{O5}q_{O7})\cdot(1-q_{O2}q_{O3}q_{O4}q_{O6}).$$

Подставляем в полученную формулу значения: q_{Oi}, $i=\overline{1,7}$, заданные в условии примера, получим: Q_{OH}=0,0011.

Для получения схемы замещения минимальных сечений, для случая, когда ее элементы (см. рис. 1) подвергаются отказам типа короткое замыкание, необходимо заполнить табл. 4, используя предложенный ранее алгоритм.

Используя информацию, приведенную в табл. 4 (колонка 4), расчетную схему представим в виде рис. 3.

Используя полученную схему замещения (см. рис. 3), формулы (6), (9), найдем нижнюю оценку Q_{SH} вероятности того, что произойдет событие, при котором сквозной аварийный ток пройдет между узлами «вход» и «выход» схемы замещения:

$$Q_{SH}=1-(1-q_{S3}q_{S7})\cdot(1-q_{S1}q_{S6})\cdot(1-q_{S2}q_{S5}q_{S7})\times \times(1-q_{S2}q_{S4}q_{S6})\cdot(1-q_{S3}q_{S5}q_{S4}q_{S6})\cdot(1-q_{S1}q_{S4}q_{S5}q_{S7})$$

Используя исходные данные примера, подставляем их в полученную формулу: Q_{SH}=0,0003.

Вероятность того, что не произойдет разрыв связи или не пройдет сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения, найдем, используя формулу (4):

$$R_H = 1 - Q_{OH} - Q_{SH}.$$

Подставим полученные значения Q_{OH} и Q_{SH} в формулу и определим:

$$R_H = 1 - 0{,}0011 - 0{,}0003 = 0{,}9986.$$

Аналогичный результат был получен при решении этой задачи точным методом расчетов с использованием способа разложения сложной структуры по базисному элементу [3].

Выводы

Предложена инженерная методика расчетов надежности сложных невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях.

Точность предлагаемой методики для высоконадежных систем (вероятность отказов элементов схемы замещения меньше либо равна 0,1) не уступает точным, апробированным методам.

Список литературы

1. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев и др. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
2. Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2007. – 276 с.
3. Ковалев, А.П. Применение логико-вероятностных методов для оценки надежности структурно-сложных систем / А.П. Ковалев, А.В. Спиваковский // Электричество. – №9. – 2000. – С. 66-70.
4. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем: Пер. с англ. / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
5. Ковалев, А.П. О преобразовании «Звезда-треугольник» при расчетах надежности сложных по структуре схем / А.П. Ковалев, А.В. Спиваковский // Электричество. – №10. – 1998. – С.70-74.
6. Кулик, Б.А. Логико-вероятностные методы и алгебра кортежей. В сб.: Теория и информационная техника моделирования безопасности сложных систем. – Санкт-Петербург: ИПМАШРАН, 1995. – Препринт 123, Вып.5. – С. 23-28.
7. Нечипоренко, В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надежность) / В.И. Нечипоренко. – М.: Советское радио, 1977. – 214 с.
8. Эндрени, Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах: Пер. с англ. / Дж. Эндрени. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.
9. Фонин, Ю.А. Расчет надежности систем электроснабжения / Ю.А Фонин, А.М. Харченко // Электричество. – 1982. – №8. – С. 5-10.
10. Белоусенко, И.В. О расчете надежности систем электроснабжения газовых промыслов / И.В. Белоусенко и др. // Электричество. – 2004. – №3. – С. 22-27.
11. Ковалев, А.П. Метод расчета надежности сложных схем систем электроснабжения с учетом восстановления элементов / А.П. Ковалев, Л.И. Сердюк // Электричество. – 1985. – №10. – С. 52-53.
12. Billinton, R. Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1996-1999 / R. Billinton, M.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Fotuhi-Firuzabad, L. Settling // IEEE Transactions on Power Systems. – Vol.16. – 2001. – P. 17-19.
13. Billinton, R. Reliability Evaluation of Power Systems / R. Billinton, R.N. Allan. London. – New York: Plenum Press, 1996. – 540 p.
14. Singh, C. System Reliability Modeling and Evaluation / C. Singh, R. Billinto. – London: Hutchinson Educational. – 1977. – 248 p.
15. Конесев, С.Г. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №1. – С. 57.
16. Ковалев, А.П. Оценка надежности сложных по структуре невосстанавливаемых систем // А.П. Ковалев, Д.И. Воронин, Д.Ю. Дьяченко // Инновационные перспективы Донбасса: материалы III Международной научно-практической конференции, 22.05.2017 г., г. Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 266-271.
17. Гришко, А.К. Определение показателей надежности структурных элементов сложной системы с учетом отказов и изменения параметров / А.К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – №2 (16). – С. 51-57.

A.P. Kovalev /Dr. Sci. (Eng.)/, D.U. Dyachenko, A.A. Martynov
Donetsk National Technical University (Donetsk)

IMPROVING THE METHOD FOR ASSESSING THE RELIABILITY OF UNRECOVERABLE SYSTEMS, THE ELEMENTS OF WHICH MAY BE IN THREE INCOMPATIBLE STATES

Background. *Using the concepts of "cross-section" and "minimum cross-section" proposed an approximate method for assessing the reliability of unrecoverable complex structure systems, which elements may be in three incompatible states (operational, failure, failure type "open circuit", failure type "short circuit"). The accuracy of the proposed method of calculating the reliability of systems does not differ from the existing tested ones. The example of the calculation given.*
Materials and/or methods. *Using the concept of "minimum cross-section" for system elements prone to short-circuit failures, the rule to obtain the minimum cross-section substitution schemes proposed, which allows estimating the probability of system failures. Using the known method for obtaining the minimum cross-sections considering failures of circuit elements of the type "open circuit" and the intended method considering failures of elements of the type "short circuit" the test equivalent circuits can be obtained which, together with the known formula, allow obtaining lower system reliability evaluation.*
Results. *With the development of the principles of receiving the "minimum cross-section" schemes, provided that the system components are prone to the failure type "short circuit" it is possible to improve the method of minimum cross sections when considering the components of the failure type "open circuit". The precision of the developed technique is not inferior to that by tested methods.*
Conclusion. *Developed the rules for building equivalent "minimum cross-sections" circuits based on two kinds of component failure (failure type "open circuit" and failure type "short circuit"), which allowed engineering technique for obtaining the lower values of the reliability of the systems studied.*

Keywords: *system, minimum cross-section, complicated scheme, probability, load component.*

Сведения об авторах
А.П. Ковалев
Телефон: +380 (95) 671-37-28
Эл. почта: abrecap@mail.ru
А.А. Мартынов
Телефон: +380 (66) 810-33-03
Эл. почта: vladeuvsem@gmail.com
Д.Ю. Дьяченко
Телефон: +380 (71) 335-96-83
Эл. почта: lbigapple94@gmail.com

Статья поступила 26.02.2018 г.
© А.П. Ковалев, Д.Ю. Дьяченко, А.А. Мартынов, 2018
Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский

УДК 621.311.001.63-52(075.8)

Э.Г. Куренный /д.т.н./, И.А. Бершадский /д.т.н./, С.Г. Джура /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПРОГРАММ CSOFT

В данной работе проанализированы существующие методы расчета систем электроснабжения, определены их достоинства и недостатки, сделаны предложения по их совершенствованию на базе разработок ученых ДонНТУ, а также сделан вывод о целесообразности предложения о внедрении их в программный продукт группы компаний CSoft (РФ), сотрудничество с которой успешно развивается в новейшее время.

Ключевые слова: *инновационные методы, система электроснабжения, CSoft.*

Постановка проблемы

Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ) имеет большой опыт в реализации международных проектов, в том числе и по созданию авторизированных центров ведущих фирм мира, в частности, в области электроэнергетики [1]. Так, в ДонНТУ успешно функционируют центры таких мировых промышленных лидеров электроэнергетики, как Simens, Schnider-Electric, Muller-Electric [2]. В связи с ориентацией ДНР на стандарты Российской Федерации ДонНТУ подписал договор о сотрудничестве с ведущей российской группой компаний CSoft, которая осуществляет консалтинг и внедрение комплексных решений в области систем автоматизированного проектирования (САПР), технологической подготовки производства (ТПП), документооборота и геоинформационных систем (ГИС) [3]. Большая часть ее решений базируется на уникальном сочетании мировых и отечественных разработок от CSoft Development, «Нанософт», Bentley, Oracle, CEA Technology, Siemens, Canon, Contex, Oce и других ведущих компаний [3]. По договору о сотрудничестве группа компаний CSoft в 2016 году предоставила ДонНТУ учебные лицензии на 9 программных продуктов по проектированию электроснабжения промышленных предприятий (каждая по 30 рабочих мест). Студенты и преподаватели ДонНТУ сердечно благодарят компанию CSoft и активно внедряют ее продукты в учебный процесс [4-6]. Очень важно, что продукты компании CSoft основаны и реализованы, в том числе на ГОСТ РФ и методиках расчетов ведущих вузов России. Здесь есть большие перспективы для сотрудничества, так как на электротехническом факультете ДонНТУ разработаны свои уникальные методики электротехнических расчетов, уровень которых подтвержден защищенными кандидатскими и докторскими диссертациями. В 2017 году компания CS_{OFT} нашла возможность расширить сотрудничество с ДонНТУ и выделила еще 15 видов программного продукта для реализации на других факультетах (это такие факультеты как горный, горно-геологический, физико-металлургический и факультет экологии и химической технологии). Уже проведены семинары с представителями промышленных предприятий, которые дали самые лучшие отзывы о программном продукте компании CSoft и его важности и полезности для внедрения [7].

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время автоматизация проектирования является одним из основных способов повышения производительности труда инженеров-проектировщиков и конструкторов. Для каждой организации, рассчитывающей сохранить и укрепить свои позиции на рынке, исключительно важным стало максимальное сокращение времени разработки, а эта цель недостижима без автоматизации процесса проектирования.

Среди электротехнических решений CSoft, которые рекомендуется применять в проектной деятельности, выделяются следующие: специализированная программа для автоматизированного выполнения проектов в части силового электрооборудования, внутреннего и наружного электроосвещения промышленных и гражданских объектов – Project StudioCS Электрика 11.0, а также EnergyCS Электрика 3.0, предназначенная для выполнения электротехнических расчетов при проектировании и эксплуатации распределительных сетей переменного тока и постоянного тока с питанием от аккумуляторных батарей [3,16].

Расчеты в программном комплексе EnergyCS Электрика 3.0, выполненные для участка цеха,

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

показали, что наряду с рядом преимуществ имеются некоторые недоработки.

Перечислим обнаруженные несоответствия.

1. База данных, поставляемая с программным комплексом, требует существенного пополнения. В частности, отсутствует марка одножильного провода АПВ, автоматические выключатели серий ВА52 и др.

2. Автоматический выбор из встроенной базы данных сечений проводов и кабелей, коммутационных и защитных аппаратов, который задекларирован в описании программы, работает со значительными ошибками или полностью отсутствует.

3. Для автоматических выключателей одного типа (например, С60) селективность подобрать не удается.

4. Не выполняются проверки «Тт!» – не обеспечена термическая стойкость кабеля, например, температура при отключении КЗ Т>160° (температура определена в соответствии с маркой кабеля в справочнике, зависит от изоляции); и «Тв!» – не обеспечено невозгорание при отказе основной защиты и срабатывании резервной, например, температура при отключении КЗ резервной защитой Т>350° для проводов АПВ.

Неясны пути исправления этих ошибок.

5. В итоговую табл. 7.4 не заносятся данные о проводах АПВ, которые были внесены в базу данных.

6. Не выбираются типы распределительных шкафов.

Вследствие этого, на наш взгляд, целесообразно внеси ряд предложений, которые позволили бы усовершенствовать рассматриваемые CAD-системы.

Цель (задачи) исследования

Целью данной статьи является аргументация позиции ДонНТУ по вопросу сотрудничества с компанией CSoft.

Основной материал исследования

У ДонНТУ есть свои разработки, которые целесообразно предложить нашим российским коллегам, чтобы быть не только потребителем программного продукта, а и тем, кто может внести посильный вклад в его совершенствование. Таким образом, проанализируем современные методы расчета систем электроснабжения и сделаем вывод о целесообразности применения того или иного метода, а также месте ученых ДонНТУ в этом процессе. В документации компании CSoft сказано о том, что в перспективе потребуется:

– совершенствование алгоритмов автовыбора оборудования;

– создание более дружественного интерфейса и мастеров работы по каждому продукту;

– учет конструктивного аспекта при создании модели;

– автоматическая сборка схемы из сохраненных фрагментов;

– прямое документирование результатов с использованием AutoCAD.

Авторы полагают, что к этим направлениям нужно добавить еще и расширение методов расчета. В дополнение к имеющимся методам (каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки) нужно добавить и методы, разработанные в ДНР. Предлагаем принять это как гипотезу статьи.

В известных публикациях интересный сравнительный анализ проблемы дан в работе [8] (табл. 1).

Каждый из указанных методов имеет свои достоинства и недостатки, а конкретная задача определяет и выбор метода ее решения. Разработчик должен владеть разными методами расчета и знать, когда их применить. Расчет нагрузок на разных уровнях электроснабжения проводится различными методами в зависимости от исходных данных и требований точности. Обычно расчет ведут от низших уровней к высшим (по напряжению).

Табл.1. Сравнительные методы расчета электрических нагрузок систем электроснабжения общего назначения [8]

Метод расчета	Формула	Пояснения
По электроемкости	$P_P = \frac{\sum Э_i \cdot M_i}{T_M}$	M_i, $Э_i$ – объем и электроемкость; $T_м$ – годовое число часов использования максимума нагрузки
По общегодовому электропотреблению	$P_P = \frac{K_M \cdot A}{T_Г}$	$K_м$ – среднегодовой коэффициент максимума; A – общегодовое электропотребление; $T_г$=8760 – число часов в году
По удельным	$P_р = \gamma \cdot F$	γ – удельная плотность нагрузки; F – площадь предприятия, района, цеха
По среднегодовому коэффициенту спроса $K_с$	$P_р = K_с \cdot P_{уст}$	$P_{уст}$ – сумма установленных мощностей; $K_с$ – коэффициент спроса
Метод упорядоченных диаграмм	$P_р = K_м \cdot K_и \cdot P_{уст}$	$P_{уст}$ – сумма установленных мощностей; $K_м$ – коэффициент максимума; $K_и$ – коэффициент использования

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Однако при проектировании крупных предприятий иногда целесообразно вести расчеты от верхних уровней к нижним. В этом случае рекомендуют пользоваться комплексным методом расчета. За основу обычно берут информационную базу аналогичного предприятия (по профилю). При этом сначала решают вопросы электроснабжения предприятия в целом, затем его комплекса цехов, а также всех потребителей, питающихся от одной распределительной подстанции [8].

Группа компаний CSoft пользуется различными методиками расчета электрических нагрузок в зависимости от отрасли производства и области применения. В частности, программный продукт Project StudioCS Электрика 10.0 производит расчеты нагрузок по методам СП31-110 [9], РТМ 36.18.32.4-92 [10] и методике ТЭП [11]. Для выбора нужного расчета необходимо зайти на страницу свойств проекта и в поле «Расчет нагрузок» выбрать необходимый метод.

Метод СП31-110 устанавливает правила проектирования и монтажа электроустановок вновь строящихся и реконструируемых жилых и общественных зданий в городах и сельских населенных пунктах. Для расчета нагрузок необходимо определить набор групп по характеру (ГХ) использования оборудования в проекте, а создание и редактирование параметров ГХ следует выполнить в настройках проекта на вкладке «ГХ СП31-110» (рис. 1).

Во время создания нового проекта по умолчанию доступны две ГХ для рабочего освещения и розеточной сети (ГХ можно добавлять в случае необходимости). Чтобы ГХ была отмечена как корректная (галочка в зеленом круге), ей необходимо задать расчетную таблицу коэффициентов спроса/одновременности (*Кс*/*Ко*).

При выборе категории ГХ будет доступен список таблиц по коэффициентам спроса для данной ГХ. Например, для двух установленных двигателей выбрана категория ГХ – «Лифтовые установки/транспортеры» (рис. 2).

Для этой ГХ станут доступны две таблицы с коэффициентами спроса из СП31-110. После определения групп по характеру нагрузки необходимо привязать установленное на план оборудование к соответствующим им ГХ. Для технологического оборудования ГХ задается в мастере «ТЗ» – технологическое задание.

Для вызова итоговой таблицы с расчетом по СП31-110 необходимо воспользоваться контекстным меню фидера. В итоге будет отображена таблица с расчетом нагрузок по СП31-110 в следующем представлении (рис. 3).

Метод РТМ 36.18.32.4-92 ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект» [10] служит для определения электрических нагрузок, которые являются исходными данными для проектирования систем электроснабжения потребителей электроэнергии всех отраслей народного хозяйства, кроме электрических нагрузок электроприемников с резкопеременным графиком нагрузки (электроприводов прокатных станов, дуговых электропечей, контактной электросварки и т.п.), промышленного электрического транспорта, жилых и общественных зданий, а также электроприемников с известным графиком нагрузки.

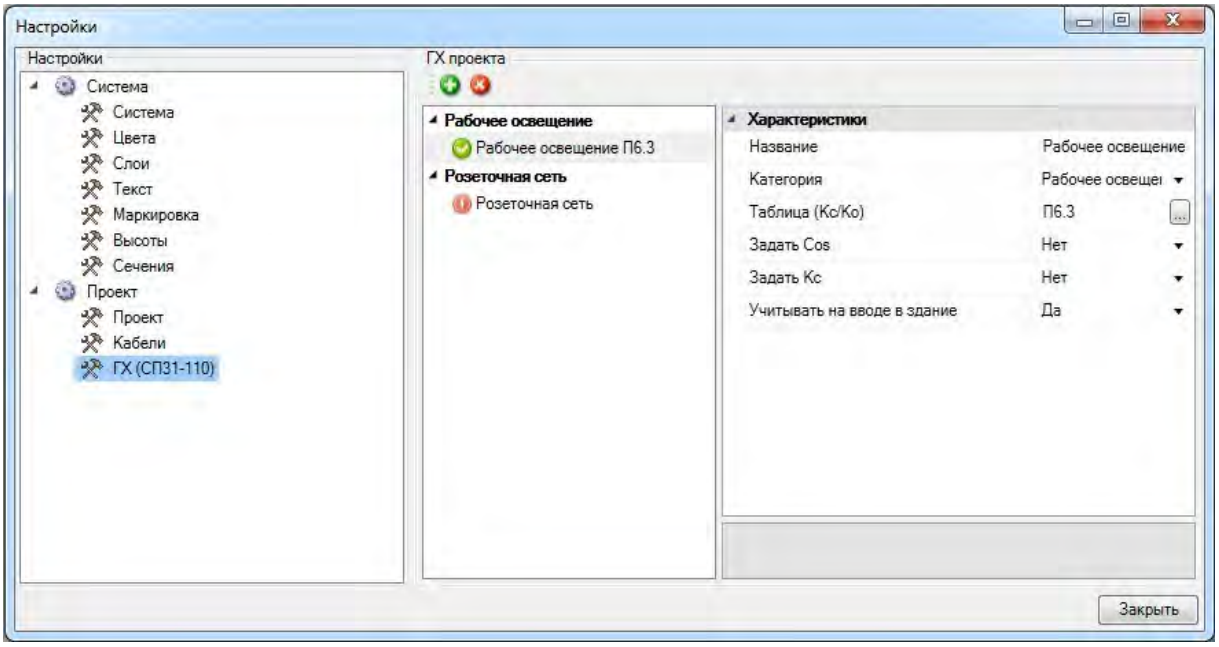


Рис. 1. Определение групповых характеристик нагрузки по методу СП31-110 в Project Studio CS Электрика 10.0

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

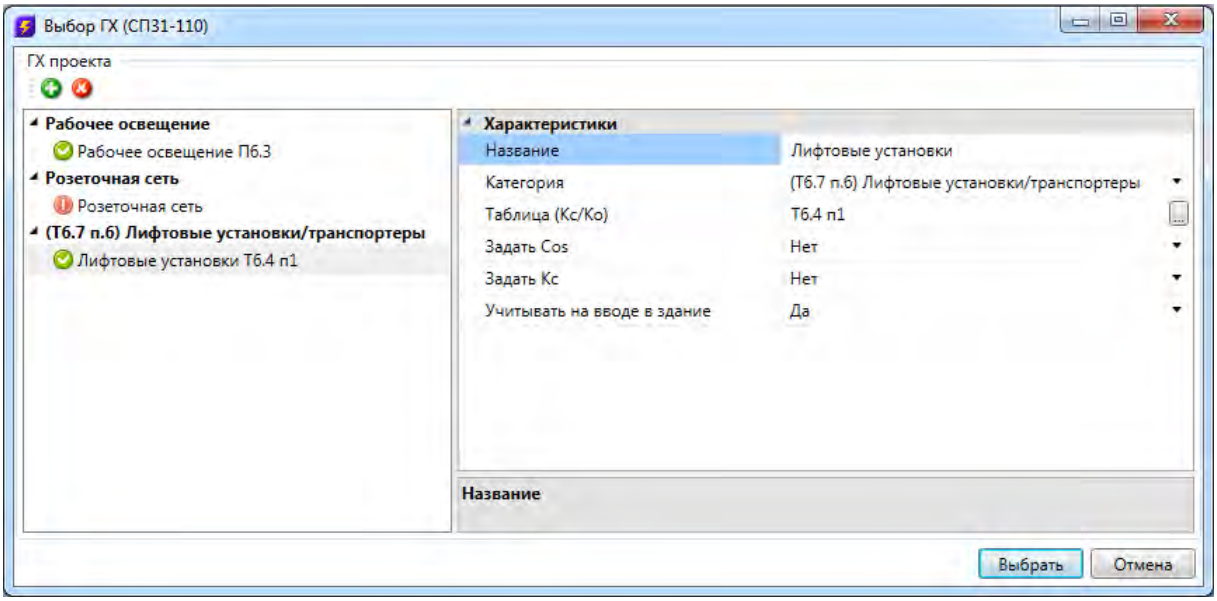


Рис. 2. Выбор категории ГХ «Лифтовые установки/транспортеры» по методу СП31-110 в Project StudioCS Электрика 10.0

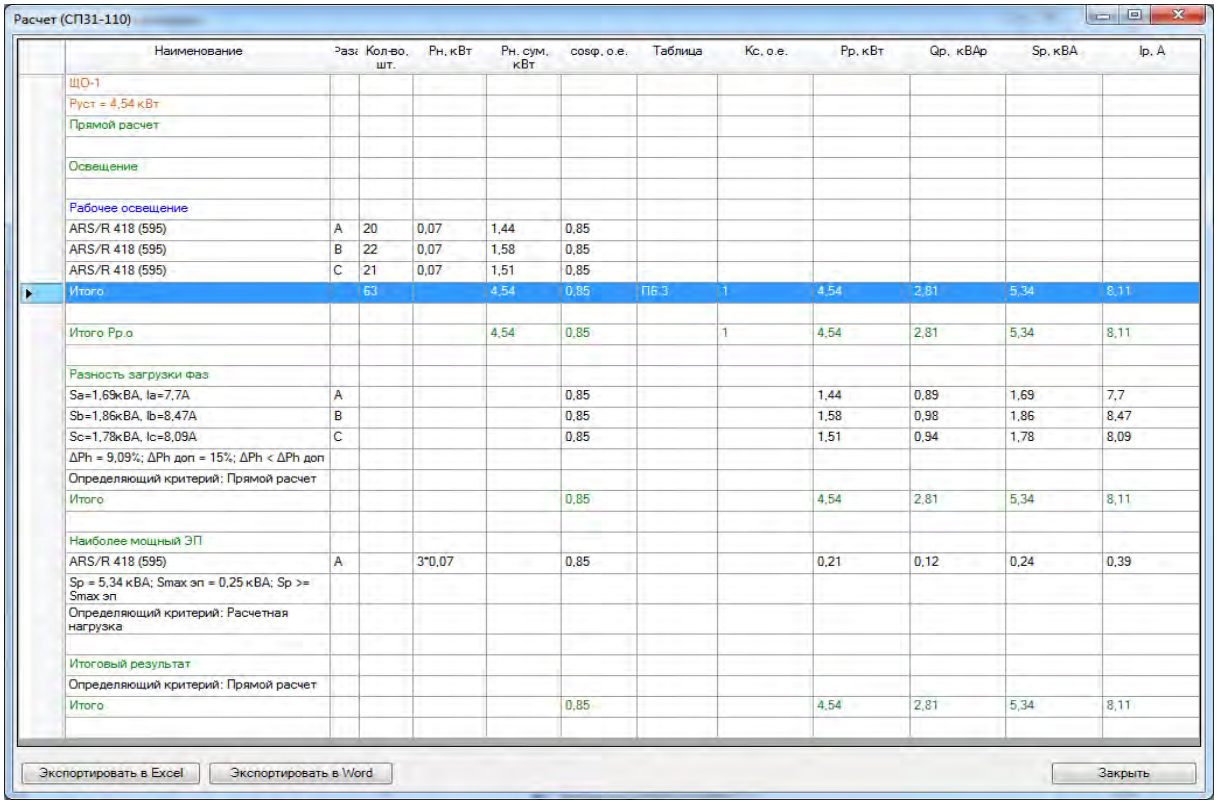


Рис. 3. Пример итоговой таблицы расчета по методу СП31-110 в Project StudioCS Электрика 10.0

Для расчета по РТМ необходимо, чтобы все силовое оборудование было привязано к соответствующим записям технологического задания. Если оборудование на плане не привязано к технологическому заданию, то в расчетах оно учитываться не будет.

Просмотр результатов расчета по РТМ 36.18.32.4-92 осуществляется по форме Ф636-92 (рис. 4).

В технологическом задании у записей технологического оборудования присутствует пункт «ТЭП: Категория», открывающий список, в котором можно выбрать группу для электроприемника.

Методика расчета нагрузок института «Теплоэлектропроект» (ТЭП). Для расчета нагрузок необходимо указать на странице свойств пункт метода расчета ТЭП.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

На странице свойств проекта для групп электроприемников по методике ТЭП задаются расчетные коэффициенты (рис. 5).

Для расчета нагрузки по методике ТЭП необходимо, чтобы все силовое оборудование было привязано к соответствующим записям технологического задания. В противном случае оно не будет учитываться в расчетах.

Просмотр результатов расчета по методике ТЭП осуществляется аналогично просмотру результатов по СП31-110 и РТМ.

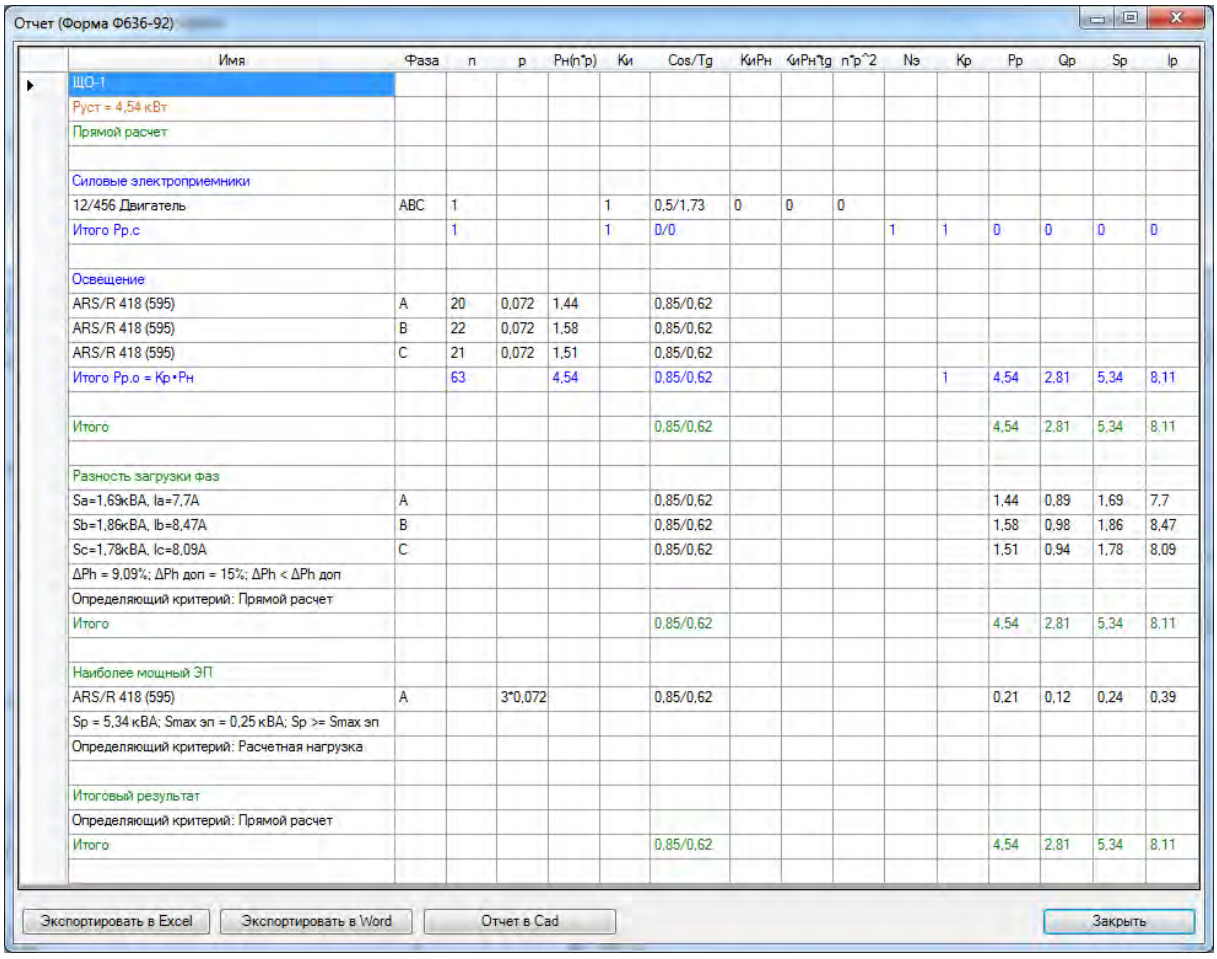
При вызове пункта «Расчет мощностей» контекстного меню фидера в окне «Электротехническая модель» выводится табличный отчет расчета нагрузок по методике ТЭП (рис. 6), также как и по двум указанным выше методам.

Программный продукт EnergyCS Электрика предназначен для выполнения расчетов электрических сетей низкого и частично среднего напряжения постоянного и переменного токов при анализе существующих и при проектировании новых систем электроснабжения. В программе осуществляется определение расчетных токов в элементах сети. По умолчанию принимается метод, учитывающий коэффициенты загрузки оборудования и коэффициенты одновременности в узлах ($K_з$ и $K_о$). Этот метод может быть эквивалентен методу расчета по коэффициенту спроса.

Кроме того, предусмотрены специальные методы, описанные в нормативной литературе (эти методы приведены в описании методики расчетов): метод института «Теплоэлектропроект» (ТЭП), рекомендуемый для собственных нужд ТЭС; метод института «Тяжпромэлектропроект» (ТПЭП), рекомендуемый для машиностроительных предприятия, ремонтных мастерских и т.п.

Результаты расчета по каждому методу также можно документировать с применением шаблона в MS Word [12].

По мнению авторов, метод кафедры ЭПГ ДонНТУ, рассмотренный ниже, можно внести в меню как один из вариантов и сравнить его применение с вышеуказанными. Это уже было сделано в учебных проектах и выявлено, что результаты расчетов по программе CSoft несколько завышены, что может быть полезно для развития производства, если оно выполнено по таким результатам, но может быть и неэкономно, если такового не планируется.



Имя	Фаза	n	p	Pн(n*p)	Ки	Cos/Tg	КиРн	КиРн*tg	n*p^2	Nэ	Кр	Pp	Qp	Sp	Ip
ЩО-1															
Руст = 4,54 кВт															
Прямой расчет															
Силовые электроприемники															
12/456 Двигатель	ABC	1			1	0,5/1,73	0	0	0						
Итого Pp.c		1			1	0/0				1	1	0	0	0	0
Освещение															
ARS/R 418 (595)	A	20	0,072	1,44		0,85/0,62									
ARS/R 418 (595)	B	22	0,072	1,58		0,85/0,62									
ARS/R 418 (595)	C	21	0,072	1,51		0,85/0,62									
Итого Pp.o = Кр•Pн		63		4,54		0,85/0,62					1	4,54	2,81	5,34	8,11
Итого						0,85/0,62						4,54	2,81	5,34	8,11
Разность загрузки фаз															
Sa=1,69кВА, Ia=7,7А	A					0,85/0,62						1,44	0,89	1,69	7,7
Sb=1,86кВА, Ib=8,47А	B					0,85/0,62						1,58	0,98	1,86	8,47
Sc=1,78кВА, Ic=8,09А	C					0,85/0,62						1,51	0,94	1,78	8,09
ΔPh = 9,09%; ΔPh доп = 15%; ΔPh < ΔPh доп															
Определяющий критерий: Прямой расчет															
Итого						0,85/0,62						4,54	2,81	5,34	8,11
Наиболее мощный ЭП															
ARS/R 418 (595)	A		3*0,072			0,85/0,62						0,21	0,12	0,24	0,39
Sp = 5,34 кВА; Smax эп = 0,25 кВА; Sp >= Smax эп															
Определяющий критерий: Расчетная нагрузка															
Итоговый результат															
Определяющий критерий: Прямой расчет															
Итого						0,85/0,62						4,54	2,81	5,34	8,11

Рис. 4. Пример итоговой таблицы расчета по методу РТМ 36.18.32.4-92 в Project StudioCS Электрика 10.0

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

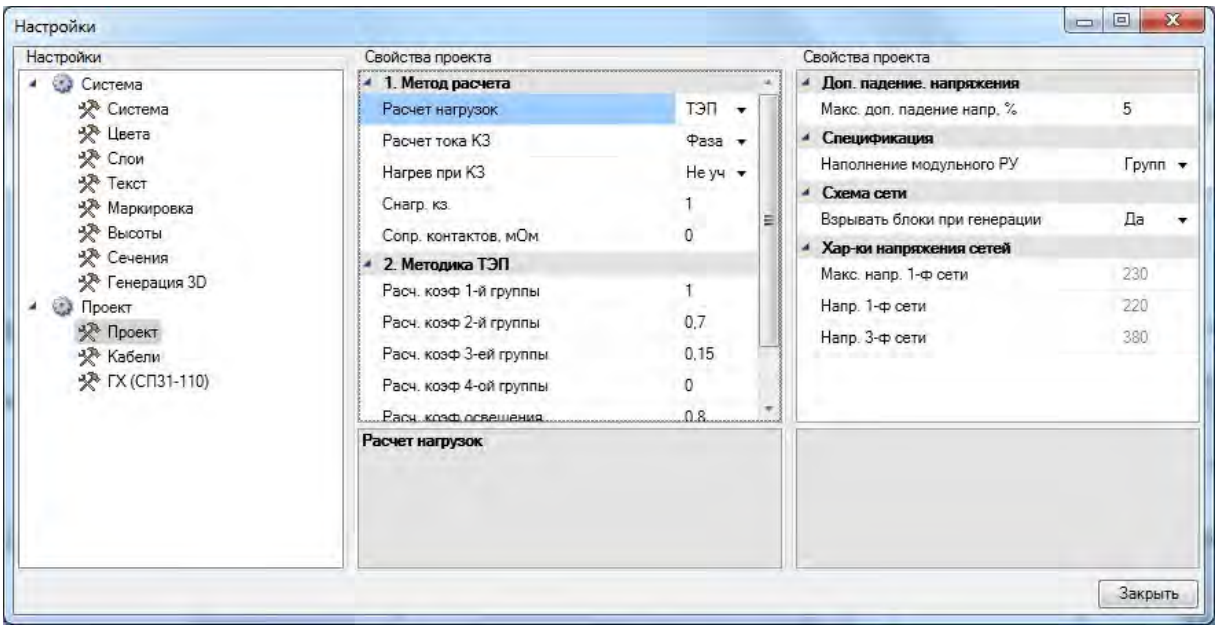


Рис. 5. Определение расчетных коэффициентов для групп электроприемников по методике ТЭП в Project StudioCS Электрика 10.0

Сравнение EnergyCS Электрика (CSoft) с конкурентными программами показало [12]:

1. Продукт Winelso (Русская промышленная компания [13]).

Недостатками являются:

– необходимость оформления документа совместно с созданием модели, а также повышенная трудоемкость во время разработки схемы;

– предлагаются упрощенные расчеты;

– не применим для энергообъектов и сложных случаев производства;

– не все расчеты раскрыты.

Достоинством является простота оформления выходной документации, так как она создается на этапе ввода модели.

2. Программа Guexpert (Московский энергетический институт [14]).

Недостатками являются:

– программа написана для MS DOS;

– выполняет только расчет токов короткого замыкания для одного заданного режима;

– отсутствует выбор оборудования.

К достоинствам можно отнести простую подготовку данных, так как задача существенно более узкая. Есть оценка селективности в отдельном модуле.

3. Программа Pixma от компании Shneider Electric [15].

Недостатком является ориентация на одного производителя оборудования. Нет соответствующих интерфейсов.

Достоинством является получение прямого решения на множестве оборудования одной фирмы.

Таким образом, на сегодня можем констатировать, что программный продукт компании CSoft весьма конкурентоспособен. Это мнение подтверждает вышеприведенный анализ. Однако всегда есть пути совершенствования, об этом написано и в документации самой компании CSoft.

На кафедре электроснабжения промышленных предприятий (ЭПГ) ДонНТУ выпущено учебное пособие по электротехническим САПР CSoft [16], системно ведется совершенствование методов расчета систем электроснабжения [17-19] и создание собственных САПР для локальных расчетов [20].

Так, согласно [19] в основу действующих Указаний [21] положен метод упорядоченных диаграмм (УД), предложенный профессором Г.М. Каяловым [22,23]. Метод сыграл значительную роль в становлении теории нагрузок и практики расчетов. Однако стремление к уменьшению объема исходной информации с целью упрощения расчетов обусловило принципиальную неточность метода упорядоченных диаграмм. В статье рассматриваются методы расчета, которые могут быть использованы для разработки новых Указаний по определению электрических нагрузок, аргументируются недостатки действующих Указаний. При этом раскрывается физический смысл предлагаемых методов, но не сама методика практических расчетов (исходные справочные данные, расчетные кривые, примеры расчетов, программа вычислений на ЭВМ). Приводятся инерционный и квадратичный методы и метод имитации, а также метод эквивалентного параметра корреляционной функции [19].

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

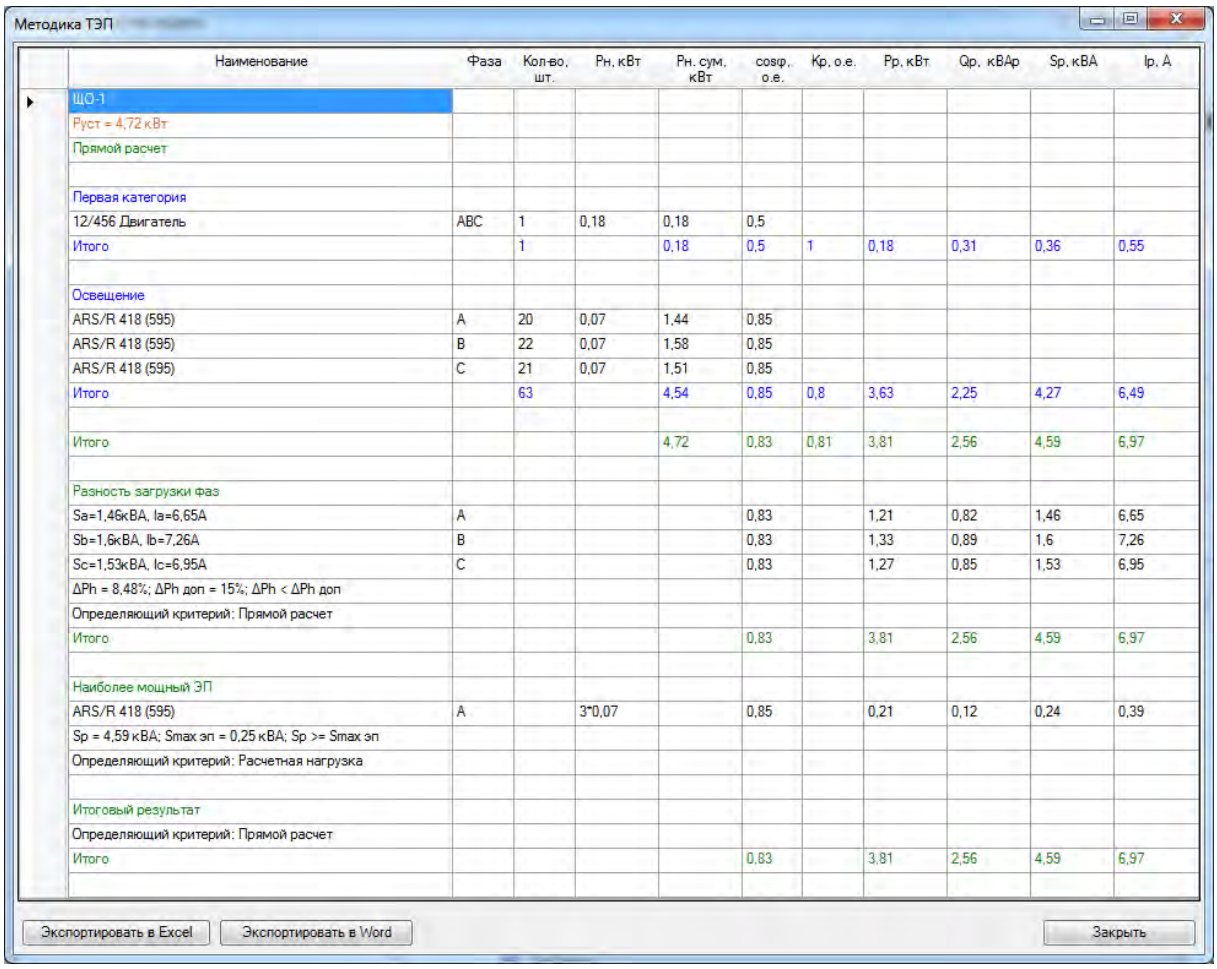


Рис. 6. Пример итоговой таблицы расчета по методике ТЭП в Project StudioCS Электрика 10.0

Авторы приходят к выводу о том, что принятое в действующих Указаниях понятие расчетной нагрузки по нагреву в виде «инерционного» максимума десятиминутной тепловой нагрузки отражает физику задачи. Понятие же «кумулятивного» максимума получасовой средней нагрузки из ПУЭ [21] приводит к противоречащим смыслу результатам.

Метод УД сыграл положительную роль в развитии теории электрических нагрузок, но в настоящее время требует замены из-за существенного завышения расчетных нагрузок. Определение расчетных электрических нагрузок по нагреву целесообразно выполнять точным методом имитации, допуская применение инженерных методов: инерционного и квадратичного.

Таким образом, предлагается пилотный проект: ввести в следующую версию программ CSoft указанные методики в дополнение к уже действующим.

В дополнение к рассматриваемым программным продуктам, предназначенным для расчета систем электроснабжения общего назначения, было бы целесообразно обратиться к сегменту проектирования электроснабжения электротехнологических установок (ЭТУ) с учетом схем их питания, обеспечения качества электроэнергии в сети, определения расчетных нагрузок ЭТУ и их групп, компенсации реактивной мощности, потребляемой ЭТУ.

В частности, могут быть рассмотрены следующие пункты:

– определение расчетных электрических нагрузок длительного и повторно-кратковременного режима 1-, 2- и 3-фазных электроприемников, подключаемых как на фазное, так и на линейное сетевое напряжение (например, сварочных трансформаторов);

– определение расчетных электрических нагрузок дуговых сталеплавильных печей (ДСП) с помощью коэффициентов 30-минутного максимума или модели графика нагрузки ДСП;

– определение уровней напряжения и колебаний напряжения в сетях питания ЭТУ;

– расчет несинусоидальности напряжения в сети электроснабжения различных видов ЭТУ;

– определение эффективного, пикового токов группы машин контактной сварки (МКС) для выбора участка сети их питания и максимальной потери напряжения по методу [24].

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Выводы

Согласно приведенному анализу, логично сделать вывод о целесообразности внесения в следующие версии программного комплекса CSoft новых методик, предложенных кафедрой ЭПГ ДонНТУ, и провести их тестирование (как это уже проведено в ДонНТУ и отражено в методических указаниях [22,23]) в других вузах и проектных организациях, чтобы сделать объективный вывод о целесообразности внесения изменений в действующие нормативные указания [10], а тем временем использовать как пилотный проект и аргументированную альтернативу для проектирования систем электроснабжения разной сложности.

Список литературы

1. Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ). Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://donntu.org2
2. Авторизированные центры обучения ДонНТУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://donntu.org/centr-obucheniya-schneider-electric
3. Группа компаний CSoft. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.csoft.ru
4. Кафедра ЭПГ получила уникальный дар // Официальный сайт ДонНТУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://donntu.org/news/id201610131436
5. Студенты ДонНТУ получили новое программное обеспечение для использования в учебном процессе от российской группы компаний CSoft // Официальный сайт Министерства образования Донецкой Народной Республики [Электронный ресурс]. – Режим доступа:http://mondnr.ru/vysshee-professionalnoe-obraz/item/889-studenty-donntupoluchili-novoe-programmnoe-obespechenie-dlya-ispolzovaniya-v-uchebnom-protsesse-ot-rossijskoj-gruppy-kompanij-csoft
6. Донецкий политехник. Видеожурнал. Выпуск 12 от 15.10.2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://youtu.be/hlBCHwgPdYY?t=165
7. Семинар по презентации программ CSoft на электротехническом факультете очень впечатлил специалистов ДПИ НИИ «Теплоэлектропроект» // Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ). Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://donntu.org/news/id20171109 1127
8. Кабышев, А.В. Расчет и проектирование систем электроснабжения: Справочные материалы по электрооборудованию: Учеб. пособие / А.В. Кабышев, С.Г. Обухов. – Томск: Том. политехн. ун-т, 2006. – 168 с.
9. Свод правил СП 256.1325800.2016 (актуализированная редакция СП 31-110–2003) Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа. – М., 2016. – 123 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.algori-m.ru/files/78/sp-256-1325800-2016.pdf
10. Указания по расчету электрических нагрузок. Руководящий технический материал. Проектирование электроустановок. О расчете электрических нагрузок (технический циркуляр ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект» № 359-92 от 30 июля 1992 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://znaytovar.ru/gost/2/RTM_361832492_Ukazaniya_po_ras.html
11. Официальный сайт акционерного общества «Институт «Теплоэлектропроект» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tep-m.ru
12. Форум проектировщиков электрических и слаботочных сетей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://eom.com.ua/index.php?topic=6532.0
13. Русская промышленная компания. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://winelso.ru/
14. Московский энергетический институт. Программа GUEXPERT. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://es.mpei.ac.ru/guexpert.htm.
15. Компания Schneider Electric. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.schneider-electric.com/en/product-category/5100-software/
16. Левшов, А.В. Введение в электротехнические САПР группы компаний CSOFT / А.В. Левшов, С.Г. Джура, И.А. Бершадский. – Донецк: ДОННТУ, 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://iic.roerich.com/russian/ovs/_intro_CAD_CSOFT_2017_.pdf
17. Шидловский, А.К. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий / А.К. Шидловский, Г.Я. Вагин, Э.Г. Куренный. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
18. Куренный, Э.Г. Совершенствование методов расчета электрических нагрузок / Э.Г. Куренный, Е.Н. Дмитриева, Н.Н. Погребняк // Промышленная электроэнергетика и электротехника. – Вып.4. Серия КВ. – №2079. – 1997. – С. 14-28.
19. Куренный, Э.Г. Развитие методов расчета электрических нагрузок / Э.Г. Куренный, Е.Н. Дмитриева, Н.Н. Погребняк // Известия

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

вузов. Электромеханика. – 2004. – С. 43-45.
20. Бершадский, И.А. Разработка САПР для проектирования электроснабжения цеха на напряжении 0,4 кВ / И.А. Бершадский, А.П. Ковалев, А.В. Згарбул // ЭЛЕКТРО. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. – 2015. – №4. – С. 47-52.
21. Правила устройства электроустановок. – М.: Кнорус, 2015. – 488 с.
22. Методическое пособие и справочные материалы к выполнению курсового проекта по курсу «Электроснабжение промышленных предприятий» (проектирование цеховой электрической сети) / И.А. Бершадский и др. – Донецк: ДонГТУ, 2008. – 99 с.
23. Методическое пособие и справочные материалы к выполнению дипломной работы квалификационного уровня бакалавр по направлению «Электроэнергетика и электротехника» / Сост.: Э.Г. Куренный, А.Д. Коломытцев, В.В. Якимишина. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – 20 с.
24. Рекомендации по расчету электрических нагрузок и выбору сетей, питающих установки для контактной сварки / ВНИПИ ТПЭП (Москва) и Горьковское отделение ГПИ Электропроект. Шифр М788-917. – 1983 г. – 102 с.

E.G. Kurenny /Dr. Sci. (Eng.)/, I.A. Bershadski /Dr. Sci. (Eng.)/, S.G. Dzhura /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF INNOVATIVE CALCULATION METHODS FOR POWER SUPPLY SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF CSOFT PROGRAMS

Background. *The international experience in the power supply systems design says that it is impossible to create a complex product completely free of flaws. The authors analyzed the modern methods for calculation of power supply systems and made a conclusion about the expediency of this or that calculation method. In addition to the available methods, the methods developed in DonNTU should also be used.*
Materials and/or methods*. The main methods for calculation of power supply systems and their evolution analyzed in the paper. Each of these methods has advantages and disadvantages, and the specific problem determines the choice of the method for its solution. The developer should have different calculation methods and know when to apply them. The calculation of loads at different levels of power supply carried out in different ways depending on the basic data and accuracy requirements.*
Results. *The authors came to the conclusion that the concept of a design heat load in the form of the "inertia" maximum of the ten-minute heat load reflects the physics of the problem. The concept of "cumulative" maximum half-hour average load in normative documents leads to results that contradict the meaning. It is advisable to calculate electric heat loads using an accurate simulation method that allows the use of inertial and square engineering methods. In the pilot project proposed to include these methods in the next version of CSoft programs in addition to the existing ones.*
Conclusion. *According to the analysis, concluded expedient to include in the next versions of the CSoft program new methods proposed at the DonNTU Department of the power supply of industrial enterprises and cities and conduct their testing in other higher educational institutions and design organizations to make an objective conclusion about the feasibility of changing the existing standard instructions.*

Keywords: *innovative methods, power supply system, calculation of loads, automated design, CSoft.*

Сведения об авторах

Э.Г. Куренный
SPIN-код: 2154-7331
Author ID: 916680
Телефон: +380 (62) 335-42-76
Эл. почта: edek@donntu.org

И.А. Бершадский
SPIN-код: 4772-3504
Author ID: 958724
Телефон: +380 (71) 382-74-20
Эл. почта: ibersh@rambler.ru

С.Г. Джура
SPIN-код: 9817-5409
Author ID: 862578
ORCID iD: 0000-0002-6193-6190
Телефон: +380 (71) 301-98-76
Эл. почта: dzhura@inbox.ru

Статья поступила 11.04.2018 г.
© Э.Г. Куренный, И.А. Бершадский, С.Г. Джура, 2018
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Ковалев

УДК 621.313.32

А.М. Ларин /к.т.н./, И.И. Ларина /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОГО УРОВНЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДМАГНИЧИВАНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ МЕТОДОМ ЗАТУХАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На основании экспериментальных исследований разработаны рекомендации по величине предварительного подмагничивания магнитопровода турбогенераторов, осуществляемого в опытах затухания постоянного тока в обмотке статора неподвижных электрических машин, предусмотренных действующим в странах СНГ отраслевым стандартом по методам экспериментального определения электромагнитных параметров синхронных генераторов.

Ключевые слова: *электромагнитные параметры, турбогенератор, подмагничивание, магнитная проницаемость, магнитопровод.*

Постановка проблемы

В настоящее время для определения совокупности электромагнитных параметров турбогенераторов широкое распространение получил метод затухания постоянного тока, основанный на использовании осциллограмм переходных функций тока при ступенчатом толчке постоянного напряжения в цепи обмотки статора неподвижной машины. Методика проведения опытов и обработки результатов при определении параметров с учетом многоконтурности ротора регламентирована пунктом 25.1.4 отраслевого стандарта, действующего в странах СНГ, ГОСТ 10169-77 «Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний» [1].

Для определения электромагнитных параметров, соответствующих одному и тому же уровню насыщения, испытания необходимо проводить либо при очень малых (не превышающих $0{,}005I_{ном}$) начальных значениях постоянного тока ($i_{нач}$), когда процесс перемагничивания стали при затухании тока лежит в области обратимой магнитной проницаемости, либо при больших значениях $i_{нач}$, но с осуществлением предварительного подмагничивания магнитопровода испытуемой машины постоянным током. Магнитная проницаемость массивной стали ротора при таких условиях во время переходного процесса в короткозамкнутом контуре может быть принята постоянной.

В первом случае при проведении опытов с малыми значениями изменяющегося тока следует учитывать влияние остаточного намагничивания сердечника. Однако если уровень остаточной магнитной индукции неизвестен, то для исключения влияния указанного фактора необходимо осуществлять размагничивание магнитной системы синхронной машины. При этом полученные электромагнитные параметры будут соответствовать величине магнитной проницаемости μ, близкой к ее значению в режиме холостого хода при номинальном напряжении на выводах обмотки статора.

При осуществлении предварительного подмагничивания токами различной величины в опытах принципиально возможно получение частотных характеристик для магнитного состояния ферромагнитного материала, соответствующего различной степени насыщения. Полученные при этом электромагнитные параметры, соответствующие ненасыщенному состоянию магнитопровода машины, определяют величину постоянного тока, создающего намагничивающую силу предварительного подмагничивания, исходя из условия вывода магнитного состояния стали на спадающую ветвь, близкую к основной (предельной) петле гистерезиса. Очевидно, что величина этого тока зависит от конструкции магнитопровода машины и ферромагнитных свойств применяемых электротехнических материалов.

Рекомендованное существующей методикой проведения экспериментов значение тока подмагничивания, превышающее в 10-50 раз начальный ток затухания, не является в достаточной степени экспериментально проверенным. Особенно это относится к турбогенераторам, имеющим массивный ротор.

Таким образом, уточнение и обоснование требуемого уровня предварительного подмагни-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

чивания при определении ненасыщенных значений электромагнитных параметров турбогенераторов в форме частотных характеристик является важной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций

Раздел отраслевого стандарта ГОСТ 10169-77 «Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний» [1], предусматривающий экспериментальное определение электромагнитных параметров синхронных машин с учетом многоконтурности ротора (п. 25.1.4), был введен во второй половине 70-х годов прошлого столетия. В начале 80-х годов он был также включен в международный стандарт [2]. Этому способствовали исследования, проводимые в НИИ электромашиностроения (г. Санкт-Петербург) [3,4], Донецком политехническом институте (ныне ДонНТУ) [5], а также в других организациях и за рубежом [6].

При этом вопросы оценки магнитного состояния магнитопровода электрической машины рассматривались в основном путем теоретического анализа. Полученные при этом рекомендации экспериментально не подтверждались. Это связано с тем, что в то время для регистрации переходных функций использовались осциллографические гальванометры, позволяющие осуществлять измерения с относительно большими погрешностями. Кроме того, расчеты электромагнитных параметров и частотных характеристик осуществлялись на основе ручной обработки опытных данных.

В [7] были проведены исследования по оценке величины предварительного подмагничивания с использованием более точных способов регистрации и обработки переходных функций. Однако при этом анализировалось влияние исходного уровня магнитной проницаемости только на синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси ротора явнополюсного синхронного генератора небольшой мощности типа СГ-15,75, не имеющего массивных элементов на роторе. Впоследствии полученные результаты были обобщены в [8,9].

Получившие в последнее время широкое внедрение в практику исследований современные цифровые средства измерений, а также применяемые высокоточные компьютерные технологии позволяют на основании экспериментальных исследований сформулировать уточненные требования к осуществлению процедуры предварительного подмагничивания, осуществляемого в опытах затухания постоянного тока.

Цель (задачи) исследования

Целью работы является разработка практических рекомендаций, направленных на уточнение п. 25.1.4 отраслевого стандарта ГОСТ 10169-77 «Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний».

Для достижения поставленной цели необходимо произвести оценку исходного магнитного состояния синхронного генератора, определяемого предварительным подмагничиванием магнитопровода электрической машины по пути основного магнитного потока, на совокупность электромагнитных параметров, представленных в форме частотных характеристик проводимости со стороны обмотки статора.

Основной материал исследования

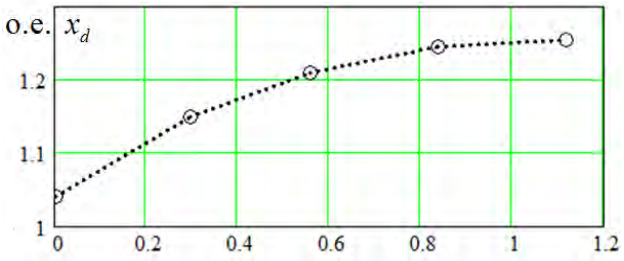
С целью разработки рекомендаций по величине предварительного подмагничивания, осуществляемого в опытах затухания постоянного тока в обмотке статора неподвижного турбогенератора, была проведена серия опытов на четырехполюсном турбогенераторе мощностью 100 МВт типа Г-1500/118 ($S_{ном}$=118 МВА; $P_{ном}$=100 МВт; $U_{ном}$=15,75 кВ; $I_{ном}$=4,32 кА). Все опыты производились при начальном значении затухающего тока в контуре обмотки статора, равном 15 А, что не превышает 0,5 % от номинального.

Для исследования влияния величины остаточной магнитной индукции в широких пределах предварительное подмагничивание пути основного магнитного потока машины осуществлялось со стороны обмотки возбуждения током от резервного возбудителя. Значения тока оказались равными 0; 0,295; 0,557; 0,836 и 1,115 в долях тока возбуждения холостого хода i_{fxx}. Для исключения влияния экранирующего эффекта обмотки возбуждения последняя, после осуществления процедуры монотонного намагничивания магнитопровода, размыкалась.

В момент закорачивания контактора в цепи обмотки статора переходная функция тока в виде падения напряжения на безындукционном шунте подавалась на вход интегрирующего устройства. Для исключения влияния остаточного тока от цепи источника питания в схеме предусматривалось размыкание цепи аккумуляторной батареи путем запирания тиристора. Синхронное индуктивное сопротивление определялось по показаниям вольтметра, включенного на выходе интегрирующего устройства, по выражению, полученному в [7,8]:

$$x_d = \frac{314r}{z_{ном} i_{нач} r_ш} U_{инт},$$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



Ток подмагничивания, в долях i_{fxx}

Рис. 1. Зависимость продольного индуктивного сопротивления турбогенератора Г-1500/118 от тока предварительного подмагничивания

где $i_{нач}$ – значение начального тока в контуре затухания, А; $z_{ном}$ – номинальное сопротивление обмотки статора генератора, Ом; $r_ш$ – сопротивление измерительного шунта, Ом; $U_{инт}$ – показания вольтметра, в конце переходного процесса, В.

Определение синхронных индуктивных сопротивлений осуществлялось как среднее арифметическое значение по данным трех опытов при каждом уровне подмагничивания. Разброс результатов измерений в каждом случае при этом не превышал 3 % от среднего значения.

Результаты определения синхронных индуктивных сопротивлений исследуемого турбогенератора в зависимости от величины тока предварительного подмагничивания приведены на рис. 1.

Как следует из анализа рис. 1, влияние предшествующего магнитного состояния проявляется в увеличении значения сопротивления. Характер кривой изменения синхронного индуктивного сопротивления в зависимости от тока предварительного подмагничивания указывает на асимптотический рост значений сопротивлений от величины, равной 1,04 о.е. в опыте, выполненном без предварительного подмагничивания, до 1.25 о.е. в опыте при токе подмагничивания, составляющем примерно 80 % от тока возбуждения холостого хода.

Приведенное значение индуктивного сопротивления, измеренное на неподвижной машине, близко к ненасыщенному значению, определяемому по характеристикам холостого хода и короткого замыкания ($x_{d\ ненас}$=1,35 о.е). Полученное несовпадение, составляющее 7,4 %, может быть объяснено различием в учете дифференциального рассеяния обмотки статора при измерении синхронного индуктивного сопротивления на переменном и постоянном токе, а также погрешностью регистрирующей и измерительной аппаратуры при расчете значений x_d путем интегрирования переходной функции в опытах затухания постоянного тока.

Для исследования влияния степени предварительного подмагничивания на всю совокупность электромагнитных параметров турбогенератора, отображаемую в виде частотной характеристики проводимости со стороны обмотки статора $y_{sd}(js)$, в опытах регистрировались кривые затухающего тока.

Измерение переходных функций производилось с помощью цифрового регистратора «Рекон». В каждом опыте кривая затухания постоянного тока аппроксимировалась пятью экспоненциальными составляющими, исходя из условия минимизации суммы квадратов относительных погрешностей разложения экспериментальной кривой. Погрешность аппроксимации не превышала 3,8 %. Полученные при этом начальные значения и коэффициенты затухания экспоненты приведены в табл. 1.

Частотные характеристики $y_{sd}(js)$ определялись по соотношению, полученному в [8]:

$$y_{sd}(js) = \frac{js}{\dfrac{1}{\sum\limits_{k=1}^{n} \dfrac{i_k \alpha_k}{\alpha_k + js}} - r},$$

где i_k, α_k, – начальное значение и коэффициент затухания k-й экспоненциальной составляющей, аппроксимирующей кривую затухания, о.е.; r – оммическое сопротивление контура затухания, о.е. (r=0,0285 о.е.).

Полученные частотные характеристики, соответствующие разомкнутому состоянию обмотки возбуждения генератора, показаны на рис. 2.

Как следует из рис. 2, осуществление предварительного подмагничивания в широких пределах привело к существенной деформации шкалы скольжений частотной характеристики. Особенно это проявляется для мнимых составляющих.

На рис. 3 и рис. 4 приведены зависимости соответственно мнимых и действительных составляющих частотных характеристик $y_{sd}(js)$ исследуемого турбогенератора Г-1500/118 в функции скольжения ротора.

В области значений скольжений от 0,03 до 1,0 о.е. увеличение тока предварительного подмагничивания приводит к увеличению мнимой составляющей характеристики. Наибольшее отличие в опытах, выполненных без предварительного подмагничивания и с подмагничиванием током $1{,}115 i_{fxx}$ при скольжении, равном 1,0 о.е., составляет 2,3 раза. При этом отличия указанных значений, полученных в опытах при подмагничивании токами от 0,557 до 1,115, отличаются от среднего значения не более чем на 5 %.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 1. Результаты аппроксимации переходных функций затухания постоянного тока в обмотке статора турбогенератора типа Г-1500/118

Значение тока предварительного подмагничивания, в долях, i_{fxx}	Параметр экспоненты	Порядковый номер экспоненты				
		1	2	3	4	5
0	i_k, д.е.	0,0147	0,0432	0,3740	0,4690	0,0920
	α_k, о.е.	0,0010	0,0036	0,0462	0,1490	0,3090
0,295	i_k, д.е.	0,0119	0,0465	0,1320	0,5670	0,2390
	α_k, о.е.	0,0010	0,0025	0,0261	0,0812	0,2770
0,557	i_k, д.е.	0,0088	0,0777	0,2609	0,5093	0,1390
	α_k, о.е.	0,0010	0,0042	0.0223	0,1008	0,4220
0,836	i_k, д.е.	0,0155	0,0186	0,2222	0,4006	0,1710
	α_k, о.е.	0,0010	0,0090	0,0419	0,0990	0,3820
1,115	i_k, д.е.	0,0112	0,0890	0,2820	0,4678	0,1460
	α_k, о.е.	0,0010	0,0047	0,0258	0,1062	0,3980

При скольжениях менее 0,03 о.е. имеет место обратное соотношение для характеристик. В этой области их отличие снижается и составляет для скольжения 0,01 о.е. порядка 0,7.

Для действительных составляющих (рис. 4) и модульных значений тока отличия значительно меньше. Так, при скольжении 1,0 о.е. составляющая, полученная в опыте без подмагничивания и с подмагничиванием током $1.115i_{fxx}$, не превышает 0,96 и оказывается равной 0,58 при скольжении 0,01 о.е.

Представляет интерес оценка влияния исходного магнитного состояния магнитопровода турбогенератора на зависимости эквивалентных значений активного $r_{D\text{э}}$ и индуктивного сопротивления рассеяния $x_{\sigma D\text{э}}$ массивных конструктивных элементов ротора в функции скольжения.

Указанные зависимости определялись по экспериментальным частотным характеристикам путем исключения индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора (x_σ=0,14 о.е.) и сопротивления взаимоиндукции x_{ad} по соотношению:

$$z_{D\text{э}}(js) = x_{\sigma D\text{э}}(s) + \frac{r_{D\text{э}}}{js} = \frac{1}{\dfrac{1}{\dfrac{1}{y_{sd}(js)} - x_\sigma} - \dfrac{1}{x_{ad}}}, \quad (1)$$

где

$$x_{ad} = \frac{1}{y_{sd}(js)_{s=0}} - x_\sigma .$$

Анализ полученных по (1) результатов указывает на то, что характер изменения рассматриваемых активных и индуктивных сопротивлений рассеяния отражает физические процессы, имеющие место при различных величинах магнитной проницаемости. При увеличении остаточной магнитной проницаемости за счет увеличения тока предварительного подмагничивания от 0 до $0{,}557i_{fxx}$ значения эквивалентных сопротивлений увеличиваются. Это и привело к существенной деформации шкалы скольжений частотных характеристик (см. рис. 1) в указанном диапазоне изменения тока предварительного подмагничивания. Наибольшее отличие характеристик, полученных в опыте без осуществления процедуры предварительного подмагничивания и при подмагничивании током $0{,}557i_{fxx}$, составляет 77 % для мнимой составляющей при скольжении 0,005 о.е. По действительной составляющей, отличие указанных характеристик достигает 55 % при скольжении 0,01 о.е. При этом же скольжении несовпадение характеристик, полученных в опытах с предварительным подмагничиванием токами $0{,}295i_{fxx}$ и $0{,}557i_{fxx}$, для вещественной составляющей составляет 43 %.

При осуществлении подмагничивания большими токами значение μ практически не изменяется. Это соответствует затуханию постоянного тока в опытах по спадающей ветви, весьма близкой к предельной петле гистерезиса. Вследствие этого соответствующие этим уровням предварительного намагничивания частотные характеристики $y_{sd}(js)$ практически совпали между собой (см. рис. 1).

Таким образом, выполненные исследования свидетельствуют о том, что при определении ненасыщенных значений совокупности электромагнитных параметров турбогенераторов опыты затухания постоянного тока должны производиться при осуществлении предварительного подмагничивания со стороны обмотки возбуждения током не менее $0{,}5i_{fxx}$.

Поскольку методика, регламентируемая действующим стандартом [1], предусматривает осуществление процедуры предварительного подмагничивания со стороны обмотки статора,

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

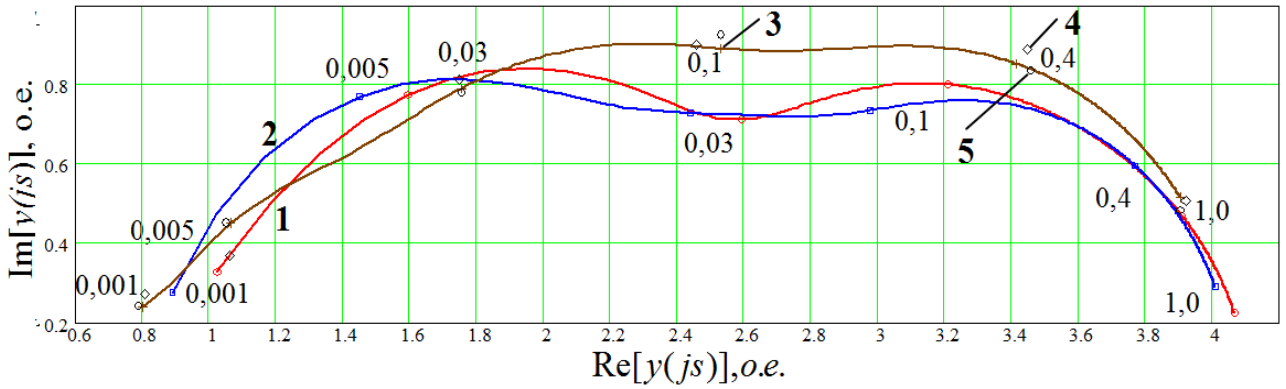


Рис. 2. Частотные характеристики $y_{sd}(js)$ турбогенератора типа Г-1500/118:
1 – при токе предварительного подмагничивания $i_{под}$=0,2;
2 – при $i_{под}$=0,295i_{fxx}; *3* – при $i_{под}$=0,557i_{fxx}; *4* – при $i_{под}$=0,836i_{fxx};
5 – при $i_{под}$=1,115i_{fxx}

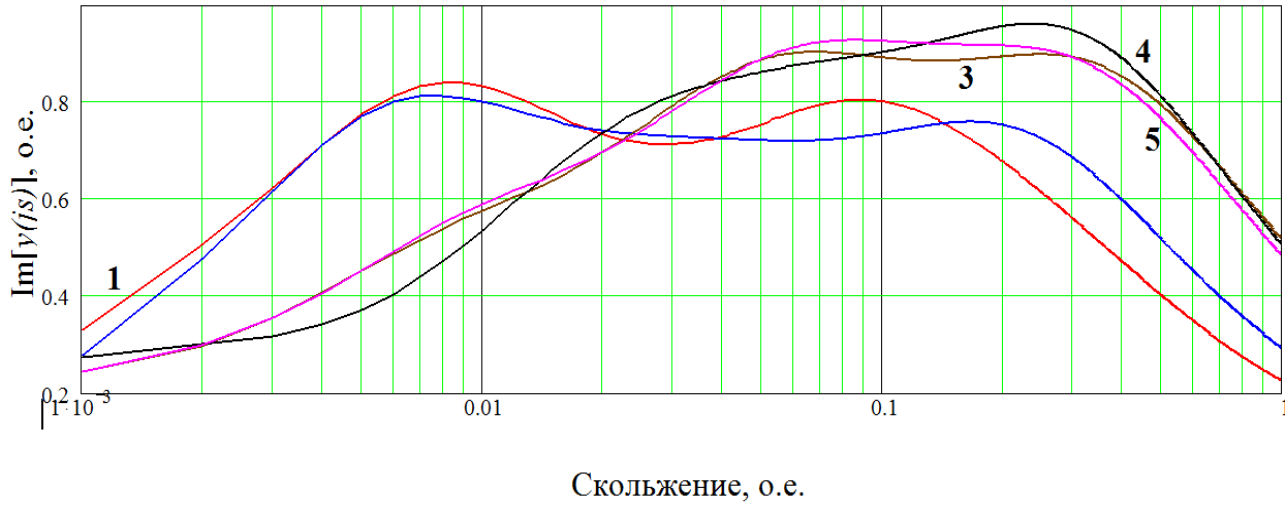


Рис. 3. Зависимость мнимой составляющей характеристики $y_{sd}(js)$ турбогенератора типа Г-1500/118 от скольжения ротора:
1 – при токе предварительного подмагничивания $i_{под}$=0; *2* – при $i_{под}$=0,295i_{fxx};
3 – при $i_{под}$=0,557i_{fxx}; *4* – при $i_{под}$=0,836i_{fxx}; *5* – при $i_{под}$=1,115i_{fxx}

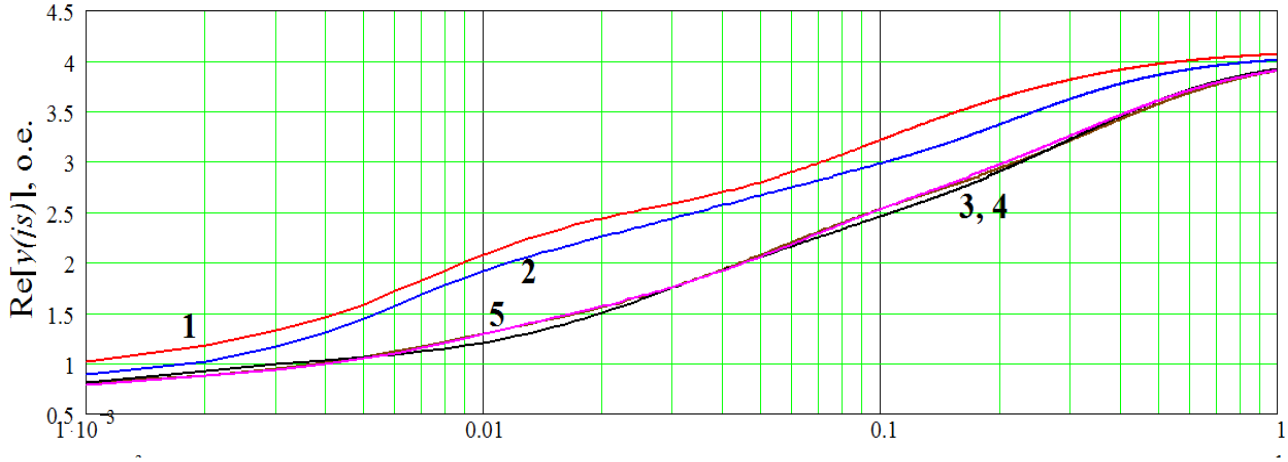


Рис. 4. Зависимость вещественной составляющей характеристики $y_{sd}(js)$ турбогенератора типа Г-1500/118 от скольжения ротора:
1 – при токе предварительного подмагничивания $i_{под}$=0; *2* – при $i_{под}$=0,295i_{fxx};
3 – при $i_{под}$=0,557i_{fxx}; *4* – при $i_{под}$=0,836i_{fxx}; *5* – при $i_{под}$=1,115i_{fxx}

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

то необходимая при этом величина тока подмагничивания может быть установлена на основании равнозначности поля первой гармонической в воздушном зазоре, создаваемого постоянным током в обмотке статора и возбуждения по известному соотношению:

$$i_{d0} = i_{f0} \frac{i_{sб}}{i_{fб}},$$

где $i_{sб} = \sqrt{2} I_{ном}$ – базисный ток обмотки статора; $i_{fб}=i_{fxx} \cdot x_{ad}$ – базисный ток обмотки возбуждения.

Для исследуемого турбогенератора имеем:

$$i_{d0} = \frac{i_{f0}}{i_{fxx} x_{ad}} I_{ном} \sqrt{2} = \frac{i_{f*(xx)}}{x_{ad}} I_{ном} \sqrt{2} = \frac{0{,}5}{1{,}12} \cdot 4320 \cdot \sqrt{2} \approx 2700, \text{ А}.$$

Полученное значение постоянного тока предварительного подмагничивания в обмотке статора (2700 А) превышает рекомендуемую существующей методикой ($50i_{нач}$=50×15=750 А) величину в 2,7 раза.

Выводы

С целью исключить влияние частных циклов гистерезиса, что необходимо для определения ненасыщенных значений совокупности электромагнитных параметров синхронных машин с массивным ротором, опыты затухания постоянного тока следует проводить при осуществлении процедуры предварительного подмагничивания током, создающим магнитный поток в машине не менее половины от потока, создаваемого в режиме холостого хода при номинальном напряжении на выводах обмотки статора.

Рекомендовать текст абзаца пункта 25.1.4 ГОСТ 10169-77 «Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний», описывающего осуществление процедуры предварительного подмагничивания: «…кратковременно подать в обмотку якоря ток намагничивания порядка 10-50$i_{нач}$, но не более номинального», заменить следующим: «…кратковременно подать в обмотку якоря ток намагничивания, создающий магнитный поток в машине не менее половины от потока в режиме холостого хода при номинальном напряжении на выводах обмотки статора, но не более номинального».

Список литературы

1. ГОСТ 10169-77. Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний. – Москва: Изд-во стандартов, 1984. – 77 с.
2. International Electrotechnical Commission (IEC) Standard. Rotating Electrical Machines. Part 4: Methods for determining synchronous machines quantities from tests. Publication 34-4. Geneva, 1985. – 175 p.
3. Казовский, Е. Я. Анализ погрешностей определения частотных характеристик синхронных машин методом затухания постоянного тока / Е.Я. Казовский, А.М. Волков, А.В. Сидельников // Электротехника. – 1967. – №9. – С. 46-51.
4. Сидельников, А. В. Анализ переходных процессов электрических машин с массивными ферромагнитными участками в магнитопроводе / А.В. Сидельников // Электротехника. – 1966. – №7. – С. 53-57.
5. Рогозин, Г. Г. Определение частотных характеристик крупных турбогенераторов // Г.Г. Рогозин, В.Я. Горин // Электрические станции. – 1971. – №2. – С. 64-69.
6. Canay, M. Gleichstrommessungen zur Bestimmung der characteristischen Grossen von Synchronmaschinen / M. Canay // Bull. ASE. – 1965. – V.56. – No.21. – S. 43-47.
7. Рогозин, Г. Г. Определение при неподвижном роторе индуктивных сопротивлений схемы замещения установившегося режима синхронной машины / Г.Г. Рогозин, Н.С. Лапшина // Электротехника. – 1976. – №6. – С. 15-18.
8. Рогозин, Г. Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Новые экспериментальные методы / Г.Г. Рогозин // Киев: Техника. – 1992. – 168 с.
9. Rogozin, G. G. Determining the electromagnetic parameters of AC machines / G.G. Rogozin // Revu general de l`electricite. – 1993. – No.9. – P. 8-16.

A.M. Larin /Cand. Sci. (Eng.)/, I.I. Larina /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

JUSTIFICATION OF THE APPROPRIATE MAGNETIC PRE-BIASING LEVEL IN DETERMINING THE ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF TURBOGENERATORS USING THE METHOD OF DC DAMPING

Background. *Currently, the definition of electromagnetic parameters of turbogenerators considering the massive multichannel rotor regulated by paragraph 25.1.4 industry standard 10169-77 "Electrical three-*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

phase synchronous machines. Test methods". The methodology of experiments and results processing provides for the procedure of preliminary biasing of the magnetic core. Herewith, the value of the biasing current exceeding the initial damping current by 10-50 times is not sufficiently experimentally verified.

Materials and/or methods. *To develop recommendations on the value of the preliminary biasing carried out in experiments of DC damping in the stator winding of a stationary synchronous machine, a series of experiments on an industrial turbogenerator with a capacity of 100 MW carried out. The study of the effect of the value of the residual magnetic induction in a wide range carried out by preliminary biasing of the path of the main magnetic flux of the machine from the excitation winding. The transition functions checked by modern digital recorders.*

Results. *The research allowed establishing that for the determination of unsaturated values of turbogenerator electromagnetic parameters the experiments of direct current damping should be carried out at preliminary biasing with the current 2,7 times exceeding GOST regulated value. Recommendations for changing the text of paragraph 25.1.4 GOST 10169-77 "Electrical three-phase synchronous machines. Test methods" describing the procedure of preliminary biasing formulated.*

Conclusion. *To eliminate the influence of individual hysteresis cycles in order to determine the unsaturated values of electromagnetic parameters of synchronous machines with a massive rotor, DC damping experiments should be carried out in the implementation of the procedure of pre-biasing by current which creates magnetic flux in the machine at least half of the flux in idle mode at rated voltage of the stator winding output.*

Keywords**:** *electromagnetic parameters, turbogenerator, biasing, magnetic permeability, magnetic core.*

Сведения об авторах

А.М. Ларин
SPIN-код: 2232-6194
Author ID: 856532
ORCID iD: 0000-0003-0832-0749
Телефон: +380 (71) 320-15-24
Эл. почта: lam@elf.donntu.org

И.И. Ларина
SPIN-код: 9924-8519
Author ID: 856531
ORCID iD: 0000-0003-4675-6690
Телефон: +380 (71) 320-15-23
Эл. почта: innacompany@yandex.ru

Статья поступила 13.03.2018 г.
© А.М. Ларин, И.И. Ларина, 2018
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Ковалев



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 621.313.333

К.Н. Маренич /д.т.н./, Е.С. Дубинка
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрены средства подавления обратных энергетических потоков асинхронных двигателей и исследованы возможности применения индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя как способа реализации функции подавления его обратного энергетического потока в процессе защитного обесточивания промышленного участкового электротехнического комплекса.

Ключевые слова: *электротехнический комплекс, асинхронный двигатель, обратный энергетический поток, ограничение.*

Постановка проблемы

Электротехнический комплекс (ЭТК) технологического участка угольной шахты отличается совокупностью асинхронных двигателей (АД) потребителей и нестационарностью расположения оборудования, что обусловливает необходимость применения разветвленной сети гибких кабелей (ГК), которые наиболее подвержены механическим повреждениям, способным вызывать аварийные и опасные состояния – короткое замыкание либо опасность поражения человека электрическим током [1].

До недавнего времени в большинстве исследований и практических разработок асинхронные двигатели рассматривались как пассивные составляющие структуры ЭТК, которые формируют те или иные параметры и характеристики в зависимости от воспринимаемых управляющих воздействий (напряжение, частота и т.п.). В то же время характерной особенностью асинхронных двигателей является формирование обратного энергетического потока в режиме выбега, что определяется параметрами вращающегося магнитного поля ротора. В условиях шахты, когда существует повышенная вероятность механического повреждения кабеля силового присоединения, обратные электродвижущие силы (ЭДС) представляют особую опасность в связи со способностью поддерживать аварийные и опасные состояния после защитного отключения сети [2-5]. Поэтому поиск эффективных технических решений в области защитного подавления обратных энергетических потоков является актуальной научно-практической задачей.

Анализ последних исследований и публикаций

Решение задачи предотвращения опасного воздействия обратных энергетических потоков АД осуществлялось в разных направлениях, наиболее характерными из которых являлись:

1. Способы и устройства выявления аварийного состояния питающего кабеля автономно действующими техническими средствами, установленными как со стороны питающей подстанции, так и со стороны асинхронного двигателя потребителя [6].

2. Поиск и реализация исполнительных технических средств отключения либо подавления обратных энергетических потоков АД. Результаты исследований [7] позволяют сделать вывод о принципиальной возможности осуществления защитного обесточивания ЭТК, однако каждое из предложенных технических решений имеет определенную ограниченную область применения либо специфику технического исполнения, ограничивающую возможности практического применения. В частности, проблемным вопросом является внедрение конструкции силового полупроводникового короткозамыкателя либо трехфазного коммутатора статорной обмотки непосредственно в конструкцию двигателя, потенциальная опасность искусственного создания короткого замыкания вследствие ложного срабатывания короткозамыкателя [8].

Следовательно, в настоящее время не существует корректного технического решения, которое отличалось бы достаточными параметрами быстродействия и приемлемостью реализации. Поэтому актуальным является аналитический обзор исследовательского материала в контексте эволюции развития идеи защитного подавления обратных энергетических потоков АД в процессе отключения аварийных и опасных состояний электрической сети и поиск путей корректного решения поставленной научно-технической задачи.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является установление рациональной структуры исполнительного устройства подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя в режиме выбега, удовлетворяющей критерию минимизации элементов силовой схемы и быстродействия обесточивания аварийного присоединения. Указанная цель может быть достигнута, в частности, на основе анализа и сопоставления схемных решений и функций устройств, потенциально пригодных для обесточивания силовой цепи присоединения статора асинхронного двигателя в режиме выбега.

Основной материал исследования

Диалектика развития способов и устройств оперативной реализации защитной функции при возникновении аварийных (опасных) состояний элементов промышленного многомашинного электротехнического комплекса выражается в поэтапном совершенствовании технических средств защитного отключения (отделения энергетического потока питающей трансформаторной подстанции) аварийного присоединения потребителя. При этом упор делается на повышение быстродействия защитного отключения и повышение коммутационной способности силовых аппаратов отключения. Такой подход исчерпал себя по мере применения высокомощных асинхронных двигателей электропотребителей – электромашин, создающих продолжительные мощные обратные энергетические потоки в режиме выбега на начальном этапе после их отключения от сети. Это обусловило поиск и обоснование технических решений двустороннего (полного) защитного обесточивания ЭТК как со стороны подстанции, так и со стороны совокупности АД потребителей.

Известный принцип ускоренного обесточивания аварийного присоединения заключается в сочетании функции отключения сети с функцией создания цепи искусственного короткого замыкания всех трех фаз на выходе силового коммутационного аппарата и вводе статоров АД потребителей, что было реализовано в схеме автоматического быстродействующего выключателя серии АБВ-250 с учетом применения устройства быстродействующей токовой защиты типа БМЗ с функцией определения скорости нарастания тока сети [9].

Однако применение подобной схемы сопряжено с вероятностью ложного срабатывания короткозамыкателя, который выполняет подчиненную функцию и срабатывает по команде основной защиты со стороны комплектной трансформаторной подстанции (КТП). Эта защита не позволяет почувствовать утечку (в частности, на интервале выбега), а информационный сигнал может не доходить до короткозамыкателя АД при повреждении кабеля. Кроме того, существует вероятность ошибки персонала при подключении сигнальных жил кабеля к проходным зажимам пускателя, что приведет к разрыву канала передачи управляющих команд. Отмеченные недостатки обусловили отказ (в настоящее время) от производства технических средств системы так называемой «опережающей» токовой защиты. Тем не менее промышленное использование этой схемы доказало принципиальную возможность применения быстродействующего обесточивания точки короткого замыкания в кабеле питания АД путем отделения энергетических потоков как со стороны питающей трансформаторной подстанции, так и со стороны статора двигателя аварийного присоединения [10].

В то же время принципиально важным является то, что отделение обратного энергетического потока АД должно происходить по команде автономно действующего средства выявления опасного состояния силового присоединения одновременно со срабатыванием защитного устройства со стороны питающей трансформаторной подстанции.

Таким образом, проблема реализации защитного обесточивания промышленных участковых ЭТК предполагала решение в двух направлениях: создания автономно действующего со стороны присоединения статора АД устройства выявления аварийного состояния питающего кабеля и создания компактного силового коммутационного устройства быстродействующего отделения от сети обратного энергетического потока АД (в режиме выбега).

Эффективным решением первой задачи является техническое решение (рис. 1), позволяющее сформировать информационный сигнал (на резисторе R_4) в момент возникновения междуфазного короткого замыкания (КЗ) или цепи утечки ($R_{ут}$) тока на землю. В этом случае формирование информационного импульса обусловлено начальным этапом прохождения выпрямленного тока от сети через конденсаторные присоединения (C_1-C_2) диод VD_1 на контур «земля». При этом конденсаторы ограничивают временной интервал проводимости цепи «сеть – контур «земля»» и не создают прецедента параллельного подключения резисторов присоединения (R_1-R_3) к цепи утечки $R_{ут}$ тока на землю [11].

В этом случае исполнительное устройство может быть построено как по принципу отключения статора АД контактным разъединением

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

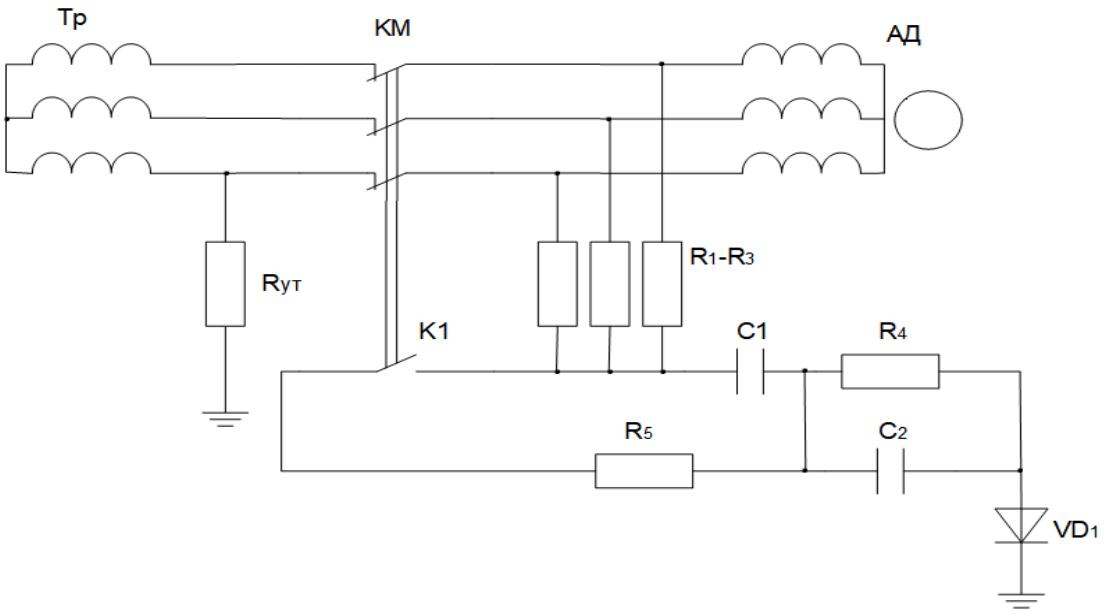


Рис. 1. Схема, поясняющая принцип аварийного состояния силового присоединения автономно действующим устройством со стороны статора АД

его трехфазной схемы, так и по принципу создания искусственной цепи КЗ на вводе статора (в момент защитного отключения).

Выше упомянуты недостатки применения искусственного короткозамыкателя. Что касается силовых контактных коммутационных аппаратов, то в данном случае речь идет об их расположении в конструкции АД (непосредственно усложняет схему и снижает ее надежность). В связи с этим практическую актуальность приобретает схема, реализующая процесс индукционно-динамического торможения АД и отличающаяся компактностью и быстродействием (рис. 2).

Поскольку обратная ЭДС статора АД находится в функциональной зависимости от угловой скорости ротора, достаточное быстродействие ее подавления может быть достигнуто применением эффективных средств торможения АД [7]:

$$u_{вр} = \frac{L_m}{L_p} j(1-s) w_0 \psi_{op} e^{\frac{-t}{T_p}} e^{jw_0(1-s)t},$$

где L_m – индуктивность намагничивания АД; L_p – полная индуктивность ротора; s и w_0 – скольжение и синхронная частота вращения ротора; t – время; T_p – постоянная затухания свободного тока ротора; ψ_{op} – потокосцепление обмотки ротора.

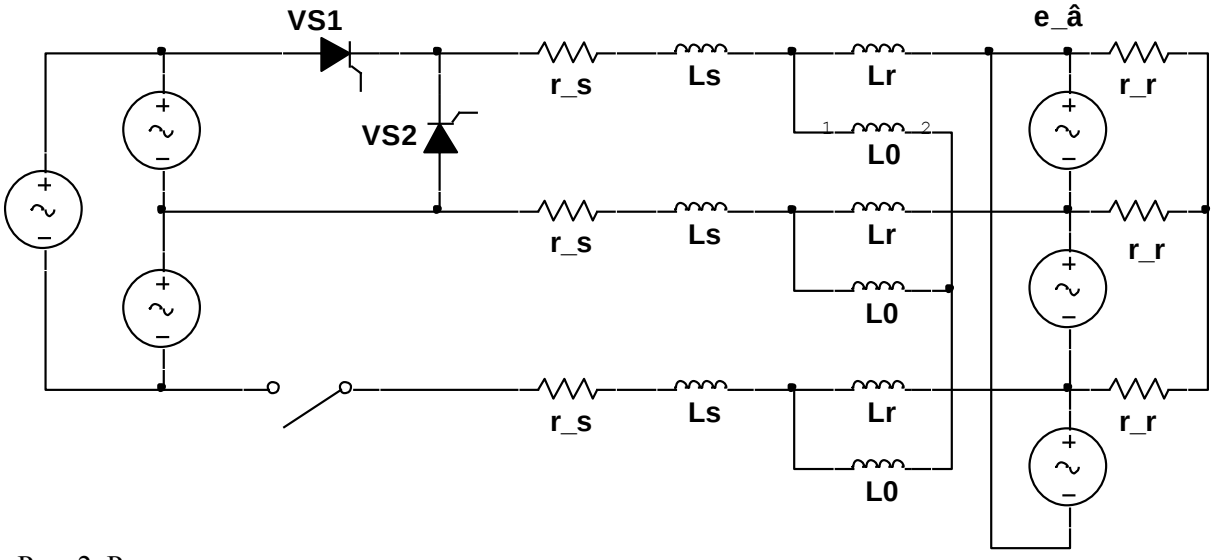


Рис. 2. Расчетная схема для исследования процесса индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Постоянная времени снижения тока ротора:

$$T_p = \frac{L_p}{r_p} = \frac{U_\phi K_н}{I_0 r_p w_0},$$

где r_p – активное сопротивление обмотки ротора; U_ϕ – фазное напряжение обмотки статора АД в режиме холостого хода; L_p – полная индуктивность ротора; w_0 – синхронная частота вращения ротора; $K_н \approx 1{,}1$ – коэффициент насыщения магнитной системы АД; I_0 – ток холостого хода АД.

В связи с этим практический интерес представляет анализ процесса индукционно-динамического торможения АД в контексте применения в качестве решения задачи подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя.

Процесс индукционно-динамического торможения обеспечивается силовой схемой в цепи статора асинхронного двигателя (см. рис. 2) и предполагает чередование состояний динамического (ДТ), индукционного (ИТ) и индукционно-динамического (ИДТ) торможения двигателя [12].

Ток динамического торможения создается посредством подачи на статор через тиристор *VS*1 полуволн линейного напряжения U_{AB} сети (рис. 3). Эффект индукционного торможения создается при замыкании через тиристор *VS*2 ЭДС вращения ($U_{вр}$) ротора АД.

Важным аспектом следует считать, что полуволны тока индукционного торможения создаются за счет замыкания соответствующих полуволн ЭДС вращения $U_{вр}$ через открытый тиристор *VS*2, т.е. создаются импульсы тормозного тока значительной амплитуды (I_m) (рис. 3). Этим обусловлено возникновение значительного по величине тормозного момента M_T, который, как известно, пропорционален квадрату тормозного тока I_T [12]:

$$M_T = \frac{n_\phi I_T^2 r_p}{w_0 S_н},$$

где n_ϕ – число фаз присоединения; $S_н$ – скольжение АД в начале интервала торможения.

Рассмотрим модель процесса индукционно-динамического торможения АД в контексте реализации концепции ускоренного подавления обратного энергетического потока (снижения величины потока до уровня, не представляющего опасности воспламенения питающего кабеля после отключения присоединения с коротким междуфазным замыканием, а также не представляющего опасность электропоражения в режиме выбега АД).

При моделировании принимаем следующие допущения: изначально в сети действует трехфазная система напряжения промышленной частоты; аварийный (опасный) режим возникает в середине кабеля подключения к АД; защитное отключение напряжения питания выполняется групповым автоматическим выключателем через 0,2 с после возникновения аварийного (опасного) состояния; для исследования принимается режим двухфазного короткого замыкания, а также возникновение цепи утечки тока на землю сопротивлением 1 кОм (что соответствует сопротивлению тела человека в соответствии с ГОСТ 22929-78 [12]); номинальное линейное напряжение сети 660 В; частота 50 Гц; асинхронный двигатель типа ЭКВ4-250, мощностью 250 кВт, длина кабеля 200 м, сечение силовых жил 70 мм^2, тип питающей подстанции КТПВ-1000 [14]. Структурная схема модели фрагмента ЭТК представлена на рис. 4.

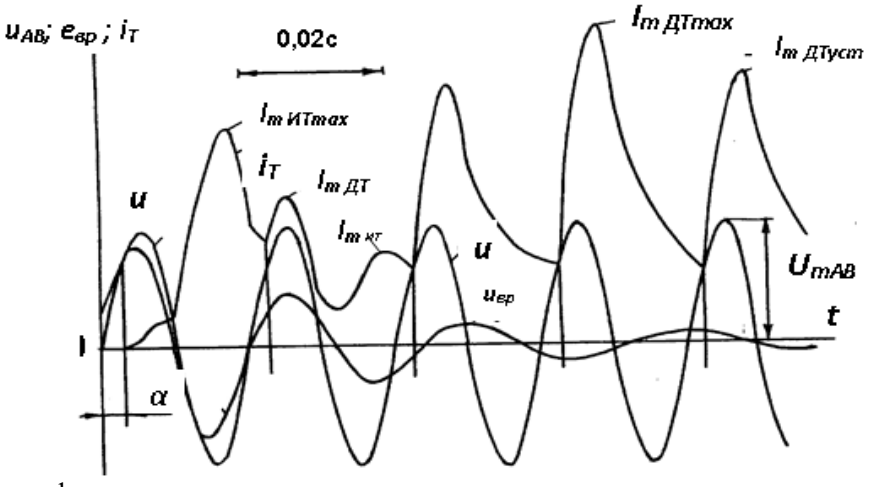


Рис. 3. Диаграммы формирования тока статора асинхронного двигателя в процессе его индукционно-динамического торможения: α – угол отпирания тиристора *VS*1

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

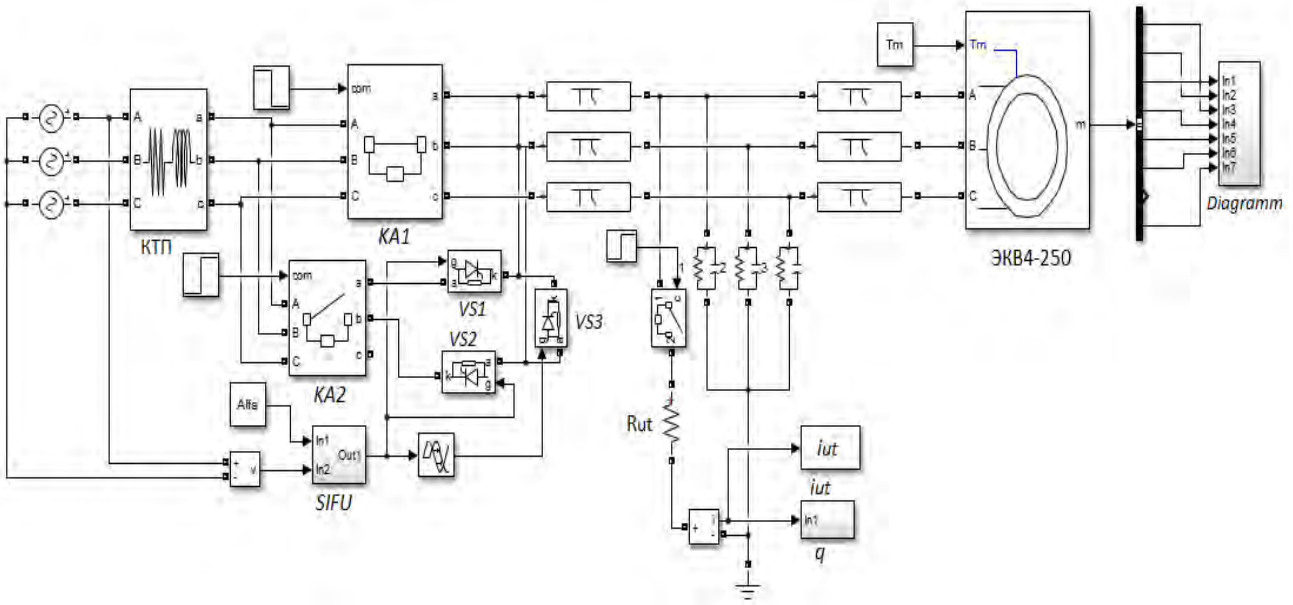


Рис. 4. Структурная схема модели фрагмента ЭТК

Модель фрагмента ЭТК содержит: *SIFU* – система импульсно-фазового управления тиристорами *VS*1, *VS*2 и *VS*3; *KA*1, *KA*2 – коммутационные аппараты; *Rut* – возникновение утечки тока на землю (1 кОм); асинхронный двигатель типа ЭКВ4-250, КТП – комплектная трансформаторная подстанция.

Результаты моделирования процессов в электротехническом комплексе в случае возникновения цепи утечки тока на землю представлены на рис. 5, в случае возникновения аварийного режима двухфазного короткого замыкания в питающем кабеле асинхронного двигателя – на рис. 6.

Представленные диаграммы характеризуют количественные показатели ЭДС выбега асинхронного двигателя типа 1ЭКВ4-250, тока двухфазного короткого замыкания в кабеле питания АД (рис. 6) и тока утечки на землю через тело человека, а также накопления количества электричества (рис. 5). В момент времени t_1 возникает аварийное (опасное) состояние, в момент времени t_2 отключается коммутационный аппарат.

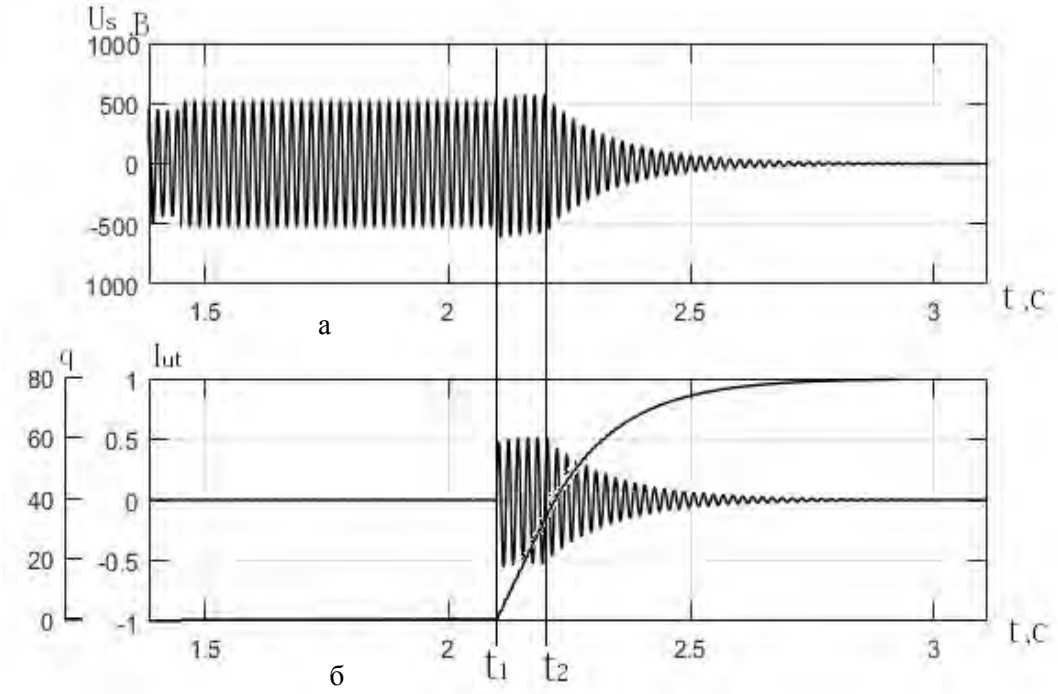


Рис. 5. Диаграммы величин: *а* – ЭДС выбега АД типа ЭКВ4-250; *б* – тока утечки на землю и накопления количества электричества без учета эффекта ИДТ

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

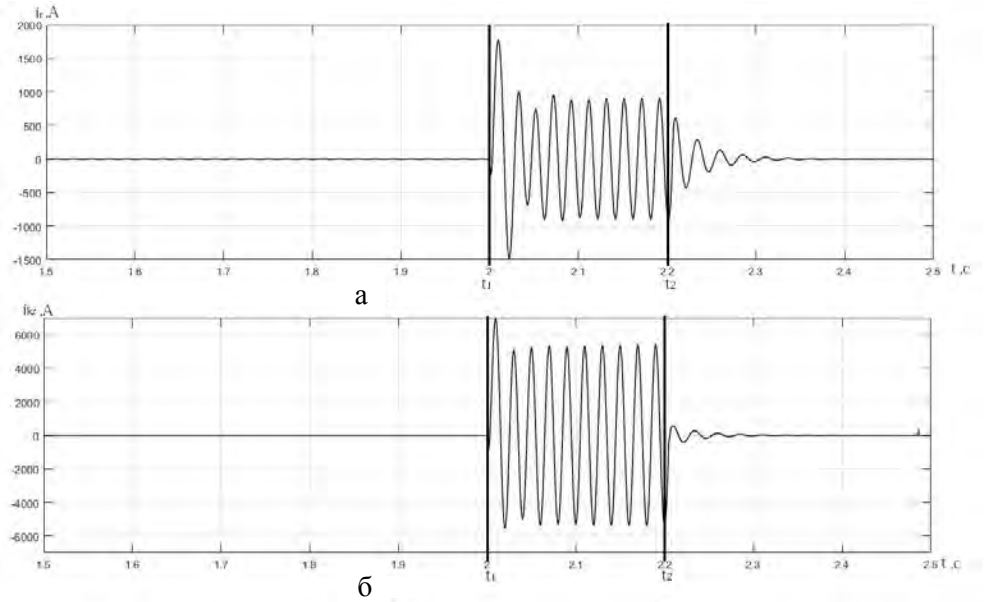


Рис. 6. Диаграммы величин: *а* – тока ротора АД типа ЭКВ4-250; *б* – тока двухфазного короткого замыкания в кабеле питания АД

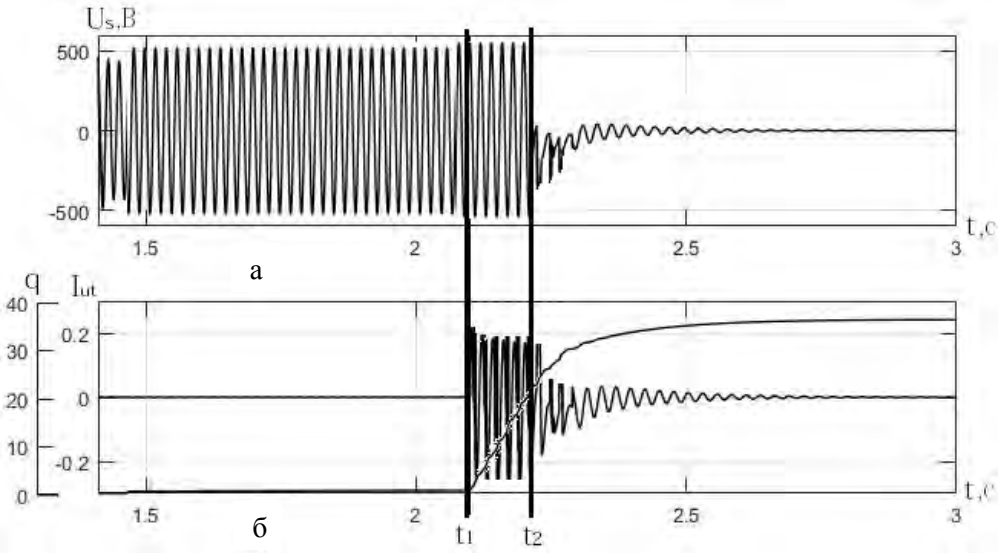


Рис. 7. Диаграммы величин: *а* – ЭДС выбега АД типа ЭКВ4-250; *б* – тока утечки на землю и накопления количества электричества с учетом эффекта ИДТ

Анализ диаграмм формирования тока утечки на землю, накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки и токов короткого замыкания, при отсутствии средств подавления обратных энергетических потоков в ходе выбега двигателя, позволяет сделать вывод о превышении допустимого уровня количества электричества, проходящего через тело человека, по критерию электробезопасности (50 мА·с) [12]. Это подтверждает необходимость поиска технических решений в области ускоренного подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя при возникновении утечки тока на землю или междуфазного короткого замыкания.

Действие предлагаемого технического решения заключается в применении индукционно-динамического торможения двигателя при возникновении аварийного (опасного) состояния сети посредством подключения к сети соответствующих тиристоров. Ток динамического торможения создается посредством подачи на статор через тиристор *VS*1 полуволн линейного напряжения U_{AB} сети, ток индукционного торможения – при замыкании через тиристор *VS*2 $U_{вр}$ ротора АД.

Результаты моделирования представлены на рис. 7 (утечка тока на землю) и рис. 8-9 (междуфазное короткое замыкание). В момент времени t_1 возникает аварийное (опасное) состояние, в момент времени t_2 отключается автоматический выключатель и начинается процесс индукционно-динамического торможения.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

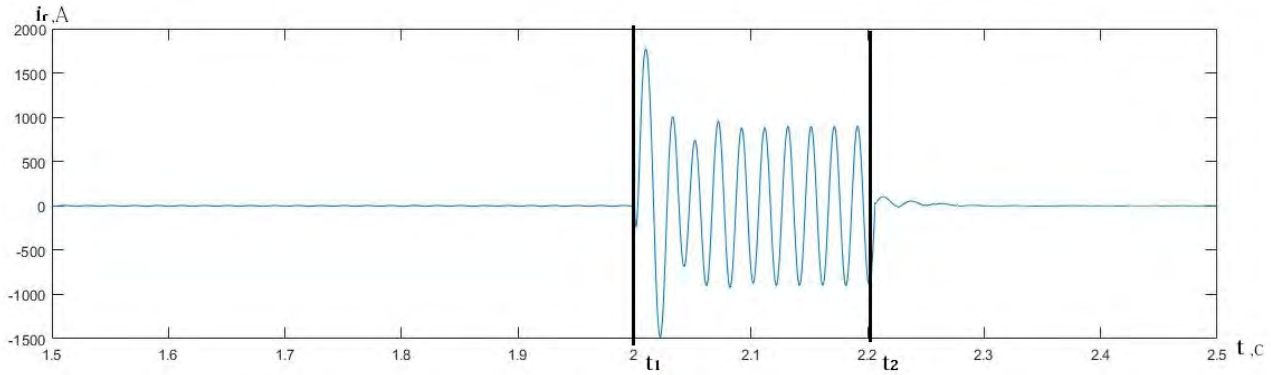


Рис. 8. Диаграмма величины тока ротора АД типа ЭКВ4-250

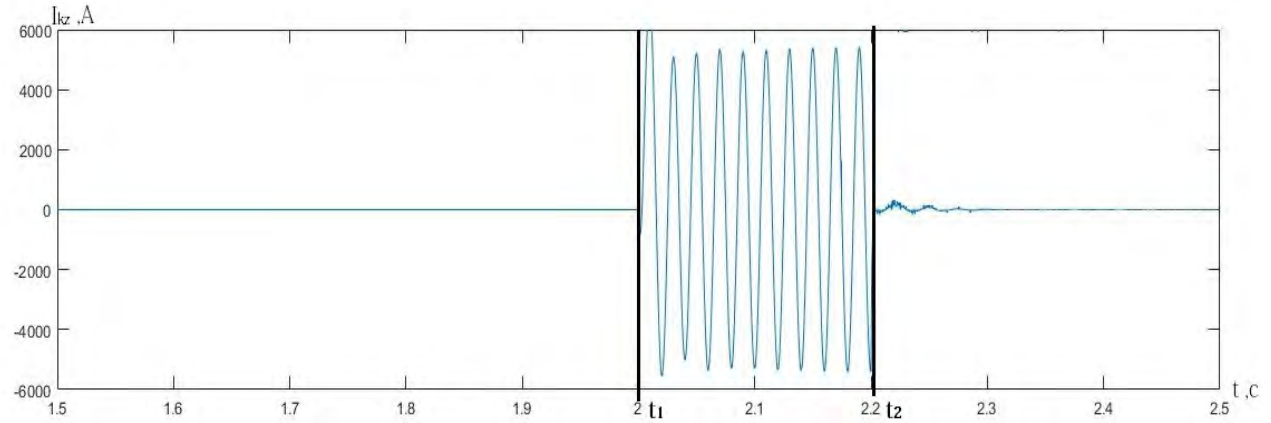


Рис. 9. Диаграмма величины тока двухфазного короткого замыкания в кабеле питания АД типа ЭКВ4-250 с учетом эффекта ИДТ

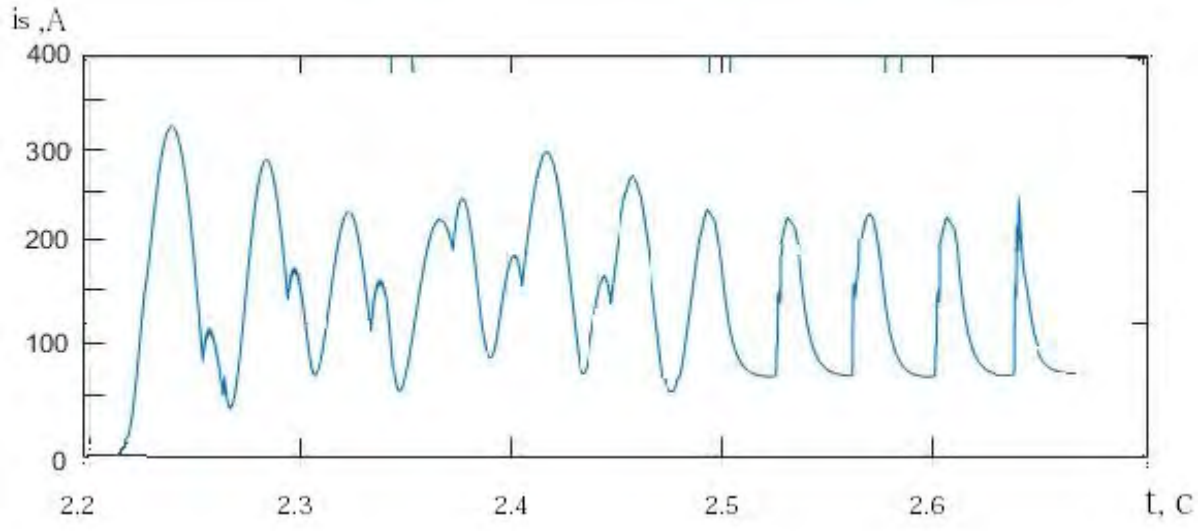


Рис. 10. Диаграмма тока статора АД типа ЭКВ4-250 при ИДТ

Диаграмма тока статора асинхронного двигателя типа ЭКВ4-250 при индукционно-динамическом торможении соответствует реально существующей (рис. 10). Анализ полученной диаграммы позволяет сделать вывод об адекватности исследуемой модели реальному объекту.

Результатами исследования установлен положительный токоограничивающий эффект при индукционно-динамическом торможении, позволяющий предотвратить существование тока двухфазного короткого замыкания в питающем кабеле АД после защитного отключения автоматического выключателя. При этом в случае возникновения цепи утечки тока на землю, уровень количества электричества, проходящего через тело человека, снижается более чем в 1,3 раза и не превышает 38 мА·с, что соответствует критерию электробезопасности.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Выводы

В результате проведенных исследований установлена принципиальная возможность ускоренного подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя на основе применения принципа индукционно-динамического торможения.

В дальнейшем актуальной является задача исследования характера изменения параметров рассматриваемой системы с учетом изменения угла управления тиристорами.

Список литературы

1. High voltage mining equipment for use underground: handbook. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2007. – 68 p.
2. Риман, Я.С. Защита подземных электрических установок угольных шахт / Я.С. Риман. – М.: Недра, 1977. – 206 с.
3. Переходные процессы в системах электроснабжения: учеб. для вузов / Г.Г. Пивняк [и др.]. – М.: Энергоатомиздат; Днепропетровск: НГУ, 2003. – 548 с.
4. Berryann R.J. Evolution of Longwall Mining and Control Systems in the United States [Electronic resource] / R.J. Berryann, J.A. Voelker // Mine Safety and Health Administration, Division of Electric Safety. – Triadelphia, West Virginia, 2005. – Available at https://pdfs.semanticscholar.org/6827/53887a0b319296f716beb11b9f01273115a1.pdf?_ga=2.1670840.803898779.1508794395-959523617.1508794395
5. Groh, H. Explosion protection: electrical apparatus and systems for chemical plants, oil and gas industry, coal mining / Heinrich Groh. – Amsterdam; London: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – 524 p.
6. Маренич, К.М. Наукові основи впровадження автоматичного захисного двобічного знеструмлення шахтної дільничної електромережі: монографія / К.М. Маренич, І.В. Ковальова. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – 125 с.
7. Маренич, К.Н. Теоретические основы и принципы применения защитного обесточивания рудничных электротехнических комплексов: монография / К.Н. Маренич. – Донецк: Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2015. – 234 с.
8. Шишкин, Н.Ф. Быстродействующая защита шахтных сетей от замыкания на землю / Н.Ф. Шишкин. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 53 с.
9. Шишкин, Н.Ф. Быстродействующая защита от токов утечки на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В / Н.Ф. Шишкин. – М.: ИГД, 1960. – 50 с.
10. Пат. 103934 (UA), МПК (2006.01) H02H 3/02, H02H 3/10. Пристрій захисту від впливу зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна на точку ушкодження в кабелі живлення / К.М. Маренич, І.В. Ковальова. – a2012 01369; заявл. 09.02.2012; опубл. 10.12.2013. Бюл.№23.
11. Маренич, К.Н. Синхронное двустороннее обесточивание поврежденного участка кабеля шахтной участковой электросети / К.Н. Маренич, И.В. Ковалева // Уголь Украины. – 2011. – №5. – С. 53-54.
12. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 Вт. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. Введ. 1979-01-01; внес. изм. согл. ИУС 11-80, 7-81, 11-83; соответствует СТ СЭВ 2309-80. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 13 с.
13. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. / В. С. Дзюбан [и др.]; под ред. Б.Н. Ванеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: Юго-Восток Лтд, 2001. – Т.1. – 477 с. Т.2 – 440 с.
14. Маренич, К.Н. Проблематика электробезопасности системы «кабель-двигатель» участка шахты / К.Н. Маренич // Наукові праці Донецького державного технічного університету, серія гірничо-електромеханічна. – 2001. – Вип.27. – С. 270-277.

K.N. Marenich /Dr. Sci. (Eng.)/, E.S. Dubinka
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE EVOLUTION OF TECHNICAL SOLUTIONS TO THE PROBLEM OF REVERSE ENERGY FLOWS SUPPRESSION IN INDUCTION MOTORS

Background. *The technical solution of parameter limitations of the reverse electromotive force (EMF) of an induction motor considered, which is necessary for the suppression of the reverse energy flow of the induction motor (IM) of the multi-machine electrotechnical complex (ETC) of the mine site in the state of free coasting after tripping the mains.*

Materials and/or methods. *Established that in the operation of the electricity supply systems of the technological sites of coal mines the induction motors of medium and high power are able to create*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

long-time reverse energy flows, which creates a precedent for the maintenance of the precarious state of the electrotechnical complex in case when the reason for shutoff was a short circuit in the power connection or leakage of current to ground. These electrical factors are the reason of maintenance in the switched-on state of contactors of starters and time increase of the current flow in an emergency point of an electric network that reduces the efficiency of automatic protection and can cause negative consequences.

Results. *Solving of the problem of preventing the dangerous effects of reverse energy flows was carried out in different directions. The currently known technical solutions for detecting the emergency condition of the electrical network do not allow proper ensuring of the electrical safety, which determines the relevance of the search for effective technical solutions in the field of protective suppression of reverse energy flows.*

Conclusion. *The essence of the paper is in the analysis of the existing variants of protections supposing suppression of return energy flows of induction motors; substantiation of the structure of the AD model in the mode of induction-dynamic braking. Considered the possibility of maintaining the accelerated decline of the reverse EMF inducted in the stator of the induction motor, which determines the possibility of the mode use for separating the IM from the reverse energy flow network in its protective shutoff. The parameters of the model are determined by the methods of computer modeling, which allow reducing currents and voltages to safe values as well as maintaining the reverse EMF at a safe level.*

Keywords: *electrotechnical complex, induction motor, reverses energy flow, limitation.*

Сведения об авторах

К.Н. Маренич
SPIN-код: 8632-8425
Author ID: 377905
ORCID iD: 0000-0002-6309-4986
Телефон: +380 (71) 301-98-61
Эл. почта: knm@donntu.org

Е.С. Дубинка
SPIN-код: 3110-5247
Author ID: 914120
ORCID iD: 0000-0002-3003-6421
Телефон: +380 (71) 302-74-94
Эл. почта: ekaterina_sd@bk.ru

Статья поступила 10.04.2018 г.
© К.Н. Маренич, Е.С. Дубинка, 2018
Рецензент д.т.н., проф. Э.Г. Куренный



УДК 669.85/.86.018:536.42

Е.В. Додонова, В.А. Гольцов /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КИНЕТИКИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ВОДОРОДОМ, В ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ ТИПА R_2Fe_{17} (R–Sm, Y)

В работе приводятся результаты разработки специальной водородно-вакуумной установки для исследования кинетики индуцированных водородом фазовых превращений в магнитожестких сплавах типа R_2Fe_{17} (R-Sm,Y) в интервале рабочих давлений водорода от 0,1 до 0,2 МПа, в вакууме приблизительно до 1 Па и при температурах до 900 °С.

Ключевые слова: *фазовые превращения, индуцированные водородом, HDDR-процесс, интерметаллические сплавы Sm_2Fe_{17}, Y_2Fe_{17}, $Nd_2Fe_{14}B$.*

Постановка проблемы

Ферромагнитные материалы на основе соединений редкоземельных и переходных металлов, в частности Sm_2Fe_{17}, Y_2Fe_{17}, Sm_2Co_{17}, $Nd_2Fe_{14}B$, широко используются для изготовления постоянных магнитов благодаря таким своим свойствам, как высокие температура Кюри, поле анизотропии и остаточная намагниченность [1].

Одним из самых перспективных способов повышения свойств постоянных магнитов является их наноструктурирование. Такая идея возникла на основе экспериментальных и теоретических результатов. В частности, в 1989 г. исследование магнитных свойств быстроохлажденных двухфазных сплавов $Nd_2Fe_{14}B$–Fe_3B с высокодисперсной микроструктурой позволило установить существенное повышение их остаточной намагниченности и удельной магнитной энергии [2].

Известно, что для обработки постоянных магнитов на основе соединений железа, кобальта и редкоземельных металлов применяют водород, поскольку он приводит к изменению фазово-структурного состояния материалов и улучшает их свойства [3]. Одним из распространенных методов водородно-вакуумной обработки является HDDR-процесс (Hydrogenation–Decomposition–Desorption–Recombination) [4]. Его применяют при производстве высококоэрцитивных порошков $Nd_2Fe_{14}B$ [5]. Как известно, метод HDDR подразделяется на два этапа. На первом из них введение водорода в сплав при температурах 600-900 °С индуцирует протекание прямого фазового превращения – распада исходной интерметаллической фазы на гидрид редкоземельного металла и ферромагнитную фазу α–Fe, а в случае со сплавом $Nd_2Fe_{14}B$ еще и на борид железа Fe_2B. На втором этапе – при эвакуации водорода из сплава в вакууме при повышенной температуре – из этих фаз образуется (рекомбинирует) исходная фаза с измененной морфологией, в частности с измельченными приблизительно до 0,3 мкм зернами [6].

Учитывая вышесказанное, принципиально важной задачей является исследование кинетических закономерностей фазовых превращений, индуцированных водородом в магнитожестких сплавах для постоянных магнитов, которое позволило бы построить изотермические кинетические диаграммы и с их помощью определить оптимальные параметры водородно-вакуумной обработки сплавов, а также установить основные факторы, определяющие развитие превращений.

Анализ последних исследований и публикаций

Водородная обработка материалов (ВОМ) и металлов как новая область физики металлов и физического металловедения основана на специфических особенностях водорода, дающих возможность сильного и управляемого воздействия на материалы [7].

Водородное воздействие индуцирует в некоторых материалах развитие фазовых превращений, которые были названы индуцированными водородом фазовыми превращениями (ИВФП). Это новое научное направление стало разрабатываться сравнительно недавно и все больше привлекает внимание физиков, химиков и металловедов, целью которых является раскрытие природы превращений такого типа, их классификация в ряду известных превращений в твердом теле, исследование особенностей их кинетики и т.д.

Гидридные (диффузионно-кооперативные) фазовые превращения имеют место в гидридообразующих материалах при температурах: $T<(0{,}20\text{-}0{,}45)T_m$ (T_m – температура плавления). При этих температурах диффузионная подвижность больших атомов металла практически полностью подавлена. Отличительной особенностью этих диффузионно-кооперативных превращений является то, что любое перераспределение водорода в подсистеме внедрения проис-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ходит только путем диффузии. Обзор основных закономерностей гидридных превращений приведен в работе [8]. Данный вид фазовых превращений служит основой ВОМ многих видов: упрочнение материалов водородофазовым наклепом, рекристаллизация, технология производства сплавов с гидридным эффектом памяти формы, технология получения порошков и активации интерметаллических накопителей водорода и магнитных материалов и т.д. [8,9].

В металлах и сплавах, имеющих большой ресурс пластичности, в результате водородного воздействия и гидридного превращения наблюдается явление водородофазового наклепа (ВФН). Механизмы этого явления обеспечивают перманентную, частичную релаксацию внутренних водородных напряжений путем внутренней пластической деформации и генерированием дислокаций. В результате имеет место упрочнение материала и изменение его структуры и свойств [10,11].

Материалы, активно взаимодействующие с водородом, образующие гидриды, но не имеющие ресурса пластичности, например интерметаллиды, разрушаются при взаимодействии с водородом. Такое разрушение обусловлено тем, что параметр кристаллической решетки (удельный объем) гидридов намного больше такового для исходного интерметаллида. Внутренние напряжения, имеющие место при водородном насыщении и диффузионно-кооперативных превращениях, не имеют возможности релаксировать путем водородофазового наклепа. В результате напряжения достигают предела прочности и материал разрушается. До первой половины 80-х разрушение интерметаллидов рассматривалось как неуправляемый процесс, однако позднее на примере сплава $LaNi_5$ [12] было показано, что хрупкие по своей природе интерметаллиды могут быть управляемо обработаны водородом. Важным следствием вышеупомянутой обработки является то, что можно получить порошки с заданным средним размером частиц и необходимой дисперсностью [12]. Именно на этом базируется так называемая HD-обработка (Hydrogen Decrepitation), или гидридное диспергирование, используемое для получения порошков из магнитожестких сплавов для постоянных магнитов типа $Nd_2Fe_{14}B$ [13]. Таким способом подвергались обработке не только сплавы $Nd_2Fe_{14}B$, но и другие магнитотвердые сплавы $PrCo_5$, $NdCo_5$, $SmCo_5$ и ряд других [14]. Особо важно, что такая обработка в отношении сплавов типа $SmCo_5$, $Nd_2Fe_{14}B$ позволяет не только получить мелкодисперсный порошок, но и улучшить магнитные характеристики постоянных магнитов, изготовленных из таких порошков. Так, например, HD-обработка сплава $SmCo_5$ позволила увеличить максимальное энергетическое произведение $(BH)_{max}$ приблизительно на 8 % по сравнению со сплавами, обработанными путем механического измельчения [14].

Цель (задачи) исследования

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы разработать и создать специальную водородно-вакуумную установку для исследования кинетики индуцированных водородом фазовых превращений (ИВФП) в магнитожестких сплавах типа R_2Fe_{17}, отработать методику исследований прямых и обратных ИВФП в режиме непрерывного контроля их развития. Это позволит, во-первых, экспериментально установить основные закономерности кинетики ИВФП в магнитотвердых сплавах типа R_2Fe_{17}; во-вторых – исследовать влияние температуры и давления водорода на кинетику изотермических прямых и обратных ИВФП в данных сплавах и обобщить полученные экспериментальные данные в форме изотермических кинетических диаграмм фазовых превращений, принятых для научного анализа и практического использования.

Основной материал исследования

Для решения поставленных в работе задач была сконструирована и изготовлена водородно-вакуумная установка, позволяющая изучать кинетику индуцированных водородом фазовых превращений в интервале рабочих давлений водорода от 0,1 до 0,2 МПа, в вакууме приблизительно до 1 Па и при температурах до 900 °С. Принципиальная схема водородно-вакуумной части созданной установки приведена на рис. 1.

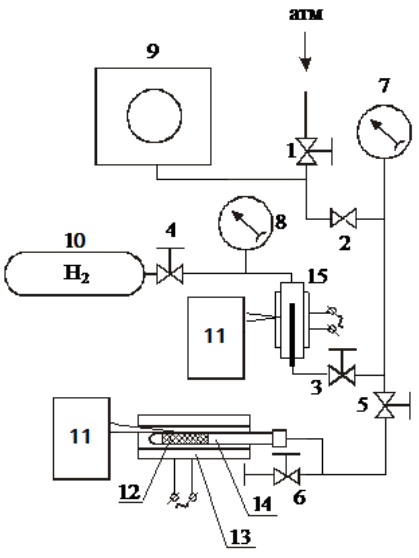


Рис. 1. Водородно-вакуумная часть экспериментальной установки

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Установка выполнена в настольном варианте и имеет следующие узлы: баллон для хранения водорода 10; вентили 1-6; два деформационных образцовых манометра типа МО, имеющие разные пределы измерения: 7 – для контроля давления водорода в ходе фазового превращения, 8 – для контроля давления водорода, поступающего в диффузионный фильтр водорода 15; реакционная камера 14, в которую помещается образец 12, выполнена из неферромагнитной нержавеющей стали. Нагрев рабочей камеры осуществляется электропечью 13, питаемой постоянным током. Температура образца, а также температура палладиевой мембраны диффузионного фильтра водорода измеряется хромель-алюмелевой термопарой с помощью цифрового вольтметра В7-21А – 11. Контроль и регулировка температуры осуществляется блоком высокоточной регулировки температуры, созданным на основе блока ВРТ-2 с точностью ±0,05 °С, принципиальная электрическая схема которого представлена на рис. 2. Система может вакуумироваться до давления около 1 Па форвакуумным насосом ВН-641М – 9.

В основу поиска методики регистрации количества новых фаз, выделяющихся в ходе фазовых превращений, был положен тот факт, что в исследуемом температурном интервале (610-760 °С) исходные сплавы Sm_2Fe_{17} и Y_2Fe_{17} парамагнитны (T_c=312 °С) [15], а фаза α–Fe является ферромагнитной. Именно этот факт позволил создать экспериментальную установку, в основу которой был положен магнитометрический метод Б.А. Садикова, используемый для исследования фазовых превращений в сталях [16], модифицированный с учетом специфики поставленных в работе задач, т.е. с необходимостью проведения обработки сплавов типа R_2Fe_{17} в атмосфере водорода и в вакууме при относительно высоких температурах (до 800-900 °С).

Перед подачей в рабочую камеру водород очищался от примесей с помощью фильтра изотопов водорода с диффузионным фильтрующим элементом трубчатого типа из сплава палладия В–2 [17,18]. Нагрев диффузионного фильтра производился с помощью электропечи, питаемой постоянным током, до температуры 500 °С.

Блок регистрации относительного количества фаз в ходе превращений изображен на рис. 3. Он состоит из намагничивающей катушки 1, создающей переменное магнитное поле и состоящей из 5000 витков медного провода диаметром 0,45 мм; двух идентичных измерительных катушек 2, расположенных вокруг рабочей камеры 3 и имеющих по 4500 витков медного провода сечением 0,18 мм и включенных встречно друг другу; стабилизированного блока питания С-0,5Э намагничивающей катушки 4; цифрового вольтметра Ф-564, использующегося как основной измерительный прибор; регистрирующего самописца КСП-4 – 5. Для предотвращения перегрева измерительных катушек 2 было использовано водяное охлаждение.

В условиях проводимого эксперимента цифровым вольтметром Ф-564 регистрировалась дифференциальная ЭДС взаимоиндукции ΔE, равная разности ЭДС взаимоиндукции, индуцируемых намагничивающей катушкой 1 в измерительной катушке без образца (I – рис. 3) и с

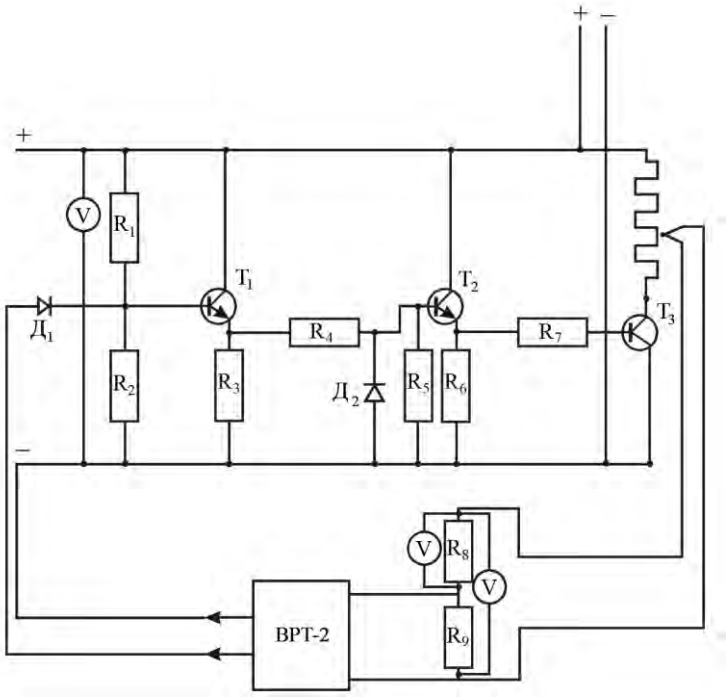


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема блока регулировки температуры

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

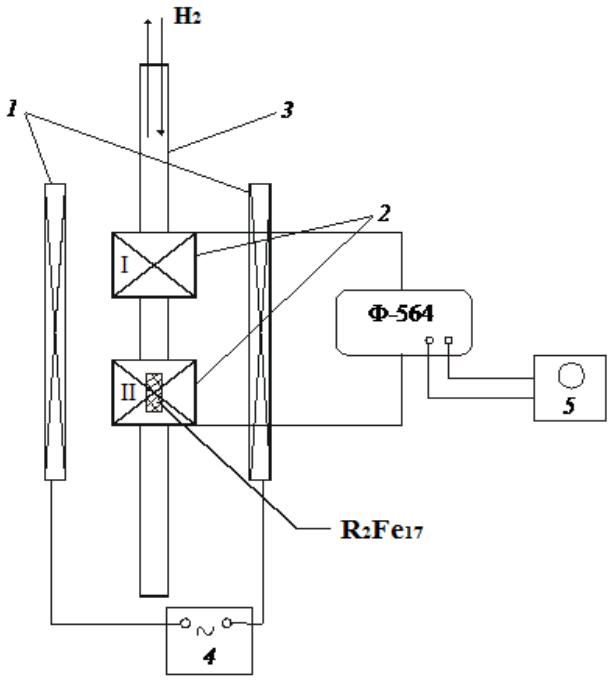


Рис. 3. Измерительная часть водородно-вакуумной установки

образцом R_2Fe_{17} (II – рис. 3), подвергаемым превращениям. При фазовом превращении в катушке II ЭДС взаимоиндукции E_{II} зависит от количества ферромагнитной составляющей в образце R_2Fe_{17}.

Для калибровки установки были использованы образцы Fe (99,9 %) и Fe_2B (99,9 %). Таким образом, вышеописанный метод измерения дифференциальной ЭДС позволил непрерывно определять изменение количества ферромагнитных фаз, содержащихся в объеме образца R_2Fe_{17}, в ходе изотермических индуцированных водородом фазовых превращений.

Выводы

На основе магнитометрического метода Б.А. Садикова [16] была разработана и создана специальная водородно-вакуумная установка для исследования кинетики индуцированных водородом фазовых превращений в магнитотвердых сплавах типа R_2Fe_{17} в интервале рабочих давлений водорода от 0,1 до 0,2 МПа, в вакууме до 1 Па и при температурах до 900 °С. Отлажена методика исследований прямых и обратных ИВФП в режиме непрерывного контроля их развития. Это позволит экспериментально установить основные закономерности кинетики ИВФП в магнитотвердых сплавах типа R_2Fe_{17}, а также исследовать влияние температуры и давления водорода на кинетику изотермических прямых и обратных ИВФП в данных сплавах, обобщить полученные экспериментальные данные в форме изотермических кинетических диаграмм фазовых превращений.

Список литературы

1. Mandal, K. The study of magnetocaloric effect in R_2Fe_{17} (R=Y, Pr) alloys / K. Mandal [et al.] // Phys. D.: Appl. Phys. – 2004. – Vol. 262. – No.19. – P. 26-28.
2. Coehoorn, R. Meltspun permanent magnet materials containing Fe_3B as the main phase / R. Coehoorn, D.B. de Mooij, C. de Waard // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1989. –Vol.80. – Issue 1. – P. 101-104.
3. Булык, И.И. Влияние водородной обработки на микроструктуру и магнитные свойства сплава КС37 ($SmCo_5$ – основа) / И.И. Булык [и др.] // Физика и техника высоких давлений. – 2013. – Т.23. – №4. – С. 67-82.
4. Gutfleisch, O. Texture inducement during HDDR-processing of NdFeB / O. Gutfleisch [et al.] // IEEE Trans. Magn. – 2002. – Vol.38. – P. 2958-2967.
5. Honkura, Y. Proc. 18th Int. Workshop on High Performance Magnets and their Applications. – Annecy, France (on CD). – 2004. – P. 559-565.
6. Gutfleisch, O. Characterisation of solid–HDDR processed $Nd_{16}Fe_{76}B_8$ alloys by means of electron microscopy / O. Gutfleisch [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 1995. – Vol.147. – P. 320-330.
7. Goltsov, V.A. Hydrogen treatment (processing) of materials: current status and prospects // J. Alloys Comp. – 1999. – Vol.293-295. – P. 844-857.
8. Гольцов, В.А. Явления, обусловленные водородом и индуцированными им фазовыми превращениями // Взаимодействие водорода с металлами. – М.: Наука, 1987. – С. 264-292.
9. Goltsov, V.A. The phenomenon of controllable hydrogen phase naklep and prospects for its use on Metal Science and Engineering // Materials Science and Engineering. – 1981. – Vol.49. – No.2. – P. 109-125.
10. Goltsov, V.A. Hydrogen treatment of niobium: strengthening and structural changes / V.A. Goltsov, V.M. Dekanenko, N.N. Vlasenko // Materials Science and Engineering. – 1990. – Vol.129A. – P. 239-247.
11. Goltsov, V. A. Hydrogen phase "naklep" and hydrogen treatment of niobium / V.A. Goltsov, N.N. Vlasenko // Int. J. Hydrogen Energy. – 1997. – Vol.22. – No.2/3. – P. 151-159.
12. Гольцов, В.А. Разрушение водородом сплава $LaNi_5$ / В.А. Гольцов, А.Ф. Волков, Л.В. Шевченко // Изв. вузов. Цветн. Металлургия. – 1985. – №2. – С. 80-83.
13. Harris, I.R. The hydrogen decrepitation of an $Nd_{15}Fe_{77}B_8$ magnetic alloy / I.R. Harris, C. Noble, I. Bailley // J. Less-Common Metals. – 1985. – Vol.106. – No.1. – P. 1-4.
14. Вербецкий, В.Н. Синтез и свойства много-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

компонентных гидридов металлов: автореф. дисс. д-ра хим. наук: 02.00.01 / Вербецкий Виктор Николаевич. – М.: МГУ, 1998. – 73 с.
15. Мишин, Д.Д. Магнитные материалы. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.
16. Лившиц, Б.Г. Физические свойства черных металлов и методы их испытаний. – Москва-Ленинград: ОНТИ, 1937. – 253 с.
17. Гольцов, В.А. Новый сплав В–2 на основе палладия для диффузионных фильтров водорода / В.А. Гольнов, Н.И. Тимофеев и др. // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 1977. – №4. – С. 117-120.
18. Гольцов, В.А. Диффузионные фильтры изотопов водорода / В.А. Гольцов, А.Ф. Волков // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами: сборник докладов IV международной конференции IHISM'10, 5-10 июля 2010 г., г. Воронеж. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. – С. 283-286.

E.V. Dodonova, V.A. Goltsov /Dr. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

EXPERIMENTAL EQUIPMENT FOR STUDYING HYDROGEN-INDUCED PHASE TRANSFORMATIONS IN INTERMETALLIC ALLOYS OF THE R_2Fe_{17} TYPE (R=Sm, Y)

Background. *Hydrogen treatment of alloys, which is based on rare-earth and transition metals of the R_2Fe_{17} type (R=Sm, Y) is a promising and effective method of increasing the magnetic properties of alloys used for the production of permanent magnets. One of the most common methods of hydrogen treatment is the HDDR-process (Hydrogenation–Decomposition–Desorption–Recombination), which changes the phase-structural state of hard magnetic alloys and improves their properties. The main aim of studying the kinetic features of hydrogen-induced phase transformations in hard magnetic alloys for permanent magnets is an isothermal kinetic diagrams construction and determination of the optimal parameters of hydrogen treatment of alloys with their help, and also detection of the main factors, which determine the development of these transformations.*

Materials and/or methods. *To solve the problem set in the paper, the experimental hydrogen-vacuum equipment designed and manufactured. It provides the opportunity to study the kinetics of hydrogen-induced phase transformations in the working pressure range of hydrogen from 0.1 to 0.2 MPa, in vacuum to ≈ 1 Pa and at temperatures up to 900 °C. The method for new phase registration during phase transformations based on the fact that the initial alloys are paramagnetic in the temperature range 610-760 °C and the α-Fe phase is ferromagnetic. The Sadikov's magnetometric method applied to phase transformations in steels studying modified taking into account the specific nature of the tasks assigned to the paper.*

Results. *Special hydrogen-vacuum experimental equipment developed and created on the basis of the Sadikov's magnetometric method. It makes it possible to study the kinetics of hydrogen-induced phase transformations in magnetically hard alloys of the R_2Fe17 type in the range of hydrogen working pressures from 0.1 to 0.2 MPa, in vacuum to ≈ 1 Pa and at temperatures up to 900 °C. In the paper given the basic schemes of the hydrogen-vacuum and measuring part of the experimental equipment, as well as the scheme of the temperature adjustment unit.*

Conclusion. *The importance of studying the hydrogen-induced phase transformations kinetics in R_2Fe_{17} type hard magnetic alloys substantiated. The experimental hydrogen-vacuum equipment developed, constructed and tested. It will allow establishing regularities of the explored direct and reverse transformations at various temperatures, hydrogen pressures, and also in vacuum.*

Keywords: *phase transformations, hydrogen treatment, HDDR-process, intermetallic alloys Sm_2Fe_{17}, Y_2Fe_{17}, $Nd_2Fe_{14}B$.*

Сведения об авторах

Е.В. Додонова
SPIN-код: 2947-1431
Author ID: 959006
ORCID iD: 0000-0002-6772-3815
Телефон: +380 (71) 334-94-71
Эл. почта: heldon77@yandex.ru

В.А. Гольцов
SPIN-код: 4037-2613
Author ID: 523497
ORCID iD: 0000-0001-8192-136X
Телефон: +380 (62) 312-97-50
Эл. почта: goltsov@physics.donntu.org

Статья поступила 19.03.2018 г.
© Е.В. Додонова, В.А. Гольцов, 2018
Рецензент д.т.н., проф. А.Б. Бирюков

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, НАПРАВЛЯЕМЫМ В РЕДАКЦИЮ

1. Основной текст статьи должен содержать такие необходимые элементы, выделенные заголовками, как:

– **постановка проблемы** в обобщенном виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;

– **анализ последних исследований и публикаций**, в которых начато решение данной проблемы и на которые опираются авторы, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья;

– формулировка **цели (задачи) исследования**;

– изложение **основного материала исследования** с полным обоснованием полученных научных результатов;

– **выводы** по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

2. Статья, основной текст вместе с рисунками и др. нетекстовыми элементами, должна быть объемом **8…10 полных** страниц формата А4 (210×297 мм) с полями **20** мм с каждой стороны. Рукопись статьи необходимо оформлять с помощью редактора MS Word. Шрифт – Times New Roman, **12** пт, стиль – обычный. Межстрочный интервал – одинарный. Расстановка переносов – автоматическая. Выравнивание – по ширине страницы. Страницы не нумеровать.

3. Структура статьи (каждый элемент с новой строки): код УДК; инициалы и фамилии авторов с указанием ученой степени каждого (количество авторов **не более 3-х** от одной организации); название организации, город, где работают авторы; название статьи; аннотация на русском языке (объемом **не более 300** символов); ключевые слова (**от 3 до 5**); основной текст статьи; список литературы. Сокращение слов в тексте, рисунках и таблицах не допускается.

В аннотации на русском языке сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

В конце статьи, после списка литературы приводятся инициалы и фамилии авторов, ученые степени, организации, города, название статьи, аннотация и ключевые слова на английском языке

Аннотация на английском языке должна представлять собой резюме, призванное выполнять функцию независимого от статьи источника информации. Резюме должно быть информативным (не содержать общих слов), оригинальным (не являться калькой аннотации на других языках), содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований), структурированным (следовать логике описания результатов в статье), компактным, но не коротким (объемом **от 250 до 300** слов). Типичная структура резюме: состояние вопроса (**Background**); материалы и/или методы исследования (**Materials and/or methods**); результаты (**Results**); заключение (**Conclusion**).

Внимание! Убедительная просьба не разбивать текст на колонки, как это сделано в журнале, т.к. это усложняет редакторскую обработку статьи!

4. **Обязательным условием** является наличие в статье графического материала (рисунков, графиков, схем, фотографий), размером **не менее 80×80** мм, в формате *.tif или *.jpg, разрешением **не менее 300** dpi. Графический материал внедренными объектами размещается по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Все позиции, обозначенные на рисунках, должны быть объяснены в тексте. Под каждым рисунком указывается его порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце). Рисунки должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

Внимание! Запрещается внедрять графические материалы в виде объектов, связанных с др. программами, например, с КОМПАС, MS Excel и т.п. Рисунки, выполненные непосредственно в MS Word не принимаются.

5. Математические формулы необходимо выполнять с помощью редактора формул **MS Equation Editor 3.0** в соответствии со следующими размерами: обычный символ – **11** пт; крупный индекс – **7** пт; мелкий индекс – **5** пт; крупный символ – **13** пт; мелкий символ – **8** пт.

Все величины, входящие в формулы, должны быть объяснены в тексте. Формулы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу. Формулы выполняются курсивом, **кроме цифр и символов греческого алфавита**. Формулы нумеруются (справа в круглых скобках, не отступая от формулы) **только в том случае**, если в тексте на них имеются ссылки.

Внимание! Количество формул в статье **не более 5**. Запрещается выполнять формулы с помощью MathCAD или др. аналогичных программ.

6. Таблицы должны иметь порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце) и располагаться по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Таблицы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

7. **Обязательным условием** является наличие в статье списка литературы, который приводится после выводов через один интервал (пустую строку) под заголовком **Список литературы**. Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу по тексту заключаются в квадратные скобки. В списке литературы должно быть **не менее 3-х** публикаций, вышедших **за последние 5** лет, а также **не менее 3-х** зарубежных (англоязычных) публикаций.

Для принятия решения о публикации статьи в журнале, в адрес редакции необходимо выслать:

– сопроводительное письмо (с указанием, что статья ранее нигде не публиковалась) от организации, где работают авторы и сведения об авторах статьи;

– электронный вариант статьи (имя файла составляется из фамилий авторов, например, ИвановПетров.doc) и сведений об авторах (имя файла – ИвановПетров_sved.doc).

В сведениях об авторах для каждого соавтора обязательно должен быть указан адрес персональной эл. почты.

Для ускорения подготовки очередных номеров журнала, просьба передавать сопроводительное письмо в отсканированном виде, электронный вариант статьи и сведения об авторах по эл. почте на адрес: **vestnikdonntu@gmail.com**

Внимание! Убедительная просьба, проверить получение редакцией материалов любым из способов (по телефонам **+380 (66) 176-72-65, +380 (62) 301-07-89** или эл. почте).

Редакция оставляет за собой право возвращать статьи авторам на доработку в следующих случаях: статья небрежно оформлена и не соответствует требованиям редакции журнала, приведенным выше; статья требует доработки в соответствии с замечаниями рецензента и редакторов; отсутствует сопроводительное письмо от организации, где работают авторы или сведения об авторах.

Требования к рекламно-информационным материалам, публикация которых оплачивается, согласовываются непосредственно с редакцией журнала.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org