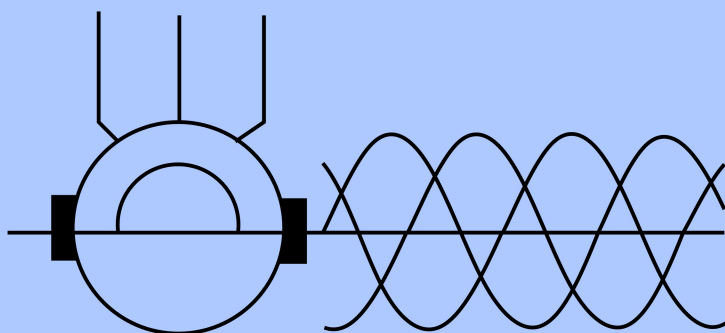
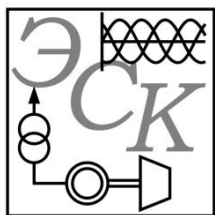


Электротехнические Системы и Комплексы





ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№3(36), СЕНТЯБРЬ 2017

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, а также в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Редакционная коллегия

Председатель редакционной коллегии:

С.И. Лукьянов – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Главный редактор:

В.Р. Храмин – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Ответственный редактор:

Е.А. Панова – доц., канд. техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Секция теории и практики автоматизированного электропривода:

А.С. Сарваров – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

А.Е. Козярук – проф., д-р техн. наук, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия;

О.А. Кравченко – доц., д-р техн. наук, ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия.

Секция электро- и теплоэнергетики:

А.В. Паздерин – проф., д-р техн. наук, УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

Е.Б. Агапитов – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Н.Ф. Джагаров – проф., д-р техн. наук, Высшее военно-морское училище им. Николы Вапцарова, г. Варны, Болгария.

Секция энерго- и ресурсосбережения:

Р.Г. Мугалимов – доц., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

О.И. Осипов – проф., д-р техн. наук, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия;

В.Н. Мещеряков – проф., д-р техн. наук, ЛГТУ, г. Липецк, Россия.

Секция электроснабжения:

Г.П. Корнилов – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Ю.П. Журавлев – канд. техн. наук, гл. энергетик ОАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

Секция промышленной электроники, автоматики и систем управления, информационное, математическое и программное обеспечение технических систем:

О.С. Логунова – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

С.М. Андреев – доц., канд. техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Е.Н. Ишиметьев – д-р техн. наук, директор по стратегическому развитию ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

Секция электротехнологий в промышленности:

А.М. Зюзев – доц., д-р техн. наук, УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

А.Л. Карякин – с.н.с., д-р техн. наук, УГТУ, г. Екатеринбург, Россия;

И.В. Бочкарев – проф., д-р техн. наук, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан.

Секция мониторинга, контроля и диагностики электрооборудования:

А.С. Карандаев – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

И.М. Ячиков – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Технические редакторы:

Н.В. Кутекина – МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Д.А. Савинов – МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017

Подписной индекс издания 45083 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-58181 от 29 мая 2014 г.

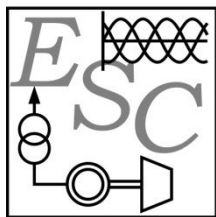
Адрес редакции:

455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, д. 38. ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
e-mail: ecis.red@gmail.com

Журнал отпечатан на полиграфическом участке
МГТУ им. Г.И. Носова.

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выход в свет 26.09.2017. Заказ 422. Тираж 500 экз. Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 3(36) SEP., 2017

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific issues publishing main results of Ph.D. thesis in Engineering Science, doctoral thesis, and in the database of Russian Scientific Citation Index (RSCI).

Editorial Board

Head of the Editorial Board:

S.I. Luk'yanov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Editor in Chief:

V.R. Khramshin – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Executive Editor:

E.A. Panova – Associate Professor, Ph.D.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Secton of Theory and Practice of Automated Electric Drive:

A.S. Sarvarov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

A.E. Kozyaruk – Professor, D.Sc. (Engineering),
St. Petersburg Mining University, St. Petersburg,
Russia;

O.A. Kravchenko – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), SRSPU (NPI), Novocherkassk,
Russia.

Secton of Power Engineerign:

A.V. Pazderin – Professor, D.Sc. (Engineering),
UrFU named after the first President of Russia
B.N.Yeltsin, Ekaterinburg, Russia;

E.B. Agapitov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

N.F. Dzhagarov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NVNA, Varna, Bulgaria.

Secton of Energy- and Resources-Economy:

R.G. Mugalimov – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

O.I. Osipov – Professor, D.Sc. (Engineering),
MPEI, Moscow, Russia;

V.N. Meshcheryakov – Professor, D.Sc.
(Engineering), LSTU, Lipetsk, Russia.

Secton of Electric Power Supply:

G.P. Kornilov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

Yu.P. Zhuravlev – Ph.D. (Engineering), chief
power engineer, MMK OJSC, Magnitogorsk, Russia.

Secton of Power Electronics, Automation and Control Systems, Technical Systems Dataware and Software:

O.S. Logunova – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

S.M. Andreev – Associate Professor, Ph.D.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

E.N. Ishmet'ev – D.Sc. (Engineering), director
on strategic development, KonsOM SKS CJSC,
Magnitogorsk, Russia.

Secton of Industrial Electro Technology:

A.M. Zyuzev – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), UrFU named after the first
President of Russia B.N.Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia;

A.L. Karyakin – Senior Research Associate, D.Sc.
(Engineering), UFMU, Ekaterinburg, Russia;

I.V. Bochkarev – Professor, D.Sc. (Engineering),
KSTU, Bishkek, Kyrgyzstan.

Secton of Monitoring, Diagnostics and Control of Electric Equipment:

A.S. Karandaev – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

I.M. Yachikov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Technical Editors:

N.V. Kutekina – NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

D.A. Savinov – NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

© FSBEI HE NMSTU, 2017

The subscription index of the journal is 45083 in the «Pressa Rossii» union catalog, vol. 1.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor).

Registration certificate PI No. FS77-58181 on May 29, 2014 .

The publisher:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia

The Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical
University

e-mail: ecis.red@gmail.com

Printed by the NMSTU printing section,

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk, 455000, Russia.

Publication date: 26.09.2017. Order 422. Circulation: 500.

Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	4
<i>Мещеряков В.Н., Евсеев А.М.</i>	
Устройство компенсации гармонических искажений тока в системах с тиристорным преобразователем напряжения	4
<i>Климаш С.В., Климаш В.С., Власьевский С.В.</i>	
Специализированные модули для исследования энергетических показателей электротехнических устройств в среде Matlab	11
<i>Володин Е.В., Осипов О.И.</i>	
Наблюдатели в системах векторного управления синхронным частотно-регулируемым приводом герметичного электронасоса	17
ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	23
<i>Хужина З.Б., Варганова А.В.</i>	
Определение величин экономических плотностей тока в условиях современного рынка на электротехническое оборудование	23
<i>Панова Е.А., Крюкова А.А.</i>	
Применение метода фазных координат для моделирования линий электропередачи систем промышленного электроснабжения	29
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	35
<i>Андреев С.М.</i>	
Прогнозирование времени нагрева заготовок в условиях нестационарного режима работы методических печей	35
<i>Васильев А.Е., Михайлец В.Ф., Сарваров А.С., Даниленко К.В.</i>	
Исследования кинематики исполнительной группы звеньев антропоморфного захвата с групповым приводом	41
МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ	47
<i>Бабанова И.С., Жуковский Ю.Л., Королев Н.А.</i>	
Способ управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и оценки технического состояния электроприводного газоперекачивающего агрегата	47
<i>Белоусов О.С., Петушков М.Ю., Щербина Д.В.</i>	
Разработка методики диагностики электрической части станков с числовым программным управлением	55
ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	59
<i>Логанова О.С., Кухта Ю.Б., Кожушков Е.Ю., Хакимуллин К.</i>	
Программное и математическое обеспечение для моделирования износа бочки прокатных валков	59
<i>Баранкова И.И., Михайлова У.В., Лукьянов Г.И.</i>	
Система прогнозирования транспортного графика электропоездов промышленного предприятия	66
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	71

CONTENT

THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE	4
<i>Meshcheryakov V.N., Evseev A.M.</i>	
Device for Compensation of Harmonic Distortion of Currents in Systems With a Thyristor Voltage Converter	4
<i>Klimash S.V., Klimash V.S., Vlasayevsky S.V.</i>	
Specialized Modules for Calculation of Energy Coefficients of Electrical Engineering Devices in Matlab	11
<i>Volodin E.V., Osipov O.I.</i>	
Observers in Systems of Vector Control of a Synchronous Variable Frequency Drive Sealed Pump	17
ENERGY- AND RESOURCES-ECONOMY	23
<i>Khuzhina Z.B., Varganova A.V.</i>	
Calculation of Economic Current Density in The Modern Electrical Engineering Market	23
<i>Panova E.A., Kryukova A.A.</i>	
Application of Phase Coordinates to an Industrial Power Supply System Overhead Transmission Lines Simulation ..	29
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS	35
<i>Andreev S.M.</i>	
Continuous-Cast Billet Heating Time Forecast in The Context of Non-Stationary Run of a Continuous Furnace ..	35
<i>Vasilyev A.E., Mikhaylets V.F., Sarvarov A.S., Danilenko K.V.</i>	
Investigation of Kinematics of the Final Control Elements of the Anthropomorphic Gripper With a Common Drive	41
MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ELECTRIC EQUIPMENT	47
<i>Babanova I.S., Zhukovsky Yu.L., Korolev N.A.</i>	
Method of Mode Control Based on the Neural Network Fault Diagnosis and Evaluation of the Technical Condition of Electrically Driven Gas Pumping Unit	47
<i>Belousov O.S., Petushkov M.Y., Shcherbina D.V.</i>	
Diagnosis Methodology for Electrical Components of cnc Machines	55
TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE AND SOFTWARE	59
<i>Logunova O.S., Kukhta Iu.B., Kozhushkov E.Y., Kha-kimullin K.</i>	
Software and Math Modeling of Roll Barrel Wear	59
<i>Barankova I.I., Mikhailova U.V., Lukyanov G.I.</i>	
System for Predicting the Transport Schedule of Electric Trains of Industrial Enterprises	66
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	71

УСТРОЙСТВО КОМПЕНСАЦИИ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ ТОКА В СИСТЕМАХ С ТИРИСТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

За более чем полувековой период эксплуатации систем регулируемого электропривода, построенных на полупроводниковых элементах, в качестве наиболее надежных и экономически эффективных систем зарекомендовали себя тиристорные преобразовательные устройства. Тиристорные преобразователи напряжения (ТПН) заняли свою нишу в качестве устройств плавного пуска (УПП) мощных асинхронных электроприводов и являются перспективными для использования в качестве систем с экономайзером и для разработки устройств регулирования скорости привода. Однако применение ТПН вызывает существенные гармонические искажения формы потребляемого тока. Излишне потребляемая реактивная мощность, потребление постоянного тока при несогласованности углов открытия тиристорных импульсов, вызываемые их коммутацией, приводят к возникновению дополнительных потерь электрической энергии в элементах системы электроснабжения, ускоряют старение изоляции токоведущих частей оборудования и негативно влияют на его электромагнитную совместимость. Причем, если для УПП с редкими пусками привода данными воздействиями можно пренебречь, ввиду шунтирования ТПН после разгона двигателя, то для УПП с частыми пусками и систем, где ТПН остается в работе после разгона, их необходимо учитывать. В данной работе описано решение, направленное на компенсацию гармонических искажений потребляемого тока в системах с ТПН. Основным элементом предлагаемого устройства является активный фильтр электроэнергии (АФЭ), выполненный на IGBT-ключе, управляемых релейным регулятором тока. Произведен аналитический обзор процесса компенсации гармонических искажений тока при помощи АФЭ, рассмотрена его структура и подобраны компоненты. Работа ТПН с устройством компенсации была исследована путем математического моделирования в программной оболочке MATLAB Simulink. В статье приведена модель исследования, сравнительные энергетические характеристики и анализ гармонического состава тока для ТПН и системы «ТПН с АФЭ». Осуществлена оценка возможностей и эффективности применения предложенного устройства с УПП.

Ключевые слова: регулируемый электропривод, тиристорный преобразователь напряжения, устройство плавного пуска, экономайзер, гармонические искажения, потери электроэнергии, компенсация гармонических искажений, активный фильтр электроэнергии, релейный регулятор тока, математическая модель, MATLAB Simulink, система электроснабжения.

ВВЕДЕНИЕ

Применяемый в асинхронном электроприводе для обеспечения плавного пуска и торможения двигателя с функцией отсечки по току ТПН состоит в наиболее распространенном случае из 6 включенных встречно-параллельно в каждую фазу тиристорных [1]. Использование данной системы отличается надежностью, простотой и экономичностью. Кроме указанных «классических» применений, перспективными направлениями развития ТПН являются энергосберегающий электропривод [2, 3] и электропривод с регулированием скорости ротора [4].

Но работа данных устройств приводит к искажению форм потребляемого тока и питающего напряжения, дополнительным потерям электроэнергии, перегреву и ускоренному старению оборудования [2, 5].

В существующих по данному вопросу решениях [6, 7] предлагается статическое фильтро-компенсирующее устройство (ФКУ). Необходимо отметить, что использование ФКУ для компенсации широкого ряда гармоник приводит к усложнению их структуры, снижению надежности и увеличению токов короткого замыкания в СЭС [8]. Кроме того, ФКУ являются неэффективными для компенсации постоянного тока, протекающего через ТПН при несогласованном открытии тиристорных [5, 9] и отработки заданного уровня искажений при широком диапазоне динамически изменяющейся нагрузки.

Более результативным решением данной проблемы является использование АФЭ [8], в которых компенсация гармонических токов также осуществляется путем обмена реактивной энергией между фильтром и самой системой ТПН-АД.

Предложенные ранее АФЭ [10 – 13] рассчитаны исключительно на компенсацию искажений при работе на неуправляемый выпрямитель и не могут учитывать изменение угла проводимости ключей, а также неприменимы для компенсации постоянного тока.

Основными задачами при разработке нового технического средства являются модернизация существующего АФЭ для работы с системой «ТПН-АД» и его исследование.

МЕТОДЫ

Напряжение питающей сети $u_c(t)$ в общем случае кроме первой гармоники $u_{c(1)}(t)$ содержит высшие гармоники $u_{c(n)}(t)$. Потребляемый нагрузкой ток $i_n(t)$ также содержит базовую гармонику $i_{n(1)}(t)$ и гармоники высших порядков $i_{n(n)}(t)$. Таким образом, мгновенные ток и напряжение могут быть представлены в следующем виде:

$$u_c(t) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} U_{cm(n)} \cdot \sin(\omega_{(n)}t + \psi_{(n)}); \quad (1)$$

$$i_n(t) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} I_{nm(n)} \cdot \sin(\omega_{(n)}t + \psi_{(n)} + \varphi_{(n)}), \quad (2)$$

где n – порядок гармоники; $U_{cm(n)}$ – амплитуда напряжения сети для n -й гармоники, В; $I_{cn(n)}$ – амплитуда

тока нагрузки для n -й гармоники, А; $\omega_{(n)}$ – угловая частота для n -й гармоники, рад/с; $\psi_{(n)}$ – начальная фаза для n -й гармоники, рад; $\varphi_{(n)}$ – угол сдвига фаз для n -ной гармоники, рад; $n_{\max}$ – максимальный порядок оцениваемой высшей гармоники.

С целью компенсации искажений первой гармоники тока ТПН фильтр должен формировать мгновенный ток $i_{\phi}(t)$, определяемый как

$$\begin{aligned} i_{\Phi}(t) &= i_{\text{H}(1)}^*(t) - i_{\text{H}}(t) = i_{\text{H}(1)}^*(t) - i_{\text{H}(1)}(t) - \\ &- \sum_{n=2}^{n_{\max}} I_{\text{Hm}(n)} \cdot \sin(\omega_{(n)}t + \Psi_{(n)} + \Phi_{(n)}) = \\ &= - \sum_{n=2}^{n_{\max}} I_{\text{Hm}(n)} \cdot \sin(\omega_{(n)}t + \Psi_{(n)} + \Phi_{(n)}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $i_{н(1)}^*(t)$ – заданный мгновенный требуемый ток системы «АФЭ-ТПН-АД», который задается по формуле

$$i_{\text{H(1)}}^*(t) = i_{\text{H(1)}}(t) = I_{\text{Hm(1)}} \cdot \sin(\omega_{(1)}t + \psi_{(1)} + \phi_{(1)}). \quad (4)$$

Амплитудное значение тока первой гармоники $I_{\text{гн}(1)}$ измеряется в фазах статора, угловая частота $\omega_{(1)}$ и начальная фаза тока $\psi_{(1)}$ устанавливаются по измеряемым и формируемым далее значениям частоты и фазы первой гармоники сетевого напряжения. Угол фазового сдвига тока $\phi_{(1)}$ в предлагаемом устройстве устанавливается по измеренному на выходе ТПН углу отставания тока нагрузки ϕ .

Ввиду того, что форма напряжения кроме первой содержит и высшие гармоники, их влияние при формировании задания на мгновенный ток необходимо исключить. Данный эффект достигается посредством быстрого преобразования Фурье формы измеренного сетевого напряжения и выделения из него синусоидального напряжения первой гармоники. Следовательно, формирование мгновенных значений фазных токов нагрузки с учетом вышеописанных утверждений можно описать как

$$\left\{ \begin{aligned} i_{A\text{H}(1)}^*(t) &= I_{A\text{Hm}(1)} \frac{U_{A\text{cm}(1)} \sin(\omega_{(1)} t + 0 + \alpha)}{U_{A\text{cm}(1)}} \\ i_{B\text{H}(1)}^*(t) &= I_{B\text{Hm}(1)} \frac{U_{B\text{cm}(1)} \sin(\omega_{(1)} t + 2\pi/3 + \alpha)}{U_{B\text{cm}(1)}}, \quad (5) \\ i_{C\text{H}(1)}^*(t) &= I_{C\text{Hm}(1)} \frac{U_{C\text{cm}(1)} \sin(\omega_{(1)} t - 2\pi/3 + \alpha)}{U_{C\text{cm}(1)}} \end{aligned} \right.$$

где $i_{A-C\ n(1)}^*(t)$, $I_{A-C\ nm(1)}(t)$, $U_{A-C\ cm(1)}(t)$, – соответственно мгновенный заданный ток нагрузки, амплитудные значения тока нагрузки и сетевого напряжения для фаз А, В и С.

Структурная схема исследуемой системы АФЭ УПП-АД представлена на **рис. 1**. В качестве объекта управления здесь выступает УПП, состоящее из ТПН и его системы управления (СУ ТПН) и регулирующее напряжение на асинхронном двигателе M в соответствии с сигналом тока преобразователя I_s , получаемыми от датчиков тока ДТ₁, и скорости ротора на выходе тахогенератора ТГ. СУ ТПН формирует по принципу импульсно-фазного управления угол открытия тиристоров α . Основным элементом АФЭ является инвертор напряжения (ИН), построенный на IGBT-ключках по трехфазной мостовой двухуровневой схеме с включенными в звено постоянного тока накопительным конденсатором C_ϕ и блоком заряда емкости БЗ. На входе ИН установлены реакторы L с целью подавления пульсаций тока, привносимых коммутацией ключей. Также в звене постоянного тока АИН установлен датчик напряжения ДН, измеренный сигнал напряжения звена постоянного тока от которого через регулятор напряжения РН поступает в систему управления СУ АФЭ для формирования задания на ток АФЭ.

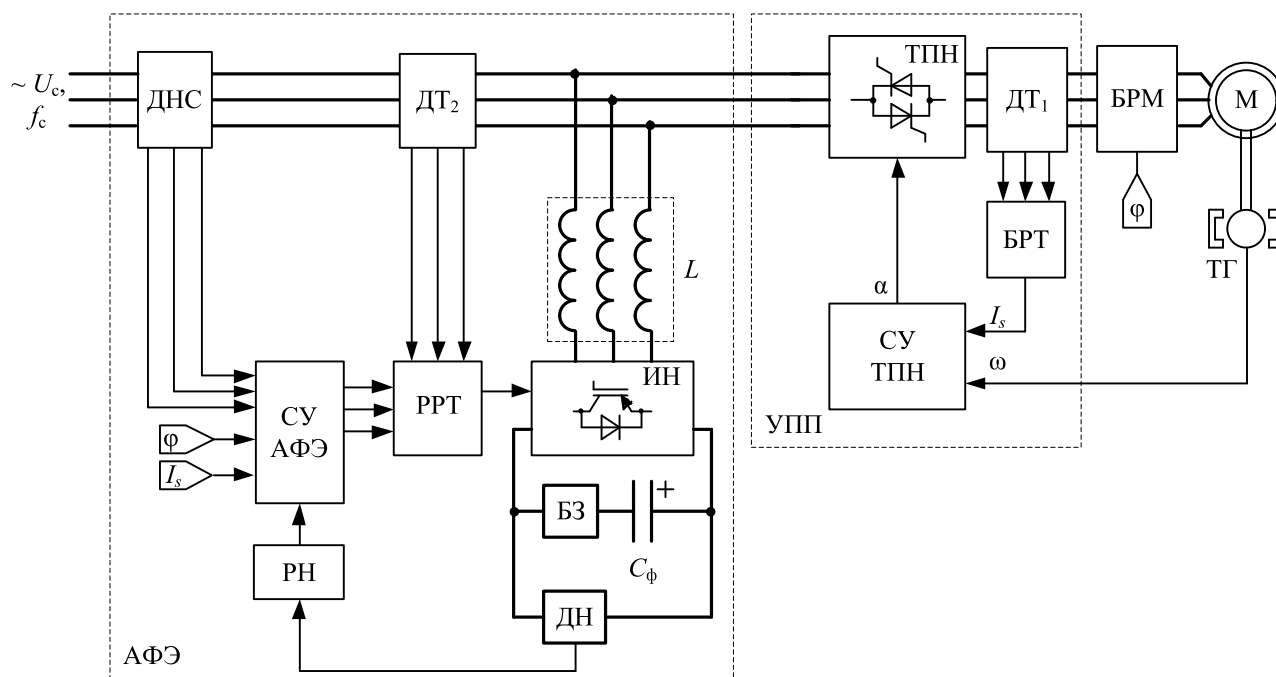


Рис. 1. Структурная схема системы «АФЭ-УПП-АД»

Корректирующее воздействие, привносимое РН, осуществляет «подзаряд» накопительной емкости фильтра, что обеспечивает запас мощности для компенсации искажений потребляемого тока в динамических процессах изменения нагрузки, а также установку величины потребляемого из сети тока, необходимого для работы УПП. Кроме того, в процессе формирования задания на потребляемый ток участвуют сигналы измеренного напряжения сети от датчиков напряжения ДНС, сигнал величины потребляемого двигателем тока и сигнал угла отставания тока нагрузки. Сформированное в СУ АФЭ задание на потребляемый ток фазы сравнивается с мгновенным значением тока фазы на входе системы «АФЭ-УПП-АД» от датчиков тока ДТ₂, и разница этих значений поступает на гистерезисный регулятор, выдающий сигнал на открытие или закрытие IGBT. Шесть гистерезисных регуляторов управляют отдельными ключами и вместе с логикой нахождения разницы между заданным и фактическим значениями потребляемого тока образуют релейный регулятор тока РРТ.

Подводя итог обзора принципа работы АФЭ, необходимо отметить, что управление АФЭ по данному принципу обеспечивает обмен реактивной энергией между нагрузкой и фильтром, а также нагрузкой и сетью и, как следствие, исключает гармонические искажения в питающей сети. Однако это не мешает потреблять двигателю для разгона по заданным характеристикам необходимую реактивную энергию из сети. Таким образом, при работе АФЭ реактивная мощность первой гармоники потребляется из сети, а мощность

высших гармоник формирует сам фильтр. Раздельное задание амплитудного значения тока, потребляемого из сети, также позволяет АФЭ решать вопрос фазной несимметрии токов нагрузки.

Подбор мощности АФЭ производится исходя из расчета мгновенной реактивной мощности, потребляемой и генерируемой АФЭ. Емкость накопительного конденсатора подбирается из условия 2%-ного максимального колебания напряжения в звене постоянного тока. Ширина гистерезиса РРТ устанавливается опытным путем, учитывая ограничение по максимальной частоте коммутации IGBT и условие наиболее предпочтительных по степени отработки заданного диапазона токовых характеристик.

По представленному математическому описанию и в соответствии с приведенной структурной схемой была составлена математическая модель данной системы в программной оболочке MATLAB Simulink (рис. 2). Питающая сеть здесь представлена трехфазным источником напряжения «Voltage Source» с параметрами: $U_c = 380$ В, $f_c = 50$ Гц. Силовая часть УПП, как было описано ранее, состоит из шести включенных встречно-параллельно в три фазы тиристоров VS1-VS6, вводного и шунтирующего УПП после разгона двигателя контакторов. Управляющие ключами сигналы VS1_1-VS1_6 поступают от блока «СУ_ТПН». Асинхронный двигатель – стандартный двигатель мощностью $P_n = 75$ кВт и напряжением статора $U_n = 380$ В из библиотеки SimPowerSystem. Параметры АФЭ: сглаживающая индуктивность на входе ИН $L = 1$ мГн, емкость накопительного конденсатора звена постоянного тока $C = 5$ мФ.

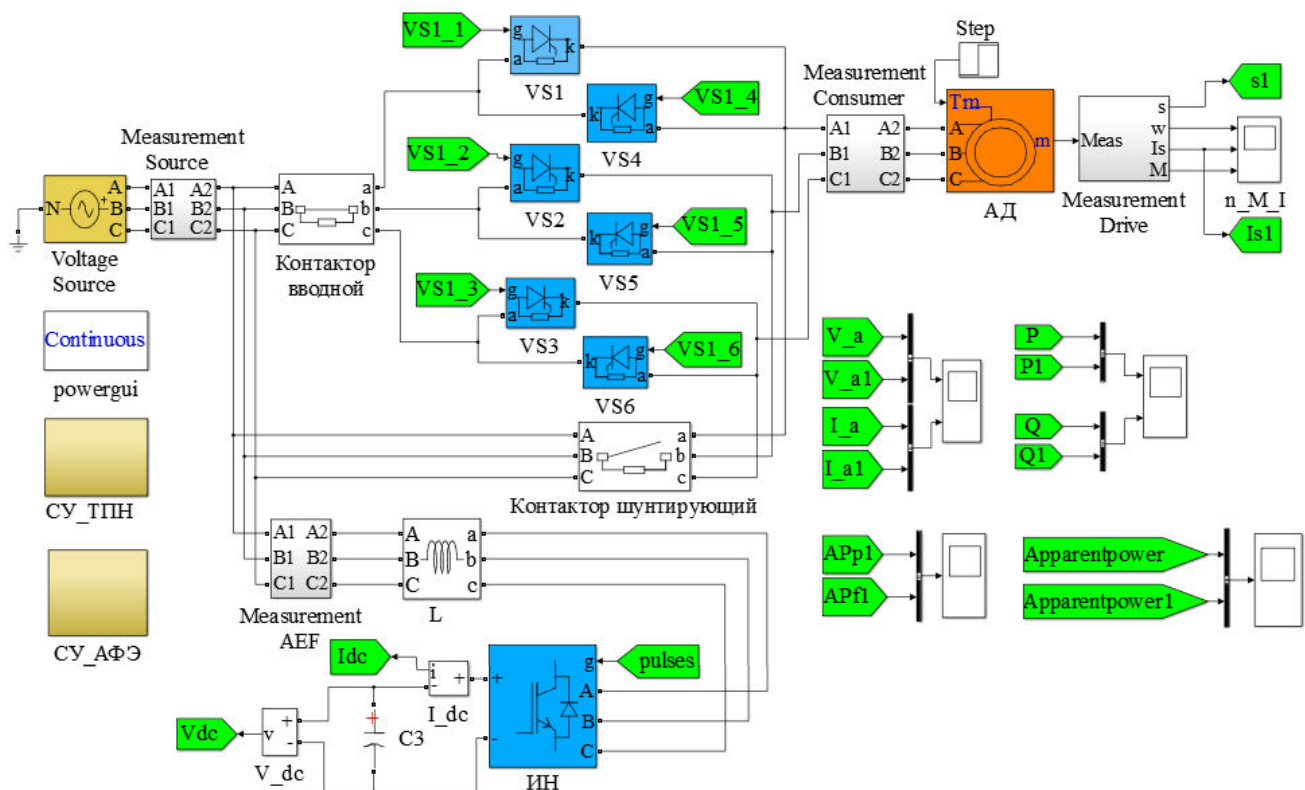


Рис. 2. Математическая модель предлагаемой системы «АФЭ-УПП-АД»

РЕЗУЛЬТАТЫ

Система управления АФЭ (рис. 3), построенная по вышеизложенному принципу, заключена в подсистему «СУ АФЭ» и получает сигналы измеренного сетевого напряжения и тока V_{abc1} и I_{abc1} , угла ϕ нагрузки ϕ_{m_t} , тока нагрузки I_{s1} , напряжения звена постоянного тока U_{dc} и управляет IGBT по сигналам «pulses».

В исследуемой модели производятся измерения и вычисления: фазных напряжений, токов фаз, активной, реактивной и полной мощностей, коэффициента мощности сети и угла φ (блок измерений «Measurement Source»), двигателя (блок «Measurement Consumer»), фильтра (блок «Measurement AEF»), напряжения и тока в звене конденсатора АФЭ (блоки «U_dc» и «I_dc»), а также скорости, скольжения, момента и тока статора АД (блок «Measurement Drive»).

Также осуществляется анализ гармонического состава тока фазы системы при помощи средств «FFT Analysis» блока «Powergui». Проводится снятие осциллограмм параметров, необходимых для оценки эффективности работы АФЭ, и их сравнение с параметрами системы «УПП-АД». Исследование работы АФЭ осуществляется в процессе разгона двигателя с УПП. Осциллограммы скорости, тока и момента двигателя при разгоне в системе «АФЭ-УПП-АД» представлены на **рис. 4**. Они полностью совпадают с характеристиками двигателя без АФЭ.

Полная мощность, потребляемая из сети, снижается по отношению к системе без АФЭ в среднем на 25%

(рис. 5, в), так как потребляемая реактивная мощность (рис. 5, б) определяется в данном случае исключительно запаздыванием первой гармоники тока, а реактивная мощность высших гармоник «завязана» на АФЭ. При этом потребляемая активная мощность остается на том же уровне (рис. 5, а). Мощность, потребляемая и генерируемая активным фильтром, составляет в среднем 30% от мощности, которую потребляет УПП-АД (рис. 5, г). Следовательно, из экономических соображений целесообразно выбирать номинальную мощность ИН в треть меньше, чем мощность самого ТПН.

Потребляемый ток повторяет форму напряжения с отставанием ф. Осциллограммы сетевого напряжения и тока для систем «УПП-АД» и «АФЭ-УПП-АД» приведены на **рис. 6**. Сравнение гармонического состава тока производится в течение одного периода посредством инструментов FFT MATLAB. Вертикальная ось на диаграммах соответствует амплитуде приведенных гармоник относительно 100% амплитуды базовой гармоники (50 Гц). На первой диаграмме (**рис. 7, а**) показан гармонический состав тока системы без АФЭ, суммарный уровень гармонических искажений тока относительно базовой гармоники для нее $THD_I = 10,45\%$. Наибольшее влияние на форму тока оказывают гармоники порядка $N = 6 \cdot n \pm 1$ ($n = 1, 2, 3 \dots$). Применение АФЭ (**рис. 7, б**) снижает THD_I до допустимого уровня 0,91%, полностью исключая влияние гармоник указанного порядка.

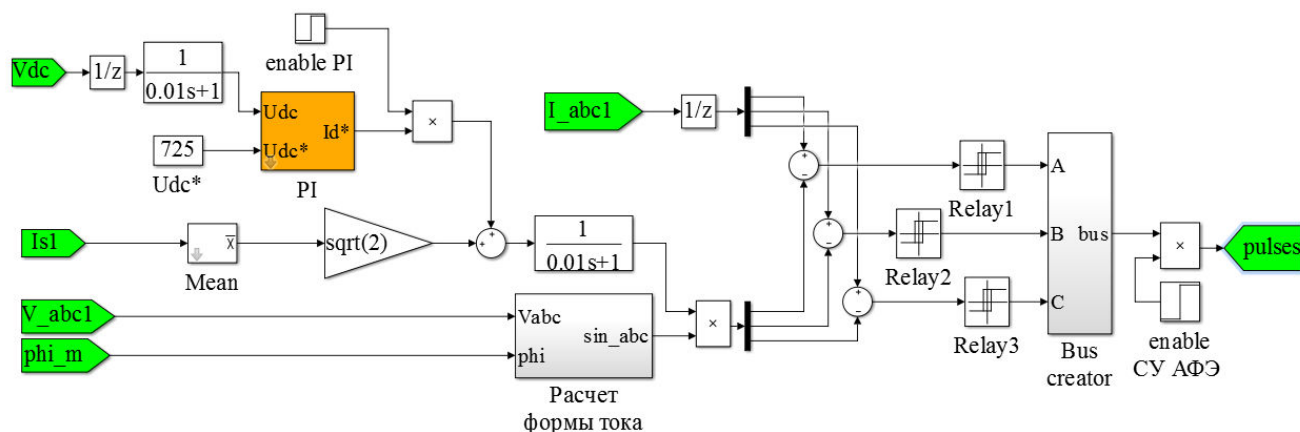


Рис. 3. Структурная схема СУ АФЭ исследуемой математической модели

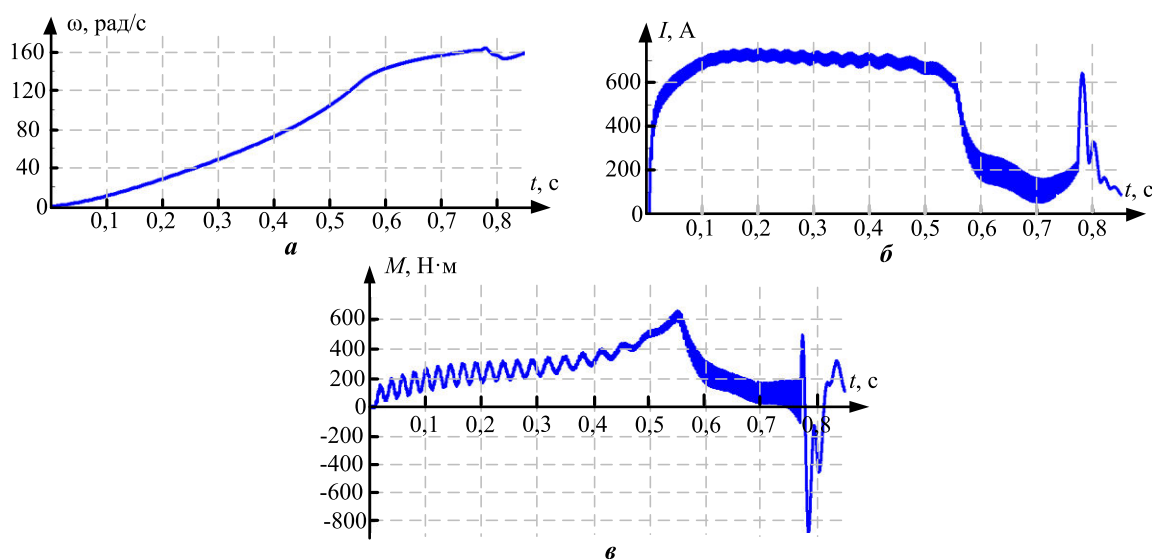


Рис. 4. Характеристики двигателя при разгоне в системе «АФЭ-УПП-АД»:
а – угловая скорость ротора; б – ток статора; в – электромагнитный момент

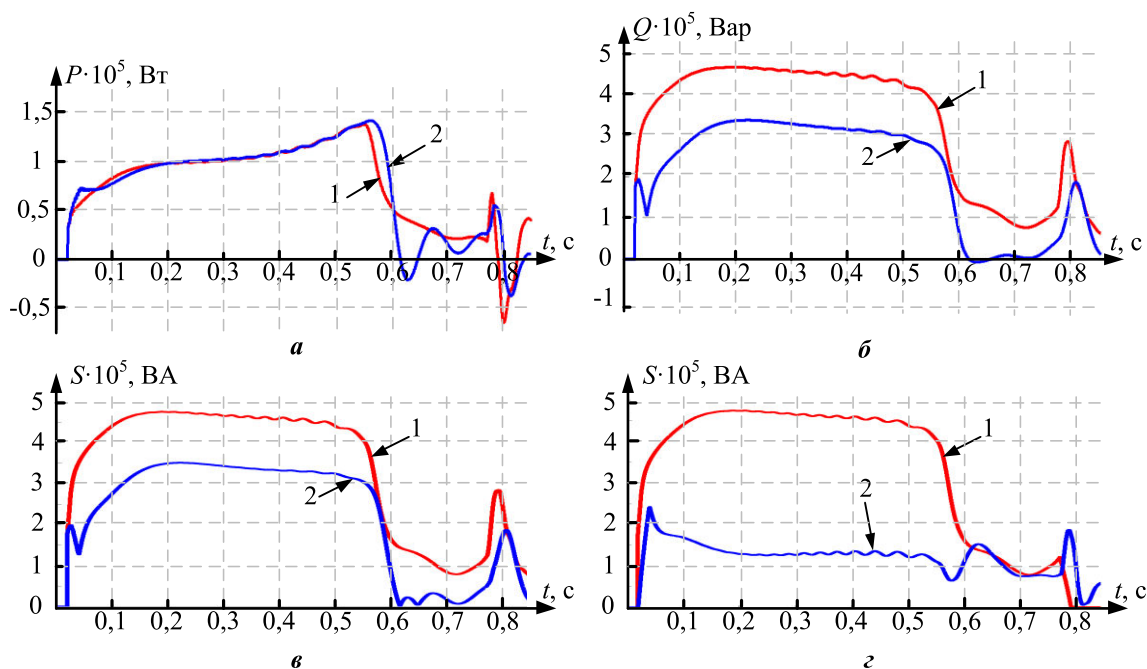


Рис. 5. Графики мощности: а – активная мощность; б – реактивная мощность; в – полная мощность (линия 1 – «УПП-АД», линия 2 – «АФЭ-УПП-АД»); г – полная мощность (линия 1 – УПП, линия 2 – АФЭ)

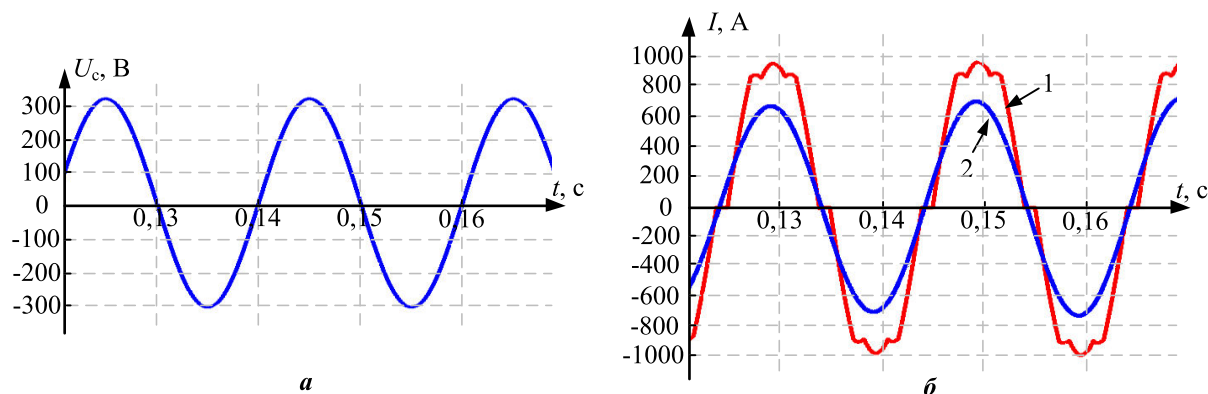


Рис. 6. Осциллограммы сетевого напряжения (а) и потребляемого тока (б): 1 – график тока системы «УПП-АД»; 2 – график тока системы «АФЭ-УПП-АД»

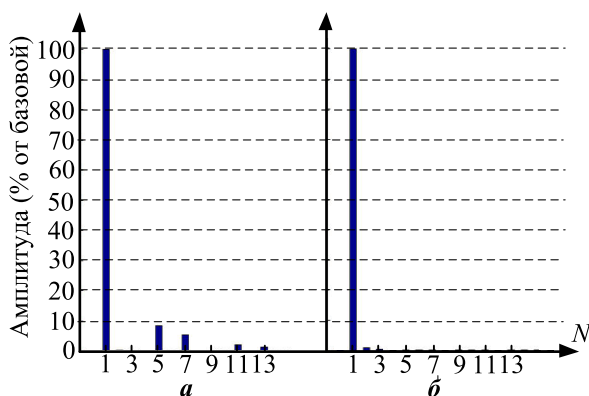


Рис. 7. Диаграммы гармонического состава потребляемого тока: а – «УПП-АД», б – «АФЭ-УПП-АД»

Также необходимо отметить, что включение в структуру АФЭ регулятора напряжения звена постоянного тока ИН позволяет исключить излишнее потребление активной мощности накопительным конденсатором, а также производить ее генерацию в сеть.

Кроме рассматриваемой архитектуры СУ АФЭ возможно ее построение без использования сигнала угла отставания φ . При этом АФЭ будет восстанавли-

вать форму тока синфазно напряжению питающей сети. Следовательно, из сети в этом случае будет потребляться исключительно активная мощность, а реактивная, потребляемая УПП-АД, генерируется АФЭ. Гармонические искажения также компенсируются на уровне, соответствующем работе системы управления с формированием угла φ .

Однако такое управление требует завышения но-

минальной мощности инвертора фильтра, что приводит к дополнительным экономическим затратам. С другой стороны, это решение позволяет при неизменной мощности системы снизить мощность сетевого оборудования и полностью устранить потери, обусловленные потреблением реактивной энергии и искажением синусоидальной формы тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена модернизированная архитектура системы управления существующего АФЭ для устройств с ТПН, а именно введена обратная связь по углу запаздывания φ , позволяющая осуществлять компенсацию исключительно реактивной мощности высших гармоник тока, установлен регулятор напряжения в звене постоянного тока, что также приводит к снижению потребляемой активной мощности.

2. Произведен аналитический обзор процесса компенсации гармонических искажений с помощью АФЭ, а также рассмотрена методика подбора компонентов предлагаемого устройства.

3. Составлены математические модели систем «УПП-АД» и «АФЭ-УПП-АД», проведены их моделирование в процессе плавного пуска АД и сравнение полученных энергетических характеристик в MATLAB.

4. Оценены возможности применения АФЭ в системах с ТПН, выявлены пути получения положительного экономического эффекта, а именно увеличение срока службы и уменьшение номинальной мощности питающего оборудования.

Основными недостатками данного решения являются: необходимость установки дорогостоящего оборудования, дополнительные потери мощности в АФЭ. В связи с этим следует более детально оценить экономический эффект, получаемый при использовании АФЭ.

В дальнейшем необходимо исследовать функционирование АФЭ с возможностью коррекции несимметрии тока, оценить влияние его работы на гармонический состав питающего напряжения при искажении первой гармоники, провести изучение эффективности АФЭ в процессе торможения АД с помощью УПП и при работе ТПН в качестве экономайзера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 304 с.
2. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энерго-

сберегающий асинхронный электропривод. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 256 с.

3. Шваяков А.В., Коваль А.С. Нечеткий регулятор тока в асинхронном электроприводе с параметрическим управлением // Студенческий вестник. Электронный научно-технический журнал. Октябрь 2005. URL: <http://e.biblio.bru.by/xmlui/bitstream/handle/1212121212/1068/99259469.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 13.04.2017).
4. Москаленко В.В. Электрический привод. М.: Мастерство: Высшая школа, 2000. 368 с.
5. Петухов В.С., Соколов В.А. Повреждения трансформаторов и электродвигателей. Причина – в системе планового пуска // Новости электротехники. 2005. №2(32).
6. Зюзев А.М., Степанюк Д.П., Бубнов М.В. Электромагнитная совместимость с сетью устройств плавного пуска асинхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 2 (544). С. 53–57.
7. Зюзев А.М., Степанюк Д.П., Бубнов М.В. Применение ФКУ для улучшения электромагнитной совместимости с сетью устройств плавного пуска асинхронных двигателей // Электроприводы переменного тока: труды шестнадцатой международной научно-технической конференции. Екатеринбург: Изд-во Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. С. 83–88.
8. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электропитания промпредприятий. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2010. 348 с.
9. Кучумов Л. А., Кузнецов А.А., Червочков Д. Устройства плавного пуска электродвигателей. Неоднозначность протекающих процессов // Новости электротехники. 2014. №2(86).
10. Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М. Компенсация гармонических искажений и реактивной мощности в однофазных электрических сетях посредством параллельного активного фильтра энергии на базе релейного регулятора тока // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. №4. С. 54–57.
11. Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М. Применение параллельного активного фильтра электроэнергии для компенсации реактивной мощности и гармонических составляющих тока в трехфазных электрических сетях // Управление большими системами: Материалы IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Липецк, 2012. С. 173–176.
12. Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М. Система управления параллельным активным фильтро-компенсирующим устройством на базе релейного регулятора тока в трехфазных электрических сетях // Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. №2. С. 49–54.
13. Мещеряков В.Н., Шеин М.А. Активная фильтрация высших гармонических составляющих тока в трехфазных электрических сетях // Вести высших учебных заведений черноморья. 2010. №1. С. 35–39.

Поступила в редакцию 18 апреля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVICE FOR COMPENSATION OF HARMONIC DISTORTION OF CURRENTS IN SYSTEMS WITH A TYRISTOR VOLTAGE CONVERTER

Victor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Engineering), Professor, Federal State-financed Educational Institution of Higher Learning «Lipetsk State Technical University», Lipetsk, Russia.

Alexei M. Evseev

Postgraduate Student, Federal State-financed Educational Institution of Higher Learning «Lipetsk State Technical University», Lipetsk, Russia.

For all time of application of controlled electric drive systems, which are based on semiconductor elements, thyristor converters proved to be the most reliable and cost-effective systems. Thyristor voltage converters (TVC) are used more often as soft starters for powerful asynchronous electric drives and are promising for use as systems with an economizer and also for the development of drive speed control devices. But unfortunately, the use of TVC leads to high harmonic distortions of the shape of the current consumed. The excessively consumed reactive power, DC consumption, current pulses lead to additional losses of electrical energy in the elements of the power-supply system, accelerate the aging of insulation of current-carrying parts of equipment and negatively affect its electromagnetic compatibility. And, if for soft starter with rare starts of the drive these effects can be neglected, then for a soft starter with frequent starts and systems where the TVC remains in the work after acceleration, they must be taken into account. This paper describes a solution aimed at compensating harmonic distortions of the consumable current in systems with a TVC. The main element of the proposed device is an active energy filter (AEF). It is based on IGBT-switches controlled by a relay current regulator (or a hysteresis regulator). The authors carried out an analytical overview of compensation process, the harmonic distortion of the current with AEF, considered its structure and selected components. The operation of a TVC with the compensation device was investigated by mathematical simulation in a MATLAB Simulink software. The paper presents the mathematical model, comparative energy characteristics and analysis of the harmonic composition of the current for TVC and TVC with AEF. The research group evaluated the possibilities and efficiency of application of the proposed device operating with the motor soft starter.

Keywords: Controlled electric drive, thyristor voltage converter, motor soft starter, economizer, harmonic distortion, losses of electric energy, compensation of harmonic distortion, active energy filter, relay current regulator, mathematical simulation, MATLAB Simulink, electrical grid.

REFERENCES

1. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnik dlia studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy* [Control systems of electric drives: textbook for students of higher educational institutions]. Moscow, Akademia Publ., 2006. 304 p. (In Russian)
2. Braslavsky I. Ya., Ishmatov Z. Sh., Polyakov V. N. *Energosberegayushiy asikhroniy elektroprivod* [Energy saving induction electric drive]. Moscow, Akademia Publ., 2004. 256 p. (In Russian)
3. Shvayakov A.V., Koval A.S. Nechetkiy regulator toka v asinhronnom elektroprivode s parametricheskim upravleniem. *Studencheskiy vestnik. Elektronnyy nauchno-tehnicheskyy zhurnal* [Students Newsletter. Electronic scientific and technical journal], Oktyabr 2005, URL: <http://e.biblio.bru.by/xmlui/bitstream/handle/12121212/1068/99259469.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Accessed 13.04.2017)
4. Moskalenko V.V. *Elektricheskiy privod* [Electric drive]. Moscow, Masterstvo: Vysshaya shkola Publ., 2000. 368 p. (In Russian)
5. Petukhov V.S., Sokolov V.A. Damage to transformers and electric motors caused by the motor soft starter. *Novosti elektrotehniki* [News of electrical engineering], 2005, no. 2(32). (In Russian)
6. Zyuzev A.M., Stepanyuk D.P., Bubnov M.V. Electromagnetic compatibility of induction motor soft starters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2016, no. 2 (544), pp. 53–57. (In Russian)
7. Zyuzev A.M., Stepanyuk D.P., Bubnov M.V. Application of passive filters for improvement of electromagnetic compatibility of network and induction motor soft starters. *Elektroprivodyi peremennogo toka: trudy shestnadtsatoy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [EPPT-2015], Ekaterinburg, 2015, pp. 83–88. (In Russian)
8. Zhezhelanko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatiy 6th edition* [The Highest Harmonics in Systems of Power Supply of Industrial Enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2010. 348 p. (In Russian)
9. Kuchumov L. A., Kuznetsov A.A., Chervochkov D. Motors soft starters. Ambiguity of proceeding processes. *Novosti elektrotehniki* [News of electrical engineering], 2014, no. 2(86). (In Russian)
10. Meshcheryakov V.N., Habibullin M.M. Compensation of harmonic distortions and reactive power in single-phase electrical networks with a parallel active electric power filter managed by a current relay controller. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2013, no. 4, pp. 54–57. (In Russian)
11. Meshcheryakov V.N., Habibullin M.M. The use of a parallel active filter of the electric power industry for compensation of reactive power and harmonic current components in three-phase electrical networks. *Upravlenie bolshimi sistemami: Materialy IX Vserossiyskoy shkolyi-konferentsii molodykh uchenykh* [UBS-2012], Lipetsk, 2012, pp. 173–176. (In Russian)
12. Meshcheryakov V.N., Habibullin M.M. The control system of the parallel active filter-compensation device based on the current relay controller in three-phase electrical networks. *Elektrotehnicheskie kompleksy i sistemy upravleniya* [Electrotechnical complexes and control systems], 2012, no. 2, pp. 49–54. (In Russian)
13. Meshcheryakov V.N., Shein M.A. Active filtration of higher harmonics components currents in three-phase electric networks. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozemnia* [News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region], 2010, no. 1, pp. 35–39. (In Russian)

Мещеряков В.Н., Евсеев А.М. Устройство компенсации гармонических искажений тока в системах с тиристорным преобразователем напряжения // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3(36). С. 4–10. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-4-10)

Meshcheryakov V.N., Evseev A.M. Device For Compensation Of Harmonic Distortion Of Currents In Systems With A Thyristor Voltage Converter. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 4–10. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-4-10)

Климаш С.В.¹, Климаш В.С.¹, Власьевский С.В.²

¹ Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

² Дальневосточный государственный университет путей сообщения

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ В СРЕДЕ MATLAB

В работе разработан и описан набор математических модулей, необходимых для оценки энергетических показателей при исследовании электротехнических систем и комплексов в среде MatLab. В электротехнической библиотеке SimPowerSystems программного средства MatLab отсутствуют измерительные модули энергетических показателей, характеризующих качество электроэнергии и энергетическую эффективность электротехнических устройств. Представленные модули предназначены для вычисления показателей качества электроэнергии (коэффициенты искажения тока и несинусоидальности напряжения) и показателей энергоэффективности (коэффициенты мощности и полезного действия). Изложены методы и принципы построения модулей. Приводятся развернутые схемы (модели) всех математических модулей. Для совместимости измерительных модулей с математическими моделями электротехнических систем и комплексов в среде MatLab их схемы построены на элементах библиотеки SimulinkLibrary. Приведены результаты опробования разработанных модулей и результаты их проверки на схемах, имеющих описание энергетических показателей аналитическими выражениями.

Ключевые слова: блочно-модульные математические модели, измерительные модули, полная мощность, активная и реактивная мощности, коэффициенты мощности и полезного действия, коэффициенты искажения тока и несинусоидальности напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества электроэнергии и энергосбережение является одним из приоритетных направлений в области электротехники, согласуется с Энергетической Стратегией России на период до 2030 года и рядом отраслевых программ.

Безусловно, в новых электротехнических проектах особое внимание уделяется актуальным результатам исследований – повышению качества тока в электрических сетях и напряжения у потребителей, изучению физических процессов энергообмена и направлению их на повышение коэффициентов мощности и полезного действия.

При исследовании и разработке электротехнических комплексов и систем, включающих электромагнитные и электромеханические устройства, компоненты силовой электроники и микроэлектроники, широкое распространение получил метод математического моделирования с применением программного средства MatLab.

В известных работах по математическому моделированию [4–6] рассмотрены блоки электротехнической библиотеки программного средства MatLab и примеры работы с этими блоками, в [3, 7] даны примеры моделирования силовых схем и систем управления устройств силовой электроники, электропривода, электроснабжения, показаны функциональные возможности отдельных блоков и модулей библиотеки Simulink в форме практикума с иллюстрациями результатов моделирования. Вместе с тем как в самом программном средстве MatLab, так и в литературе по моделированию в этой среде не только отсутствуют математические блоки вычислителей энергетических показателей электротехнических систем, но вообще нет постановки вопросов, связанных с расчетами показателей качества электроэнергии и энергоэффективности.

Выполнив обзор и анализ публикаций [7, 9, 10], в процессе проведения собственного исследования электротехнической системы [2] возникла потребность в разработке специализированных измерительных модулей на основе элементов SimulinkLibrary.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Цель работы: разработка измерительных модулей, предназначенных для исследования энергетических показателей электротехнических систем и комплексов в среде MatLab.

Для достижения поставленной цели в работе ставятся и решаются следующие задачи:

1. Разработать математические модели специализированных измерительных модулей и предложить некоторый их набор, позволяющий выполнять всесторонний анализ энергетических показателей электротехнических устройств.
2. Выполнить апробацию и проверку измерительных модулей применительно к простым, хорошо изученным электрическим схемам, имеющим аналитические выражения для энергетических показателей.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ АКТИВНОЙ, РЕАКТИВНОЙ И ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ

Имеющиеся в библиотеке MatLabSimPowerSystems/measurements модули активной и реактивной мощности [5, 6] производят вычисления только по первым гармоникам тока и напряжения и не предназначены для исследования электротехнических устройств с несинусоидальными величинами.

На **рис. 1, а** приведен специализированный измерительный модуль SPD, разработанный для определения численных значений полной S (ВА), активной P (Вт) и реактивной Q (вар) мощностей, используя для этого сигналы мгновенных значений с датчиков напряжения и тока. Схема вычислителя SPD приведена на **рис. 1, б**.

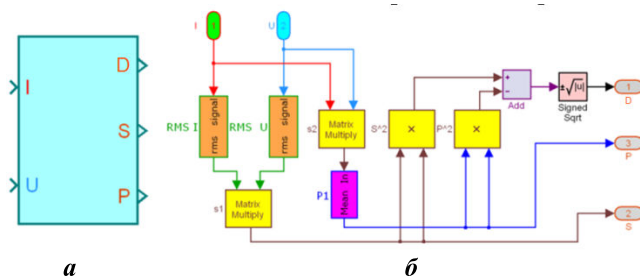


Рис. 1. Модуль активной, реактивной и полной мощности (а) и его развернутая схема (б)

В схеме (см. рис. 1, б) используются следующие блоки Simulink: RMS – блок вычисления среднеквадратичного значения, X – умножитель, ADD – вычитатель, MEAN-блок вычисления среднего значения, Matrix Multiply – блок для умножения мгновенных величин, Signed Sqrt – блок вычисления квадратного корня.

Среднеквадратичные (действующие) значения напряжения и тока, учитывающие их гармонический состав, определяются по формулам:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(\theta)^2 d\theta}; I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(\theta)^2 d\theta}, \quad (1)$$

где $u(\theta)$, $i(\theta)$ – мгновенные значения напряжения и тока, $\theta = \omega t$.

В модуле (рис. 1) численное значение полной мощности определяется через выражения (1), учитывающие искажения тока и несинусоидальность напряжения:

$$S = U \cdot I, \quad (2)$$

где U и I – действующие значения напряжения и тока.

Для определения полной мощности S был использован именно такой способ, потому что он позволяет просто и с минимальной погрешностью вычислить численное значение при любой форме тока и напряжения.

Для вычисления действующих значений тока и напряжения применен блок RMS. Этот блок вычисляет действующее значение сигнала независимо от его формы. Далее перемножение значений U и I выполняется блоком Matrix Multiply из библиотеки MatLab.

Значение активной мощности P получено вычислением средней (среднеарифметической) величины мгновенного значения полной мощности с помощью блока Mean.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T s(\theta) d\theta = \frac{1}{T} \int_0^T u(\theta) \cdot i(\theta) d\theta. \quad (3)$$

В соответствии с [1] составляющими полной мощности S являются активная P и реактивная D мощности, связанные соотношением $S^2 = P^2 + D^2$ [1].

Вычисление реактивной мощности D в измерительном модуле SPD реализовано по формуле

$$D = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (4)$$

Реактивную мощность D можно разложить в

MatLab SimPowerSystems на составляющие Q и T , которые связаны геометрической суммой $D^2 = Q^2 + T^2$. Здесь Q – составляющая реактивной мощности D , обусловленная фазой первой гармоники тока относительно первой гармоники напряжения, и T – реактивная мощность искажения.

Модель для испытания измерительного модуля SPD в среде MatLab приведена на рис. 2, а. Она состоит из источника напряжения AC Voltage Source, к которому через трансформатор Transformer подключен мостовой диодный выпрямитель Univesal Bridge с RL нагрузкой. В момент времени t , равном 0,1 с, ключ Breaker коммутирует электрическую цепь. Осциллограммы выходных сигналов модуля SPD приведены на рис. 2, б.

МОДУЛЬ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЧЕРЕЗ МОЩНОСТИ

Этот модуль приведен на рис. 3, а. Он создан для вычисления основных энергетических показателей, характеризующих эффективность потребления и использования электроэнергии. Это коэффициенты мощности K_m , полезного действия η (КПД) и их произведение, получившее название коэффициента энергоэффективности K_{Σ} системы. Коэффициент энергетической эффективности характеризует эффективность и потребления, и использования электроэнергии. Для вычисления энергетических показателей используются сигналы мгновенных значений с датчиков тока и напряжения на входе (I_1 и U_1) и на выходе (I_2 и U_2) системы (устройства). На входы модуля могут подаваться как переменные напряжение и ток, так и постоянные. Схема модуля показана на рис. 3, б.

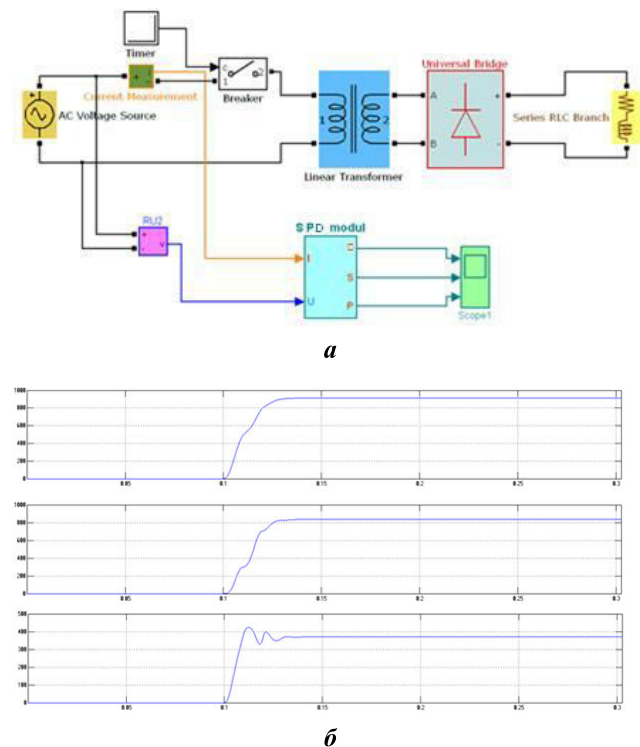


Рис. 2. Модель для испытания измерительного модуля SPD (а) и осциллограммы (б) реактивной (сверху), активной (снизу) и полной (в середине) мощностей

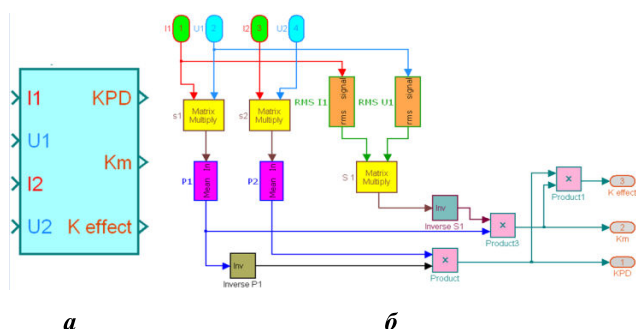


Рис. 3. Модуль для вычисления энергетических показателей через мощности (а) и его развернутая схема (б)

На рис. 3, б использованы следующие блоки Simulink: RMS – вычислитель среднеквадратичного значения, Inv x – блок вычисления обратной величины $1/x$, X – умножитель, MatrixMultiply – блок для умножения сигналов, MEAN – блок вычисления среднего значения.

Модель испытания измерительного модуля вычисления энергетических показателей приведена на рис. 4. Она состоит из однофазного источника напряжения AC Voltage Source, к которому через трансформатор подключен мостовой диодный выпрямитель с RL-нагрузкой.

Модуль (рис 3, а) хорошо подходит для вычисления энергетических показателей на отдельных участках энергосистемы. В его основу положен метод, учитывающий все параметры как входных, так и выходных токов и напряжений. К недостаткам данного модуля можно отнести наличие четырех входов, необходимых для вычисления КПД.

Вычисление КПД произведено по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (5)$$

Здесь P_1 и P_2 – значения активных мощностей на входе и выходе.

Вычисление Km выполнено по формуле

$$Km = \frac{P_1}{S_1}. \quad (6)$$

Данный метод вычисления Km учитывает несинусоидальность напряжения, фазовый сдвиг и искажения тока.

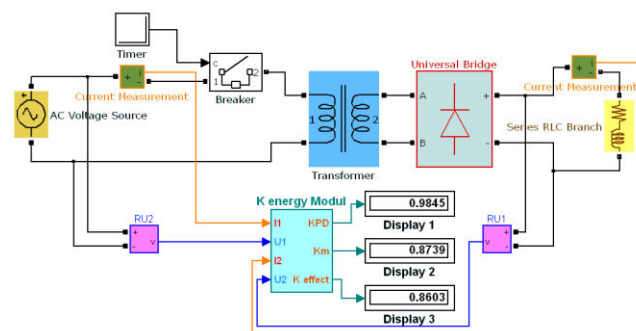


Рис. 4. Модель испытания модуля вычисления энергетических показателей

МОДУЛЬ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ЧЕРЕЗ КОЭФФИЦИЕНТЫ ИСКАЖЕНИЯ И СДВИГА ФАЗЫ МГНОВЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ ТОКА

Следует отметить, что входной коэффициент мощности системы может быть определен другим методом через форму и фазу тока сети. Данный метод реализован в модуле, приведенном на рис. 5, а. Схема измерительного модуля, составленного из элементов LibraryBrowser среды MatLab, представлена на рис. 5, б. Основным элементом здесь является блок, осуществляющий преобразование Фурье и выявляющий необходимую гармонику тока, ее амплитуду и фазу (Fourier). Данный блок в этой модели выполняет вычисление амплитуды и фазы первой гармоники тока.

На схеме (рис. 5, б) используются следующие блоки Simulink: RMS – вычислитель среднеквадратичного значения, X – умножитель, Fourier – вычислитель амплитуды и фазы первой гармоники, Inv x – блок вычисления обратной величины $1/x$, SinCos – блок вычисления синуса/косинуса.

Модуль (см. рис. 5, а) имеет всего один вход для сигнала мгновенного значения исследуемого тока. Такой принцип построения блока удобен при отсутствии несинусоидальности питающего напряжения или в пренебрежении искажениями формы напряжения ввиду их малости, что характерно для источников большой мощности.

Определение коэффициента мощности указанным методом (через сигнал мгновенного значения тока без контроля сигнала мгновенного значения напряжения) стало возможным благодаря тому, что расчет в среде MatLab начинается от нуля напряжения источника (в трехфазной схеме – от нуля напряжения фазы А). Этот метод имеет ограничения при несинусоидальной форме питающего напряжения.

Коэффициент искажения тока определяется по формуле (7) как отношение действующего значения первой гармоники тока, выявленной модулем Fourier, к действующему значению всего тока:

$$v = Ki = \frac{I_{(1)}}{I}. \quad (7)$$

Данный коэффициент характеризует процентный состав первой гармоники тока относительно всех гармоник тока и при улучшении гармонического состава стремится к единице.

Коэффициент фазы тока $\cos\phi$ вычислен с помощью блока SinCos из сигнала Angle модуля Fourier.

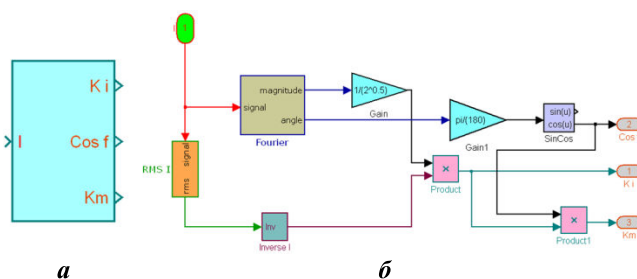


Рис. 5. Модуль для вычисления энергетических коэффициентов через ток (а) и его развернутая схема (б)

И наконец, коэффициент мощности определен по формуле

$$K_m = v \cdot \cos \varphi, \quad (8)$$

из которой можно выявить причины снижения K_m и направить мероприятия или на устранение искажений, или компенсацию реактивной составляющей тока (мощности).

Эта функциональная возможность вычислителя K_m через параметры тока (см. **рис. 5**) выгодно отличает его от вычислителя K_m через мощности (см. **рис. 3**).

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ДВУМЯ МЕТОДАМИ

В данном опыте было произведено измерение коэффициента K_m двумя модулями, которые приведены на **рис. 3, а** и **рис. 5, а**. Модель с двумя измерительными модулями и результатами эксперимента на цифровых индикаторах приведена на **рис. 6, а**, осциллограммы исследуемой модели – на **рис. 6, б**.

Сравнительный анализ численного эксперимента по определению коэффициента мощности двумя методами при помощи разработанных вычислителей выполнен в виде определения относительной погрешности, график которой представлен на **рис. 7**.

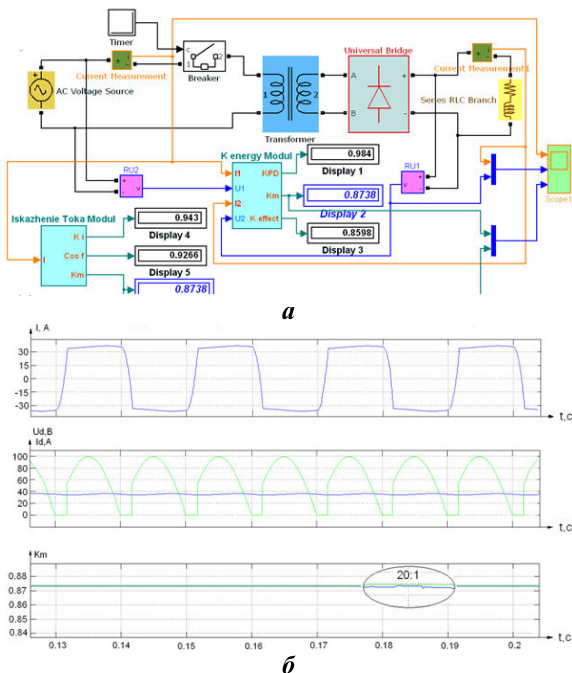


Рис. 6. Модель для сравнительного анализа измерения K_m двумя модулями (а) с осциллограммами (б) входного тока (сверху), постоянного тока и напряжения (в центре) и наложение двух осциллограмм с выходов двух вычислителей коэффициента мощности (снизу)

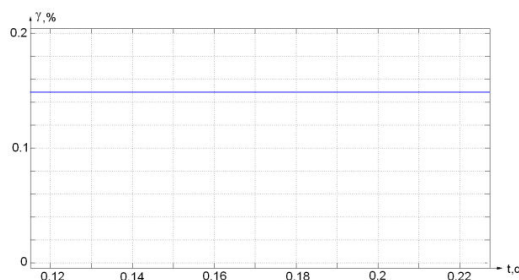


Рис. 7. Временная зависимость относительной погрешности при сравнении результатов измерений коэффициента мощности двумя модулями

Погрешность измерения (**рис. 7**) составляет всего 0,15%, что позволило убедиться в высокой точности вычисления разработанных блоков.

МОДУЛЬ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ

В основу этого вычислителя-оценщика (**рис. 8, а**) положен метод, который без спектрального анализа исследуемого напряжения позволяет определить сумму всех высших гармоник и ее процент по отношению к первой. Сумма высших гармоник в процентном отношении к первой является показателем качества напряжения, характеризующим его несинусоидальность, и нормируется российским ГОСТ 13109-97 и международным IEEE 519-1992 стандартами.

Коэффициент несинусоидальности напряжения

$$K_u = \frac{U_{\Sigma}}{U_1} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Здесь $U_{\Sigma} = \sqrt{U^2 - U_1^2}$ – действующее значение суммы всех высших гармоник напряжения, которое определяется через U и U_1 – действующие значения исследуемого напряжения и его первой гармоники.

Из выражения (9) видно, что при улучшении гармонического состава напряжения K_u стремится к нулю.

Развернутая схема блока для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения приведена на **рис. 8, б**. Проверка блока в действии выполнена в простейшей схеме, приведенной на **рис. 9, а**. В ней три источника напряжения с разными амплитудами и частотами соединены последовательно и подключены к нагрузке. Исследуемое напряжение иллюстрирует осциллограмма, приведенная на **рис. 9, б**.

На **рис. 8, б** приведены следующие блоки Simulink: X – умножитель, ADD – сумматор, Fourier – вычислитель амплитуды и фазы первой гармоники, RMS – блок вычисления среднеквадратичного значения, MEAN – блок вычисления среднего значения, Devide – блок деления, Matrix Multiply – блок для умножения сигналов, Sqrt – блок вычисления квадратного корня.

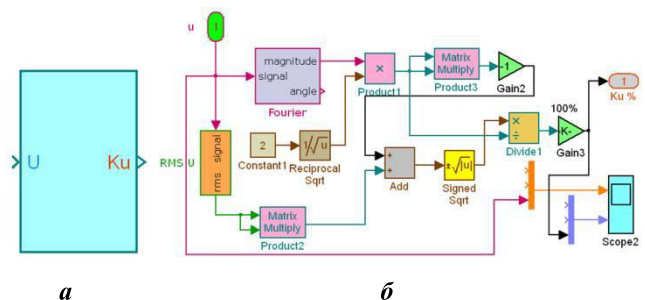


Рис. 8. Модуль для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения (а) и его развернутая схема (б)

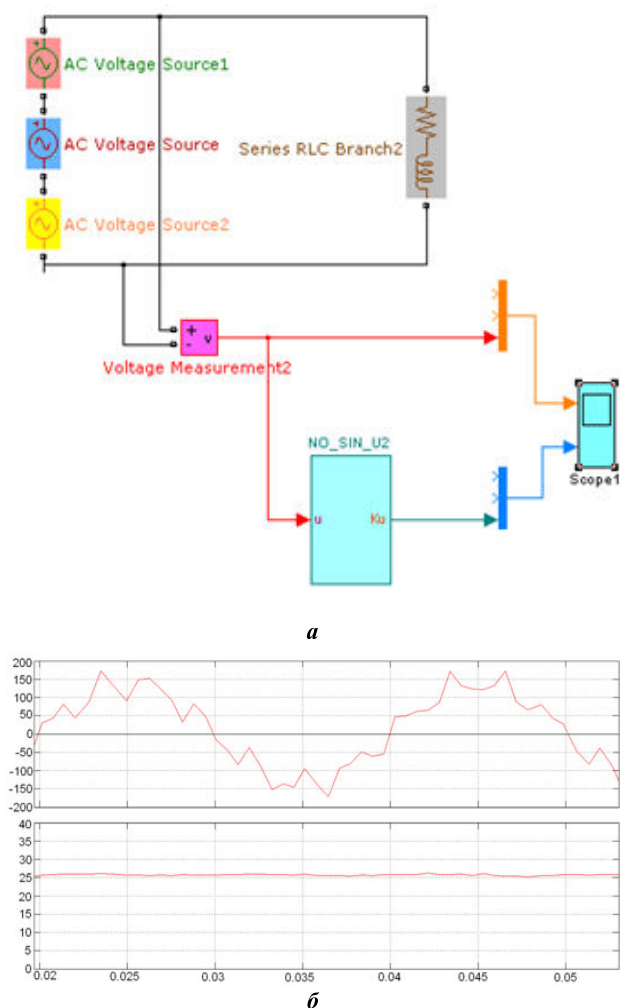


Рис. 9. Схема численного эксперимента по определению коэффициента несинусоидальности напряжения (а) и осциллограмма (б) исследуемого напряжения (сверху) и ее коэффициент несинусоидальности (снизу)

В результате численного эксперимента определено, что коэффициент несинусоидальности исследуемого напряжения со сложной несимметричной формой (процент высших гармоник в исследуемой форме напряжения по отношению к первой гармонике) равен $K_u = 25,2\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение в математических моделях электротехнических комплексов и систем в среде MatLab разработанных специализированных модулей для исследования энергетических показателей позволяет:

- 1) выявить основные причины снижения показателей качества электроэнергии, эффективности ее потребления (генерации) и использования;
- 2) создать измерительную базу с визуальным наблюдением по индикаторам и осциллографам за изменением энергетических показателей в процессе выполнения исследований и поиска новых технических решений;
- 3) разрабатывать на моделях новые способы, устройства, их модификации и осуществлять контроль эффективности их применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солодухо Я.Ю. Состояние и перспективы внедрения в электропривод статических компенсаторов реактивной мощности (обобщение отечественного и зарубежного опыта). Реактивная мощность в сетях с несинусоидальными токами и статические устройства для ее компенсации. М.: Информэлектро, 1981. 88 с.
2. Свидетельство РФ №2016616629 на программу для ЭВМ. Программный комплекс в среде MatLab для исследования систем тягового и промышленного электроснабжения с применением устройств силовой электроники на трансформаторных подстанциях / С.В. Власьевский, С.В. Климаш (Россия). Опубл. 20.07.2016. Бюл. №7.
3. Климаш В.С. Регулируемые свойства, энергетические показатели и математическое моделирование в среде MatLab выпрямителей и регуляторов переменного напряжения: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО КнАГТУ, 2015. 114 с.
4. Черных И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем. М.: Диалог МИФИ, 2003. 252с.
5. Черных И.В. SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink. Режим доступа: Matlab.exponenta.ru – интернет ресурс.
6. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008. 288 с.
7. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учебное пособие. СПб.: Корона принт, 2001. 320 с.
8. Demchenko Yu. S Investigation of the energy characteristics of high frequency power factor correctors // Электроника та зв'язок. 2014. Т. 19. № 6 (83). С. 34–37.
9. Rodriguez J., Moran L., Pontt J., Osorio R., Kouro S. Modeling and analysis of common-mode voltages generated in medium voltage. IEEE Transactions on Power Electronics. 2003. Т. 18. № 3. С. 873.
10. Rogulina L.G., Sedinin V.I., Fedosov E.V. Measurement of higher harmonics of current for rectifying devices by simulation modeling and MatLab. 2012 11th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. APEIE 2012 – Proceedings 2012. С. 106–109.

Поступила в редакцию 11 апреля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SPECIALIZED MODULES FOR CALCULATION OF ENERGY COEFFICIENTS OF ELECTRICAL ENGINEERING DEVICES IN MATLAB

Stepan V. Klimash

Postgraduate student, Far Eastern State Transport University (FESTU), Komsomolsk-on-Amur, Russia.

Vladimir S. Klimash

Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (KnASTU), Komsomolsk-on-Amur, Russia.

Stanislav V. Vlasayevsky

Professor, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia.

When designing electrical systems and systems with power electronics devices exceptionally great attention is paid to assessing the quality of electricity, the efficiency of its consumption and use. In many works in this direction of research conducted in MatLab using blocks and modules of the electrical section SimPowerSystems, which places without measuring modules of indicators characterizing the quality of current and voltage. Also there are no calculators for power factors and efficiency. To eliminate this gap, the authors developed modules for computing quality and efficiency of consumption and energy use in MatLab. There are specialized calculators of efficiency and power factor. They were developed as measuring modules for assessment of current distortion, non-sinusoidal voltage sensors and active, reactive and apparent power, deviations and voltage fluctuations. The methods of determining and principles of measurement as well as the deployed schemes of modules and the results of numerical experimentation in electrical circuits and the measuring accuracy are evaluated. All the computing modules are combined into a common information-measuring system, which controls all power indicators when performing numerical experiments in research.

Keywords: Block-modular mathematical models, measuring modules, total power and its active and reactive components, power and efficiency factors, current distortion and non-sinusoidal voltage coefficients.

REFERENCES

1. Solodukho Y.Yu. *Sostoyaniye i perspektivy vnedreniya v elektroprivod staticheskikh kompensatorov reaktivnoy moshchnosti (obobshcheniye otechestvennogo i zarubezhnogo opyta). Reaktivnaya moshchnost v setyakh s nesinusoidalnymi tokami i staticheskiye ustroystva dlya yeye kompensatsii* [Status and prospects of introducing static reactive power compensators into electric drives (generalization of domestic and foreign experience). Reactive power in networks with nonsinusoidal currents and static devices for its compensation]. Moscow: Informelektro. 1981. 88 p. (In Russian)
2. Vlasayevsky S.V., Klimash S.V. *Programmnyy kompleks v srede MatLab dlya issledovaniya sistem tyagovogo i promyshlennogo elektrosnabzheniya s primeneniym ustroystv silovoy elektroniki na transformatornykh podstantsiyakh* [The certificate of the Russian Federation №2016616629 on the complex of computer programs. The software complex in the MatLab environment for the study of traction and industrial power supply systems with the use of power electronics devices at transformer sub-stations]. Publ. July 20, 2016. Bul. no. 7. (In Russian)
3. Klimash V.S. *Regulirovochnyye svoystva, energeticheskiye pokazateli i matematicheskoye modelirovaniye v srede MatLab vypryamiteley i regulyatorov peremennogo napryazheniya* [Regulating properties, energy indicators and mathematical modeling in the MatLab environment of rectifiers and variable voltage regulators]: Komsomolsk-on-Amur, KnAGTU, 2015. 114 p. (In Russian)
4. Chernykh I.V. *Simulink: Instrument modelirovaniya dinamicheskikh sistem* [Simulink: Instrument for modeling of dynamic systems]. Moscow: Dialogue of MPEHI, 2003. 252 p. (In Russian)
5. Chernykh I.V. *SimPowerSystems: Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv i sistem v Simulink* [SimPowerSystems: Simulation of electro-technical devices and systems in Simulink]. Available at: Matlab.exponenta.ru
6. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystem i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystem and Simulink], Moscow: DMK Press, 2008. 288 p. (In Russian)
7. German-Galkin S.G. *Kompyuternoye modelirovaniye poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0* [Computer simulation of semi-conductor systems in MATLAB 6.0]. S. Petersburg: Crown print, 2001. 320 p. (In Russian)
8. Demchenko Yu.S. *Investigation of energy characteristics of high energy factor correctors. Elektronika ta zvyazok* [Electronics and connectivity], 2014, vol. 19, no. 6(83), pp. 34–37.
9. Rodriguez J., Moran L., Pontt J., Osorio R., Kouro S. Modeling and analysis of common-mode voltages generated in medium voltage. IEEE Transactions on Power Electronics. 2003, vol. 18, no. 3, p. 873.
10. Rogulina L.G., Sedinin V.I., Fedosov E.V. Measurement of higher harmonics of current for rectifying devices by simulation modeling and MatLab. 2012 11th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. APEIE 2012 – Proceedings 2012, pp. 106–109.

Климаш С.В., Климаш В.С., Власьевский С.В. Специализированные модули для исследования энергетических показателей электротехнических устройств в среде Matlab // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3(36). С. 11–16. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16)

Klimash S.V., Klimash V.S., Vlasayevsky S.V. Specialized Modules For Calculation Of Energy Coefficients Of Electrical Engineering Devices In Matlab. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 11–16. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16)

НАБЛЮДАТЕЛИ В СИСТЕМАХ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ ГЕРМЕТИЧНОГО ЭЛЕКТРОНАСОСА

Для герметичных электронасосов на основе синхронных частотно-регулируемых электроприводов, как правило, исключено использование непосредственно датчиков скорости либо положения, что предопределяет применение различных наблюдателей, позволяющих по известным управляющим воздействиям и некоторым прямо измеряемым переменным состояниям электропривода косвенно определять необходимые его координаты. Целью работы является оценка технических возможностей и показателей применяемых в общепромышленных системах векторного управления различного типа наблюдателей. Сравниваются: наблюдатель положения и скорости на основе оценки ЭДС двигателя с обычным инерционным фильтром первого порядка; наблюдатель положения и скорости на основе оценки ЭДС двигателя с применением фильтра Калмана; неустойчивый наблюдатель положения; неустойчивый наблюдатель положения с обнуляющимся интегратором и адаптивный наблюдатель. Анализ наблюдателей выполнен на примере разработанного в АО «Корпорация "ВНИЭМ"» частотно-регулируемого привода герметичного электронасоса с синхронным двигателем с постоянными магнитами. Показаны ограничения перечисленных наблюдателей и преимущество использования адаптивных наблюдателей.

Ключевые слова: герметичный электронасос, синхронный двигатель, преобразователь частоты, наблюдатель, математическая модель, векторное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из вариантов обеспечения полной герметичности электронасосов с отсутствием уплотнения вала и возможностью утечки перекачиваемой среды является исполнение насоса и двигателя в едином конструктивном блоке. Как правило, электропривод подобных насосов синхронный частотно-регулируемый. При этом конструкция синхронного двигателя предполагает наличие между его статором и ротором двух (керамической или металлической) гильз, одна из которых жестко соединена с ротором, а вторая со статором. Металлическая гильза, подвижная относительно поля ротора, приводит к возникновению в ней вихревых токов и увеличению тепловых потерь в двигателе, которые необходимо учитывать. Герметичность же насоса не позволяет использовать датчики скорости либо положения и предопределяет применение бездатчиковой системы управления регулируемым приводом, где важнейшим элементом является наблюдатель [1]. Понятно, что для подобных конструкций синхронных машин необходимо оценить возможности наблюдателей, применяемых в общепромышленных системах векторного управления. Из множества видов наблюдателей, заметно различающихся по принципу своего построения, работы, методу наблюдения за не измеряемыми параметрами и их оценки, полезно выявить наиболее целесообразные с определением качества их работы.

ПРИКЛАДНОЙ ОБЪЕКТ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ

Анализ наблюдателей выполнен на примере разработанного в АО «Корпорация "ВНИЭМ"» частотно-регулируемого привода герметичного электронасоса с синхронным двигателем с постоянными магнитами. Технические характеристики двигателя и преобразователя частоты для его питания приведены в табл. 1 и 2.

Как видно из табл. 1 наибольшая мощность потерь в двигателе приходится на гильзу статора из-за её достаточного низкого сопротивления и протекания больших токов. Возможным способом уменьшения потерь в гильзе в векторной системе управления приводом могло быть введение задания на не нулевой ток по оси d . Но это повлечет за собой размагничивание машины и соответственно увеличение потребляемого из сети тока. Поэтому такой способ нецелесообразен и ограничен длительно допустимым током двигателя [3].

Таблица 1

Технические данные синхронного электродвигателя

Мощность, кВт	150
Частота вращения, об/мин	4100
Напряжение фазное/линейное, В	202/350
Номинальный ток, А	386
КПД, %	71,4
Коэффициент мощности	0,9
Продольное индуктивное сопротивление X_d , Ом	0,36
Поперечное индуктивное сопротивление X_q , Ом	0,36
Активное сопротивление фазы (при 20°C), Ом	0,0044
Мощность потерь в обмотке, Вт	3800
Мощность потерь в стали, Вт	4400
Мощность потерь в гильзе статора, Вт	39000
Мощность потерь на трение ротора, Вт	13000

Таблица 2

Технические характеристики ПЧ

Наименование параметра	Значение
Номинальный выходной ток, А	386
Номинальное линейное напряжение на выходе, В	350
Номинальная частота выходного напряжения, Гц	342
Номинальная активная мощность на выходе, кВт	210
Рабочий диапазон частоты выходного напряжения, Гц	40...342
Максимальная полная мощность на выходе, кВА	247

Учитывая сказанное, на **рис. 1** представлен функциональный состав модели электропривода герметичного электронасоса, содержащий блоки синхронного двигателя с постоянными магнитами СДПМ, формирования ШИМ-блок, в котором происходит перерасчет из относительных единиц в абсолютные и формируется выходное напряжение, пропорционально-интегральных регуляторов скорости, токов по осям q,d, а также блок наблюдателя положения ротора и оценки скорости привода, в котором реализована адаптивная система управления. При разработке модели все переменные и параметры электропривода представлены в относительных единицах, что при реализации в микропроцессорных системах является удобным при использовании расчетов с фиксированной точкой. Модель реализована для частоты расчета 10 кГц. В качестве базовых величин переменных были выбраны: для напряжения $U_6 = \sqrt{2}U_{\phi,ном}$, где $U_{\phi,ном}$ – номинальное фазное напряжение двигателя; для тока $I_6 = \sqrt{2}I_{\phi,ном}$, где $I_{\phi,ном}$ – номинальный фазный ток; для угловых скоростей и частот $\Omega_6 = 2\pi f_{ном}$, где $f_{ном}$ – номинальная частота питания машины; для угла поворота $\theta_6 = 2\pi$; для сопротивления $Z_6 = U_6/I_6$; для потокоцепления $\Psi_6 = U_6/\Omega_6$; для индуктивности $L_6 = \Psi_6/I_6$; для времени $T_6 = 1/\Omega_6$; для индуктивного сопротивления в относительных единицах $X_{o.e.} = X_{abs}/X_6$, где X_{abs} – значение индуктивного сопротивления в абсолютных единицах, X_6 – базовое значение индуктивного сопротивления.

Электромагнитные процессы в двигателях описываются следующей системой уравнений. Данные уравнения построены на основе описания работы асинхронной и синхронной машин, так как взаимодействие статора и гильзы можно представить как асинхронную машину с короткозамкнутым заторможенным ротором.

$$\begin{aligned} U_{Sd} &= R_S I_{Sd} - \omega_{eR} L_{Sq} I_{Sq} + \\ &+ L_{Sd} \frac{dI_{Sd}}{dt} + L_m \frac{dI_{\Gamma d}}{dt} - \\ &- \omega_{eR} L_m I_{\Gamma q}; \\ U_{Sq} &= R_S I_{Sq} + \omega_{eR} L_{Sd} I_{Sd} + \\ &+ \omega_{eR} \Psi_{n.m.} + L_{Sq} \frac{dI_{Sq}}{dt} + \\ &+ L_m \frac{dI_{\Gamma q}}{dt} - \omega_{eR} L_m I_{\Gamma d}, \end{aligned}$$

где U_{Sd}, U_{Sq} – напряжение по осям d, q; I_{Sd}, I_{Sq} – токи статора по осям d, q; $I_{\Gamma d}, I_{\Gamma q}$ – токи гильзы по осям d, q; ω_{eR} – электрическая скорость вращения поля; L_{Sq}, L_{Sd} – индуктивности статора по осям d, q; L_m – взаимная индуктивность между статором и гильзой.

Модель статора двигателя по осям q, d, построенная на основе этих соотношений, представлена на **рис. 2, а, б**. Для гильзы модель имеет такую же структуру как и для статора, только значение входных напряжений u_q, u_d равны нулю. В модели двигателя на **рис. 3** объединены модели статора и модели гильзы по осям q, d, на основе которых рассчитываются момент развиваемый двигателем, момент от гильзы, скорость и угол положения ротора.

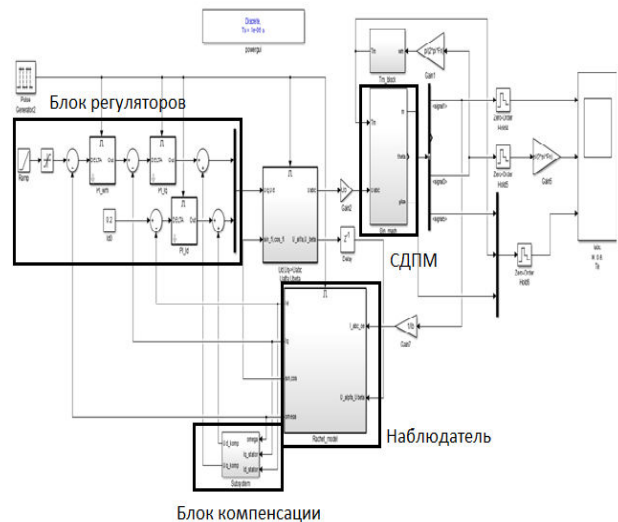


Рис. 1. Состав модели электропривода

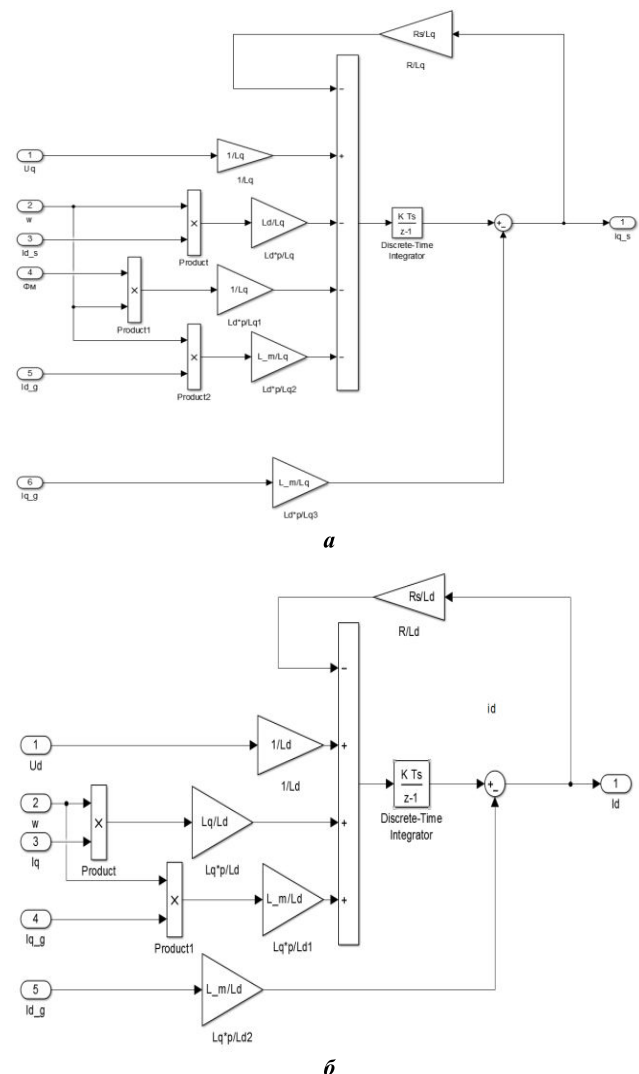


Рис. 2. Модель статора двигателя:
а – по оси q; б – по оси d

На **рис. 4** представлен блок компенсации взаимодействия каналов управления по осям d, q

В качестве регуляторов скорости и токов по осям q, d применяется ПИ-регулятор, представленный на **рис. 5**.

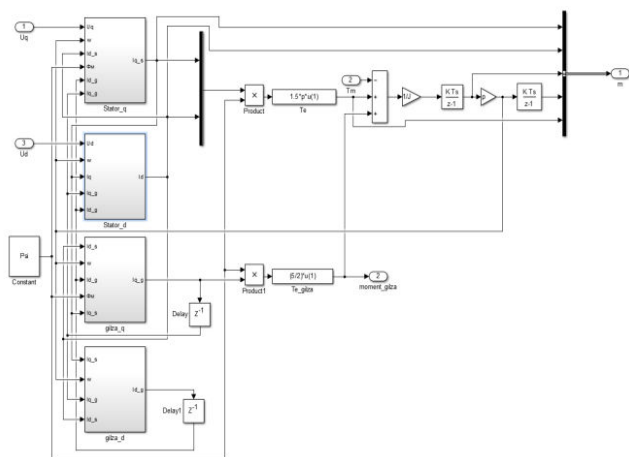


Рис. 3. Модель двигателя

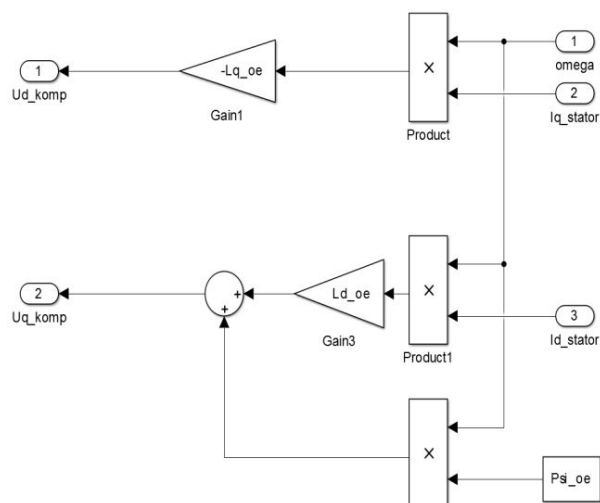


Рис. 4. Блок компенсации

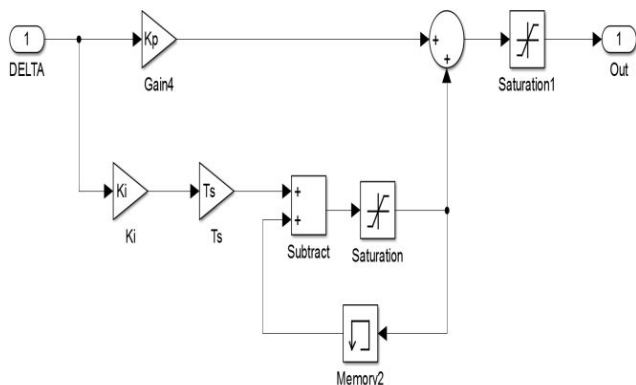


Рис. 5. ПИ-регулятор

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ

Для оценки показателей различных вариантов наблюдателей сравниваются: наблюдатель положения и скорости на основе оценки ЭДС двигателя с обычным инерционным фильтром первого порядка, наблюдатель положения и скорости на основе оценки ЭДС двигателя с применением фильтра Калмана, неустойчивый наблюдатель положения, неустойчивый наблюдатель положения с обнуляющимся интегратором и адаптивный наблюдатель.

Наблюдатель положения и скорости на основе оценки ЭДС двигателя с обычным инерционным фильтром первого порядка (рис. 6) включает в себя два

наблюдателя ЭДС двигателя по осям α и β и функцию арктангенса двух переменных для вычисления угла положения ротора [1].

Недостатком наблюдателя является невозможность его применения на низких скоростях, так как значение ЭДС двигателя при этом слишком мало. При фильтрации урезается и амплитуда ЭДС двигателя, происходит ее запаздывание (рис. 7), приводящее к ошибке в определении положения ротора машины (рис. 8). Уменьшение влияния фильтра возможно компенсацией постоянной времени T_ϕ фильтра по соотношениям [1]:

$$\Delta\theta = a \tan(\omega T_\phi);$$

$$E = \sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \cdot \sqrt{1 + (\omega T_\phi)^2},$$

где $\Delta\theta$ – компенсация угла положения; ω – скорость рассчитанная наблюдателем; T_ϕ – постоянная времени фильтра; E – вектор ЭДС; e_α, e_β – ЭДС по осям α, β .

Определение положения с учетом компенсации T_ϕ представлено на рис. 9.

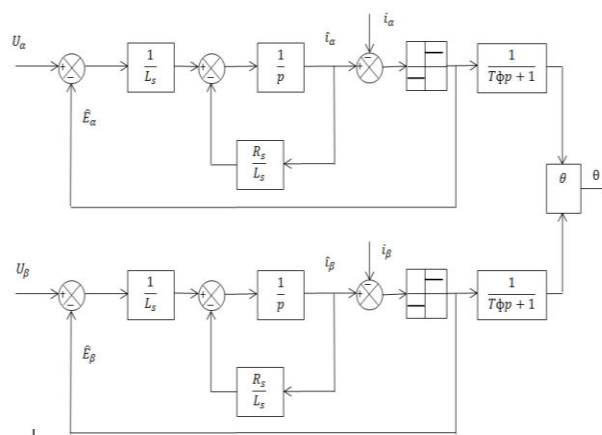
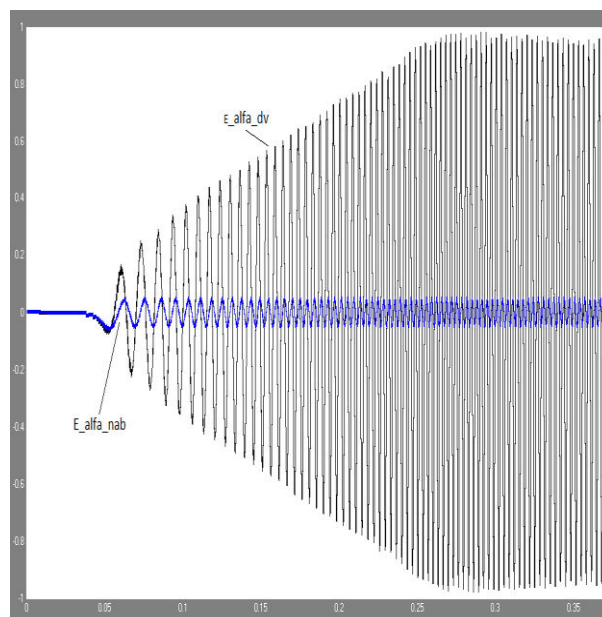


Рис. 6. Наблюдатель положения на основе оценки ЭДС двигателя с инерционным фильтром первого порядка


 Рис. 7. ЭДС двигателя (e_{α_dv}) и ЭДС, рассчитанное наблюдателем (e_{α_nab})

Более сложным вариантом наблюдателя является структура, в которой вместо инерционных фильтров применяется фильтр Калмана [4]. Отличительной особенностью подобного наблюдателя является более точный расчет скорости самим фильтром, что позволяет применять этот наблюдатель при неизвестных параметрах магнитов двигателя. Наблюдатель не требует компенсации времени фильтра и каких-либо других дополнительных вычислений. Недостаток фильтра Калмана – в сложности его настройки и большем времени вычисления процессором, чем для обычного инерционного фильтра. Данный наблюдатель не может стабильно работать и на низких скоростях (начальный участок **рис. 10**). К тому же при фильтрации релейных сигналов ЭДС возникают большие значения в ковариационной матрице случайных воздействий на объект, что может вызвать большие затруднения при программной реализации данного наблюдателя.

Рассматриваемые наблюдатели не решают проблему пуска привода в замкнутой бездатчиковой векторной системе управления. Одним из вариантов решения данной проблемы является неустойчивый наблюдатель (**рис. 11**), использующий следующие соотношения [1]:

$$\begin{aligned}\frac{d\Phi_\alpha}{dt} &= u_\alpha - i_\alpha R_s; \\ \frac{d\Phi_\beta}{dt} &= u_\beta - i_\beta R_s; \\ \cos\theta &= \frac{\Phi_\alpha - i_\alpha L_s}{\Phi_{\text{пм}}}; \\ \sin\theta &= \frac{\Phi_\beta - i_\beta L_s}{\Phi_{\text{пм}}},\end{aligned}$$

где $\Phi_{\text{пм}}$ – потокосцепление постоянных магнитов; Φ_α , Φ_β – потокосцепления по осям α, β ; u_α, u_β – напряжения, формируемые регуляторами по осям α, β ; i_α, i_β – токи, полученные с датчиков тока; R_s, L_s – параметры обмоток статора.

При математическом моделировании данный наблюдатель дает наилучшие результаты из рассмотренных ранее и имеет возможность работы на низких частотах и при пуске. Его минус – в наличии прямого интегрирования, поскольку на выходе датчиков тока и напряжения в реальности возможно присутствие постоянной составляющей, интегрирование которой приведет к смещению нуля и ошибке в расчетных $\cos\theta$ и $\sin\theta$. При математическом моделировании данная ситуация может быть учтена введением в входные сигналы датчиков постоянной составляющей (**рис. 11**).

На **рис. 12** представлен результат расчета $\cos\theta$ и $\sin\theta$. При этом в i_α, i_β была введена постоянная составляющая напряжения, равная 0,5% от номинального значения. Параметры двигателя R_s, L_s были приняты равными 80% от номинальных значений.

Использованием более точных датчиков можно добиться неплохих результатов в начале пуска, но это не снимает вопроса применения данного наблюдателя на всем диапазоне работы двигателя. Одним из вариантов улучшения работоспособности наблюдателя по **рис. 11** является закорачивание выхода интегратора на себя. Это позволяет снять влияние постоянной составляющей и обеспечить определение положения ротора двигателя фактически совпадающее с реальным положением двигателя. Расчет положения таким наблюдателем представлен на **рис. 13**.

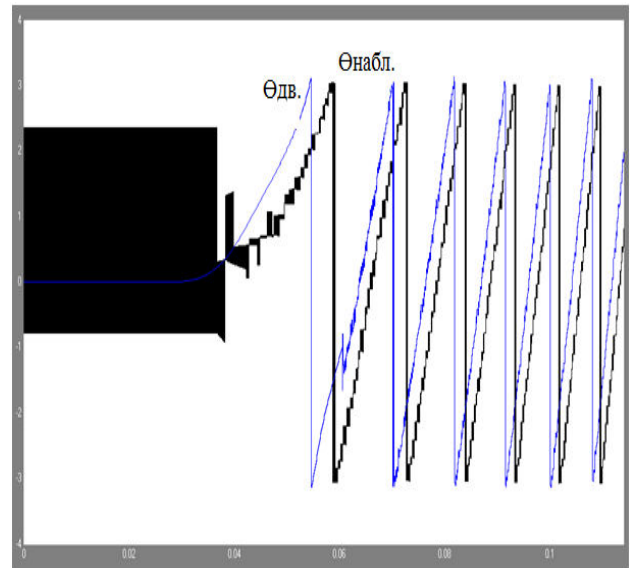


Рис. 8. Действительное ($\theta_{\text{дв}}$) и наблюдаемое ($\theta_{\text{набл.}}$) положение ротора двигателя

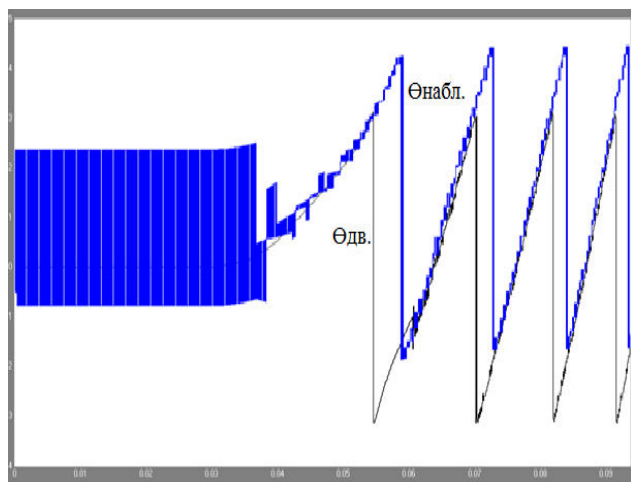


Рис. 9. Определение положения с учетом компенсации Тф

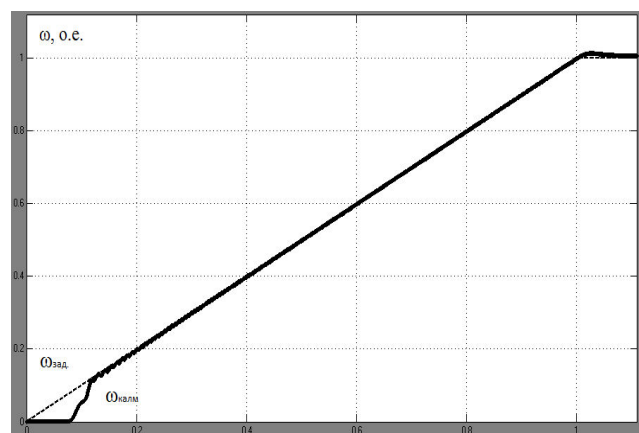


Рис. 10. Сравнение скорости двигателя и скорости, рассчитанной наблюдателем на выходе фильтра Калмана

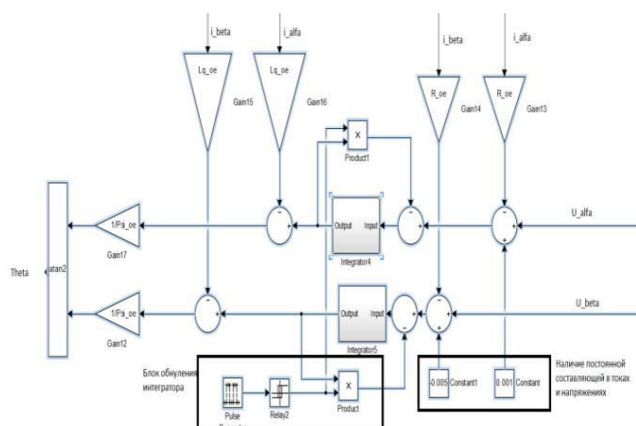


Рис. 11. Модель неустойчивого наблюдателя при наличии в входных сигналах постоянной составляющей

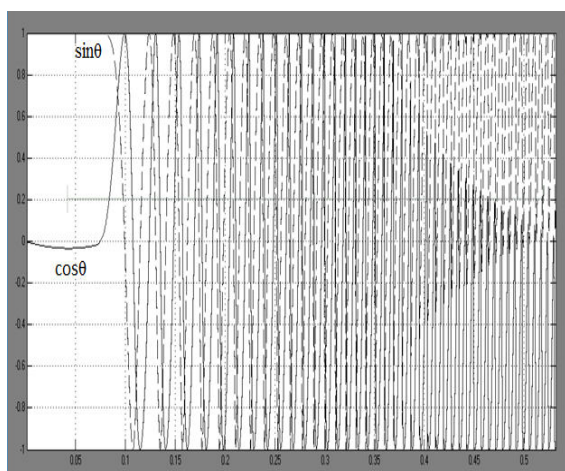


Рис. 12. $\cos\theta$ и $\sin\theta$ неустойчивого θ наблюдателя для модели по рис. 11

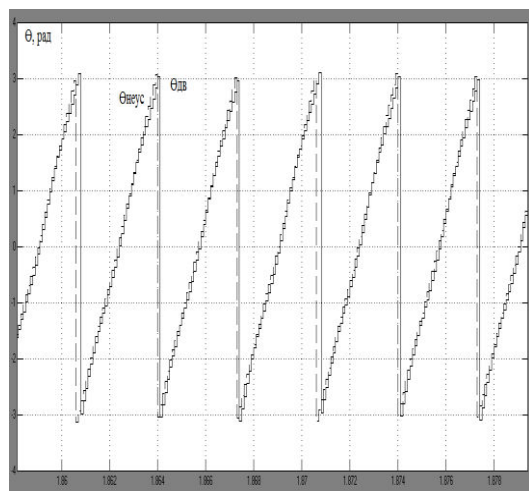


Рис. 13. Положение рассчитанное неустойчивым наблюдателем с закорачивающимся интегратором

Наилучшие результаты работы имеет адаптивный наблюдатель [2], для которого неточность при определении активного сопротивления статорной обмотки не имеет существенного влияния на работу структуры. На рис. 14 для данного наблюдателя показаны токи по фазам, переходной процесс скорости и момента.

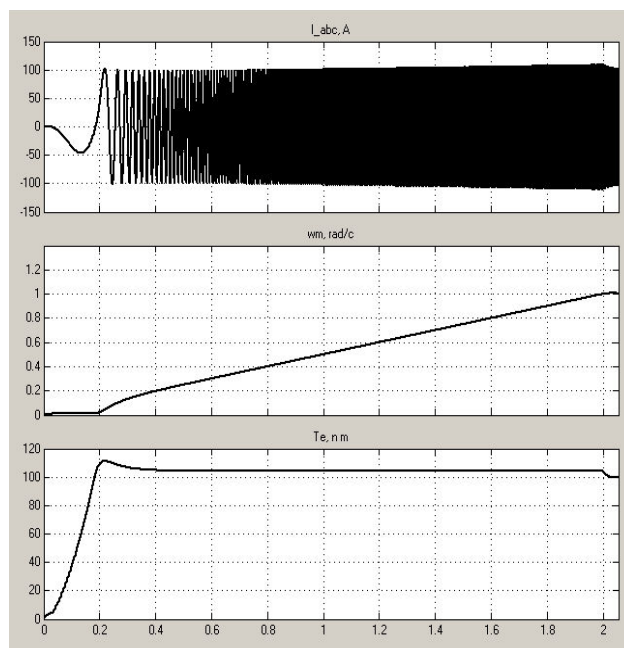


Рис. 14. Осциллограммы тока в фазе, скорости и момента при работе адаптивной модели

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из рассматриваемых наблюдателей технически наиболее прост наблюдатель положения и скорости на основе оценки ЭДС двигателя с обычным инерционным фильтром первого порядка. Он целесообразен для систем управления приводом, где не требуется большой диапазон регулирования и высокая точность поддержания скорости.

Лучшими характеристиками обладает наблюдатель с фильтром Калмана, но он более сложен в настройке и реализации.

Неустойчивый наблюдатель подходит для режима начального пуска привода, но для его работоспособности необходимо иметь достаточно хорошую аппаратную часть и точные параметры двигателя. Его вариант с закорачивающимся интегратором показал при моделировании, что он работоспособен, но требует более тщательной проверки на реальном объекте.

Адаптивный наблюдатель для рассматриваемого электропривода отличается более высокими показателями и может быть рекомендован для его технической реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
2. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. М., 2015. 60 с.
3. Токарев Б.В. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1990. 624 с.
4. Балакришнан А.В. Теория фильтрации Калмана. М.: Мир, 1988. 168 с.

Поступила в редакцию 18 июля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

OBSERVERS IN SYSTEMS OF VECTOR CONTROL OF A SYNCHRONOUS VARIABLE FREQUENCY DRIVE SEALED PUMP

Evgeny V. Volodin

Engineer, «VNIIEM Corporation», Moscow, Russia.

Oleg I. Osipov

D.Sc. (Engineering), Professor, the department of automatic electric drive, Scientific research university "MEI", Moscow, Russia.

Sealed pumps based on synchronous variable frequency drives, as a rule, do not use speed sensors, or position, that determines the use of different observers, allowing for known control inputs and some directly measurable state variables of the actuator to indirectly determine the necessary coordinates. The aim of this work is to assess the technical possibilities and the indicators used in General systems of vector control of different types of observers. The authors compared the observer position and velocity based on the assessment of EMF motor with a conventional inertial filter of the first order; the observer position and velocity based on the evaluation of the EMF of the motor using a Kalman filter; an intermittent observer status; observer unstable situation zeroed integrator and an adaptive observer. The analysis of observers is made using the example developed in JSC "Corporation "VENIAM" variable frequency drives sealed pump with synchronous motor with permanent magnets. The research shows the limitations of the listed observers and the ad-

vantages of using adaptive observers.

Keywords: Leak-proof motor, synchronous motor, frequency Converter, observer, mathematical model, vector control.

REFERENCES

1. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control System of electric drives]: the textbook for high schools. Moscow: MPEI Publishing house, 2015. 373 p. (In Russian)
2. Kalachev Y.N. *Nablyudateli sostoyaniya v vektornom elektroprivode* [State observers in vector actuator]. Moscow, 2015. 60 p. (In Russian)
3. Tokarev B.V. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 624 p. (In Russian)
4. Balakrishnan A.V. *Teoriya filtratsii Kalmana* [Theory of Kalman filtering]. Moscow: Mir, 1988. 168 p. (In Russian)

Володин Е.В., Осипов О.И. Наблюдатели в системах векторного управления синхронным частотно-регулируемым приводом герметичного электронасоса // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3(36). С. 17–22. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-17-22](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-17-22)

Volodin E.V., Osipov O.I. Observers In Systems Of Vector Control Of A Synchronous Variable Frequency Drive Sealed Pump. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electro-technical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 17–22 (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-17-22](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-17-22)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПЛОТНОСТЕЙ ТОКА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО РЫНКА НА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В работе рассмотрен вопрос определения величин экономической плотности тока для проводников марки АС напряжением 35 и 110 кВ и самонесущих изолированных проводников 6–10 кВ. Проанализировано влияние цен на данную продукцию в зависимости от территориальной принадлежности завода-изготовителя и от сечения проводников с использованием известных законов математической статистики. Приведена методика расчета величин экономической плотности тока по значению приведенных затрат на сооружение и обслуживание электрических сетей с учетом фактора надежности электроснабжения. Полученные величины экономической плотности тока предназначены для выбора целесообразных сечений проводников при проектировании новых и реконструкции существующих электрических сетей.

Ключевые слова: экономическая плотность тока, электрическая сеть, сечение проводника, самонесущий изолированный проводник, ущерб от перерыва электроснабжения, приведенные затраты, издержки.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно [1] экономической плотностью тока называется такая плотность, при которой суммарные годовые расходы для данного участка электрической сети будут минимальными. Она прямо пропорциональна капитальным затратам на сооружение и обслуживание и обратно пропорциональна стоимости потерь электрической энергии на данном участке сети.

Экономически обоснованный выбор сечения проводов и кабелей в основном производится по экономической плотности тока. Нормированные значения экономической плотности тока $J_{\text{эк}}$ приводятся в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ) [2]. Данные значения получены в середине прошлого столетия и не учитывают изменение стоимости оборудования в условиях рыночной экономики. Также в ПУЭ не приводятся значения экономической плотности тока для самонесущих изолированных проводов (СИП).

Проверке по экономической плотности тока не подлежат: сети промышленных предприятий до 1 кВ при числе часов использования максимума нагрузки предприятий до 4000–5000, ответвления к электроприемникам напряжением до 1 кВ, осветительные сети промышленных предприятий, жилых и общественных зданий, сборные шины электроустановок и ошиновка в пределах открытых и закрытых распределительных устройств всех напряжений, проводники, идущие к резисторам, пусковым реостатам, сети временных сооружений, а также устройства со сроком службы 3–5 лет [2].

Методы расчета экономической плотности тока приводятся в работах Идельчика В.И. [3], Веникова В.А. [4], Герасименко А.А. [5], Блока В.М. [6]. В данных источниках величина экономической плотности тока рассчитывается по величине приведенных затрат, однако в [7] предлагается подход по расчету затрат в течение всего «срока жизни» объекта.

Степень влияния динамики изменения электрической нагрузки и стоимости электрической энергии на величину экономической плотности тока рассмотрена в работах Суворовой И.А. [8, 9].

Новые значения экономической плотности тока для воздушных линий электропередачи (ВЛ) 110 кВ, сооружаемой в III районе по гололеду на стальных одноцепных опорах, были отражены в работе Зуева Э.Н. [10].

В своих трудах Фрайштетер В.П. и Мартянов А.С. указывали на устаревшие значения экономической плотности тока и приводили современные значения для проводов и кабелей нефтепромысловых линий электропередачи (ЛЭП) [11].

Волотковская Н.С. [12] в своей работе отмечает, что расчеты сечения проводов или кабеля по нормированной ПУЭ экономической плотности тока в наше время не дают желаемого минимума суммарных затрат.

В период электрификации СССР вопросами применимости метода экономической плотности тока и методов выбора сечений жил кабелей занимались А.А. Глазунова [13], С.А. Кукель-Краевского [14] и другие.

Универсальные номограммы для выбора сечений проводов по методу экономических токовых интервалов приводятся в статье Ефентьева С.Н. и Зуева Э.Н. [15].

В статье Калимуллиной Р.М. рассматривается существующий метод экономической плотности тока и его недостатки, а именно отсутствие учета максимальной прибыли, срока окупаемости, нормы рентабельности при нынешних экономических условиях [16].

Как известно из [2], значение экономической плотности тока необходимо для проверки проводников. Однако данная величина в основном используется для выбора сечения проводников.

Вопросы по оптимизации эксплуатационных режимов электрических сетей в части выбора экономически целесообразных сечений проводников рассмотрены в работах Пановой Е.А. и Кочкиной А.В. [17–19]. В статье приводится метод по координатного спуска с использованием уточненных моделей воздушных линий электропередачи.

Эффективный и достаточно точный метод экономического выбора медных кабелей рассмотрен в работах зарубежных авторов MinghuiChen, XiangzhenHe, FushuanWen, S.N. Singh [20].

АНАЛИЗ ЦЕНОВОЙ ПОЛИТИКИ СОВРЕМЕННОГО
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО РЫНКА РОССИИ

В настоящее время активно развивают свою деятельность заводы-изготовители, выпускающие кабельно-проводниковую продукцию в разных регионах России. Цены на эти проводники значительно отличаются в зависимости от региона расположения завода, от расположения поставщика и заказчика.

Анализ ценовой политики на проводники марки АС (напряжением до 110 кВ включительно) и СИП (6–10 кВ) проводился при учете вышеперечисленных условий. Для рассмотрения принята продукция следующих заводов и поставщиков: ООО «ЭлМикс», ООО

«ЭТС ЭЛСИС», ООО «Кабельный центр», ООО «Элетех», «ЭТМ», ООО «Сибэлектростиль», ООО «Энергоцентр-ЕК», ООО «Альфа Кабель», ООО «РТК «Новые Технологии», ООО «ЭлектроКомплект-Сервис», ЗАО «Людиновикабель», АО «Электрокабель» Кольчугинский завод», ООО «ВолгаТехКонтакт» и др.

Сравнительный анализ влияния цен проводился относительно различных сечений проводников и в зависимости от региона. В результате статического анализа найденных по каталожным данным цен получены результаты, приведенные в **табл. 1** для проводников марки АС и в **табл. 2** для СИП (относительно сечений проводников).

Таблица 1

Результаты статистического анализа стоимостных показателей проводников АС

Регион	Среднее значение стоимости 1 м, руб./м, проводника марки АС по регионам России сечением, мм ²						Дисперсия, (руб./м) ²	Математическое ожидание, руб./м	Стандартное отклонение, руб./м	Критерий Кохрена G	$G \leq G_{1-q}$	При $k=6, f=5, q=0,05, G_{1-q}$	$S^2_{напл.}$
	70	95	120	150	185	240							
Западная Сибирь	63,03	86,91	119,13	155,52	200,50	235	4407,4	143,3	66,4	0,27	<	0,44	143,3
Восточная Сибирь	99,85	106,56	129,84	144,96	158,50	206,80	1531,2	141,1	39,1	0,24	<	0,44	141,1
Центр	79,40	103,81	132,71	187,88	244,66	282,37	6496	171,8	80,6	0,27	<	0,44	171,8
Поволжье	121,9	129,10	122,9	151,05	152,70	184,01	576,2	143,6	24,0	0,21	<	0,44	143,6
Дальний Восток	96,01	81,03	91,9	110,88	131,46	118,95	351,3	105,0	18,7	0,21	<	0,44	105,0
Северо-Запад	55,46	77,13	97,21	128,92	154,91	192,46	2607,9	117,7	51,1	0,27	<	0,44	117,7
Северный Кавказ	39,55	77,86	56,1	91,63	134,27	139,89	1658,7	89,9	40,7	0,26	<	0,44	89,9
Урал	61,67	72,18	90,6	119,93	118,44	150,96	1127	102,3	33,6	0,25	<	0,44	102,3
Крым	41,68	58,82	76,23	89,14	114,86	152,47	1602	88,9	40,0	0,29	<	0,44	88,9

Таблица 2

Результаты статистического анализа стоимостных показателей СИП

Регион	Среднее значение стоимости 1 м, руб./м, проводника марки АС по регионам России сечением, мм ²				Дисперсия, (руб./м) ²	Математическое ожидание, руб./м	Стандартное отклонение, руб./м	Критерий Кохрена G	$G \leq G_{1-q}$	При $k=4, f=3, q=0,05, G_{1-q}$	$S^2_{напл.}$
	50	70	95	120							
Западная Сибирь	51,5	68,23	98,79	134	1318,7	88,1	36,3	0,38	<	0,68	88,13
Восточная Сибирь	50,7	67,86	90,42	116,01	801,7	81,2	28,3	0,36	<	0,68	81,25
Центр	49,85	63,31	84,28	108,55	657,3	76,5	25,6	0,35	<	0,68	76,50
Поволжье	44,11	59,71	76,04	102,61	625,0	70,6	25,0	0,36	<	0,68	70,62
Дальний Восток	46,91	65,12	76,69	98,38	464,8	71,8	21,6	0,34	<	0,68	71,78
Северо-Запад	46,33	62,07	84,92	106,79	699,4	75,0	26,4	0,36	<	0,68	75,03
Северный Кавказ	49	74	96,50	124	1022,4	85,9	32,0	0,36	<	0,68	85,88
Урал	42,08	54,63	76,07	95,36	553,5	67,0	23,5	0,36	<	0,68	67,04
Крым	38,51	50	66,4	78,06	305,5	58,2	17,5	0,34	<	0,68	58,24

По результатам анализа стоимостей проводников АС и СИП по критерию Кохрена относительно сечений видно, что все дисперсии однородны. Таким образом, при расчете величины экономической плотности тока достаточно учитывать среднее значение стоимости проводников независимо от их сечения.

Как уже было отмечено, проведен анализ влияния цен проводники при условии их изготовления и продажи в разных регионах Российской Федерации. Данный фактор был учтен ввиду значительной территориальной протяженности нашей страны и обязательным исследованием влияния удаленности покупателей от поставщиков. Зависимости средних величин стоимостей для различных регионов РФ (на примере проводника АС-120 и СИП сечением 70 мм²) приведены на рис. 1–2.

Согласно полученным результатам для всех регионов Российской Федерации дисперсии по критерию Кохрена однородны. Критерии Стьюдента для проводов сечением (50–120) мм² находятся в доверительных интервалах, соответственно дисперсии однородны.

Таким образом, при расчете величин экономической плотности тока для проводов марки АС и СИП зависимость стоимости от регионов можно пренебречь, но ввиду значительных изменений стоимостей с размахом в 40% для некоторых сечений для различных регионов, принято решение об учете региональных коэффициентов, определенных в [21]. В работе [22] приведены дополнительные расчеты по рассмотренному вопросу.

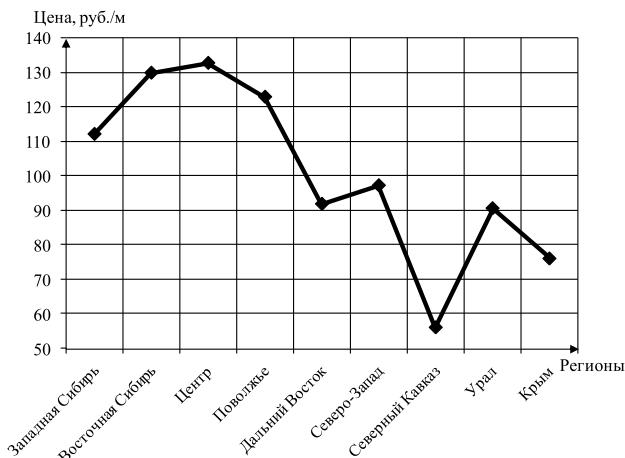


Рис. 1. Зависимость стоимости 1 м проводника марки АС-120 от региона

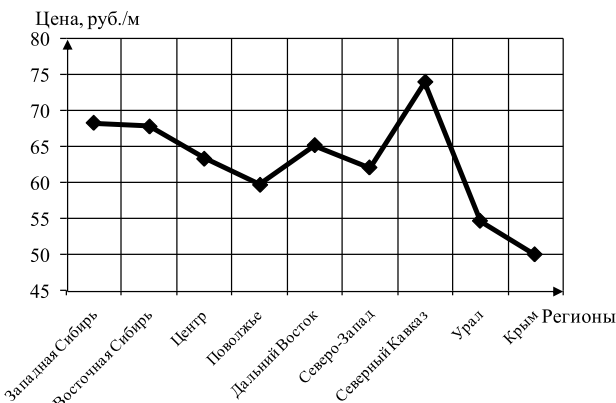


Рис. 2. Зависимость стоимости 1 м проводника марки СИП-3 1х70 от региона

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА

В работе [3] рассматривается подход по определению величин экономической плотности тока по значению приведенных затрат. Однако в этом случае пренебрегают важным фактором – величиной ущерба от перерывов электроснабжения. В условиях рыночной экономики, значительных цен на электроэнергию и весомого влияния электроснабжения на производительность предприятия и, как следствие, на его прибыль становится важным учет ущерба от перерывов электроснабжения. Таким образом, необходимо пользоваться выражением.

$$З = p_n \cdot K + И + У, \quad (1)$$

где $З$ – приведенные затраты, руб./г; $p_n=0,12$ – нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений, 1/г; K – единовременные капитальные вложения, необходимые для сооружения сети, руб.; $И$ – ежегодные эксплуатационные расходы, руб./г; $У$ – ущерб от перерыва в электроснабжении, руб./г.

Стоимость линии зависит от ее длины и определяется по выражению (2).

$$K = K_0 \cdot l, \quad (2)$$

где l – длина линии, км; K_0 – удельные капитальные вложения, руб./км.

$$K_0 = a + bF, \quad (3)$$

где a – капитальные вложения в 1 км линии, не зависящие от сечения, т.е. это затраты на подготовку просеки, на дороги, осушение болот и т.д., руб./км; b – часть удельных капитальных вложений, пропорциональная сечению провода, руб./(км·мм²) (стоимость металла, опор, арматуры); F – сечение проводника, мм².

Ежегодные эксплуатационные расходы находим как сумму издержек на обслуживание, амортизацию и ремонт.

$$И = И_{\Delta P} + И_a + И_p, \quad (4)$$

где $И_{\Delta P}$ – стоимость потерь электроэнергии, руб./г; $И_a$, $И_p$ – издержки на амортизацию и обслуживание электрической сети, руб./г.

Издержки на обслуживание электрических сетей от сечения проводов линии практически не зависят. Стоимость потерь электроэнергии зависит от сечения и определяется.

$$\begin{aligned} И_{\Delta P} &= \Delta W \cdot \beta = \Delta P_{нб} \cdot \tau \cdot \beta = 3 I_{нб}^2 \cdot r_l \cdot \tau \cdot \beta; \\ И_{\Delta P} &= 3 I_{нб}^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{F} \tau \cdot \beta, \end{aligned} \quad (5)$$

где $I_{нб}$ – наибольший рабочий ток линии, А; $\rho=0,0315$ Ом·мм²/м – удельное сопротивление материала провода (для алюминиевого); $\beta=2,82$ руб./кВт·ч – стоимость потерь электроэнергии; τ – время наибольших потерь, ч, т.е. время, за которое при работе с наибольшей нагрузкой потери электроэнергии за год те же, что и при работе по реальному графику нагрузок.

Эксплуатационные расходы на амортизацию и текущий ремонт зависят от сечения.

$$И_a + И_p = a_a \cdot K = a_a \cdot (a + bF) \cdot l, \quad (6)$$

где a_a – ежегодные отчисления на амортизацию и текущий ремонт линии в относительных единицах, $1/\tau$ [21].

Подставляя (5) и (6) в выражение (4), получим

$$И = 3I_{нб}^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{F} \cdot \tau \cdot \beta + a_a \cdot (a + bF) \cdot l. \quad (7)$$

Ущерб от перерыва в электроснабжении находится по формуле

$$V = y_0 \cdot W_y, \quad (8)$$

где y_0 – удельный ущерб от перерыва электроснабжения, $y_0 = 18,3$ руб./кВт·ч [21]; W_y – количество недоотпущенной энергии за время перерыва электроснабжения, кВт·ч.

Количество недоотпущенной энергии определяется

$$W_y = P_y \cdot T_B, \quad (9)$$

где P_y – суммарная наибольшая нагрузка нормального режима, кВт; T_B – среднее время восстановления, ч.

Суммарная нагрузка вычисляется по формуле

$$P_y = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{нб} \cdot \cos \varphi = 3I_{нб}^2 \cdot r \cdot \cos \varphi;$$

$$P_y = 3I_{нб}^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{F} \cdot \cos \varphi, \quad (10)$$

где $\cos \varphi = 0,9$.

Подставляя (9) и (10) в формулу (8), получим ущерб от перерыва электроснабжения:

$$V = y_0 \cdot T_B \cdot 3I_{нб}^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{F} \cdot \cos \varphi. \quad (11)$$

Выражения (7) и (11) подставим в (1), получим:

$$3(F) = (a + bF) \cdot (a_a + p_n) \cdot l +$$

$$+ 3I_{нб}^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{F} \cdot (\tau \cdot \beta + y_0 \cdot T_B \cdot \cos \varphi). \quad (12)$$

Найдем минимум функцию затрат, приравняв производную к нулю. Для этого продифференцируем $3(F)$ по сечению

$$\frac{d3}{dF} = (a_a + p_n) \cdot b \cdot l +$$

$$+ \frac{3I_{нб}^2 \cdot (\tau \cdot \beta + y_0 \cdot T_B \cdot \cos \varphi) \cdot \rho \cdot l}{F^2} = 0. \quad (13)$$

Из этого выражения выводим сечение проводника

$$F_{эк} = I_{нб} \sqrt{\frac{3(\tau \cdot \beta + y_0 \cdot T_B \cdot \cos \varphi) \cdot \rho}{b \cdot (a_a + p_n)}}. \quad (14)$$

Новая формула экономической плотности тока находится как отношение наибольшего протекающего в линии тока к экономическому сечению

$$J_{эк} = \frac{I_{нб}}{F_{эк}} = \sqrt{\frac{b \cdot (a_a + p_n)}{3(\tau \cdot \beta + y_0 \cdot T_B \cdot \cos \varphi) \cdot \rho}}. \quad (15)$$

ЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА ДЛЯ РАССМАТРИВАЕМЫХ ПРОВОДНИКОВ

На основании разработанной методики расчета, в зависимости от: конструктивных особенностей опор и величины времени наибольших нагрузок для различных регионов Российской Федерации, определены величины экономических плотностей тока.

В качестве примера результаты расчетов приведены в табл. 3 для Центрального региона РФ и в табл. 4 для Урала.

Таблица 3

Значение экономической плотности тока для проводников типа АС для Центра РФ

Тип проводника	Число часов использования максимума нагрузки, ч		
	1000–3000	3000–5000	5000–8760
6–10 кВ (СИП)			
– на металлических опорах	2,0	2,0	2,0
– на железобетонных опорах	2,0	2,0	2,0
35–110 кВ (АС)			
– на металлических опорах одноцепные	1,061	1,060	1,057
– на металлических опорах двухцепные (одна отключена)	1,410	1,407	1,402
– на металлических опорах двухцепные (две отключены)	1,016	1,015	1,013
– на железобетонных опорах одноцепные	1,026	1,025	1,023
– на железобетонных опорах двухцепные (одна отключена)	1,099	1,098	1,096
– на железобетонных опорах двухцепные (две отключены)	0,966	0,965	0,963
– на деревянных опорах одноцепные	1,123	1,122	1,120

Таблица 4

Значение экономической плотности тока для проводников типа АС для Урала

Тип проводника	Число часов использования максимума нагрузки, ч		
	1000–3000	3000–5000	5000–8760
6–10 кВ (СИП)			
– на металлических опорах	1,698	1,693	1,682
– на железобетонных опорах	1,565	1,561	1,551
35–110 кВ (АС)			
– на металлических опорах одноцепные	0,819	0,818	0,816
– на металлических опорах двухцепные (одна отключена)	1,088	1,086	1,082
– на металлических опорах двухцепные (две отключены)	0,784	0,783	0,782
– на железобетонных опорах одноцепные	0,792	0,791	0,789
– на железобетонных опорах двухцепные (одна отключена)	0,848	0,847	0,845
– на железобетонных опорах двухцепные (две отключены)	0,745	0,745	0,743
– на деревянных опорах одноцепные	0,867	0,866	0,864

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был разработан метод расчета величин экономической плотности тока для проводников АС и СИП с учетом фактора надежности электроснабжения. Нормированные значения, приведенные в [1], сильно устарели. В настоящее время прокладка проводов осуществляется по металлическим, железобетонным, деревянным опорам на разных уровнях напряжения, от чего зависят амортизационные отчисления. Так же будут изменяться и расходы на капитальные вложения в строительство и обслуживание линий в зависимости от региона расположения линейного объекта. Исходя из всех этих факторов была разработана новая методика расчета величин экономической плотности тока и получены новые значения $J_{\text{эк}}$ для проводов АС и СИП. На основании полученных значений целесообразно $J_{\text{эк}}$ определять экономически выгодные сечения проводников для вновь вводимых в эксплуатацию сетей и для реконструируемых отдельных их участков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдгоф Б.Г., Соколов Б.А., Соколов Д.В. Электрооборудование промышленных предприятий и установок. Ч. 1. М.: Стройиздат, 1965. 323 с.
2. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. 9-й вып. Новосибирск: Сиб. ун-в. изд-во, 2010. 464 с.
3. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
4. Веников В.А., Глазунов А.А., Жуков Л.А. Электрические системы. М.: Высш. шк., 1998. 511 с.
5. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. Ростов н/Д: Феникс, 2008. 715 с.
6. Блок В.М. Электрические сети и системы. М.: Высш. шк., 1986. 430 с.
7. Dhillon B. S. Life Cycle Costing for Engineers. London – New York, CRC Press, 2010.
8. Суворова И.А., Черепанов В.В. Определение экономической плотности тока в современных условиях для линий 6–35 кВ // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 6. URL: <http://research-journal.org/?p=4404>.
9. Suvorova I., Cherepanov V., Basmanov V. Peculiarity of Determination of Economic Current Density Values for 6 – 35 kv Power Lines Under Modern Conditions // Applied Mechanics and Materials. 2015. N792, pp. 300–304. DOI:10.4028/www.scientific.net/AAM.792.300.
10. Зуев Э.Н. Выбор основных параметров линий электропередачи районных электрических сетей в современных условиях. М.: Информэлектро, 2003. 64 с.
11. Фрайштетер В.П., Мартыанов А.С. Выбор экономически обоснованного сечения проводов и жил кабелей линий электропередачи при проектировании // Нефтяное хозяйство. 2011. №4. С. 117 – 121.
12. Волотковская Н.С. Выбор сечения ЛЭП по минимуму затрат // Вестник ЯГУ. 2006. Т. 3, №3. С. 52–55.
13. Глазунов А.А. Электрические системы и сети. М.: Госэнергоиздат, 1960. 368 с.
14. Кукель-Краевский С.А. Электроэнергетическая система. Ч. 1. Теоретические основы технико-экономического проектирования. М: ГОНТИ, 1938. 441 с.
15. Ефентьев С.Н., Зуев Э.Н. Экономические токовые интервалы сечений проводов воздушных линий – вчера, сегодня, завтра // Электро. 2005. №3. С. 43–48.
16. Калимуллина Р.М. Выбор сечения проводников по экономической плотности тока // Инновационная наука. 2016. №1. С. 55–56.
17. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models // Procedia Engineering. 2015. N 129, pp. 951–955.
18. Панова Е.А., Кочкина А.В. Постановка задачи выбора оптимальных сечений проводников электрических сетей с использованием уточненной схемы замещения воздушных линий электропередачи // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. трудов VII Международной научной конференции молодых ученых / Новосибирский государственный технический университет; Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области. Новосибирск, 2015. С. 225–228.
19. Методика выбора оптимальных сечений проводников электрических сетей 35–220 кВ / Христофоров Д.А., Хужина З.Б., Варганова А.В., Дубина И.А. // Энергетические и электротехнические системы. 2015. №3 (24). С. 49–52.
20. Vaskovskaya T.A. Possibility of Controlling Nonregulated Prices in the Electricity Market by Means of Varying the Parameters of a Power System // Thermal Engineering. 2014. N13, pp. 977–980.
21. Карапетян И.Г., Файбисович Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ЭНАС, 2012. 376 с.

Поступила в редакцию 05 июля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CALCULATION OF ECONOMIC CURRENT DENSITY IN THE MODERN ELECTRICAL ENGINEERING MARKET

Zaliya B. Khuzhina

Project engineer, LLC “YUGRAENERGO”

Aleksandra V. Varganova

Associate Professor of Industrial Power Supply Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The article considers questions of economic current density design value of a 35–110 kV aluminium-steel conductor and a 6–10 kV self-supporting insulated conductor. The conductor price influence is under consideration taking into account the region and the conductor section. A method of economic current density estimation is designed taking into account supply interruption costs and discounted costs.

Keywords: Economic current density, power system, conduit section, self-supporting insulated conductor, supply interruption costs, discounted costs, costs.

REFERENCES

1. Goldgof B.G., Sokolov B.A., Sokolov D.V. Launcher Electrical Equipment of Industrial Enterprise. Part 1. Moscow: Stroyizdat, 1965. 323 p. (In Russian)

2. Operational Code for Electrical Installations. PUE-7. Novosibirsk: Sib.univer. izd-vo, 2010. 464 p.
3. Idelchik V.I. Electric Power Systems and Grids. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 592 p. (In Russian)
4. Venicov V.A., Glazunov A.A., Zhukov L.A. Electric Power Systems. Moscow: Vyssh. shk., 1998. 511 p. (In Russian)
5. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. Electrical Power Distribution and Transmission. Rostov-on-Don: Feniks, 2008. 715 p. (In Russian)
6. Blok V.M. Electric Power Systems and Grids. Moscow: Vyssh. shk., 1986. 430 p. (In Russian)
7. Dhillon B. S. Life Cycle Costing for Engineers. London - New York, CRC Press, 2010.
8. Suvorova I., Cherepanov V. Determination of Economic Current Density Values for 6–35 kv Power Lines Under Modern Conditions. *Research journal*. 2013, no. 6. URL: <http://research-journal.org/?p=4404>.
9. Suvorova I., Cherepanov V., Basmanov V. Peculiarity of Determination of Economic Current Density Values for 6–35 kv Power Lines Under Modern Conditions. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, no. 792, pp. 300–304. DOI:10.4028/www.scientific.net/AAM.792.300.
10. Zuev E.N. Electricity Transmission Line Sizing of Modern Single-Area Power Grids. Moscow: Informelektro, 2003. 64 p. (In Russian)
11. Frayshteter V.P., Martinov A.S. The Choice of Economically Sound Section of Wires and Cable Conductors of Power Lines During the Design. *Oil Industry*. 2011, no. 4, pp. 117–121. (In Russian)
12. Volotkovskaya N.S. Wire Section Choice Using Minimized Costs. *Vestnik YaGU*. 2006, no. 3, pp. 52–55. (In Russian)
13. Glazunov A.A. Electric Power Systems and Grids. Moscow: Gosenergoizdat, 1960. 368 p. (In Russian)
14. Kukel-Krayevskiy S.A. Electric Power Systems. Part 1. Theory of Maintenance Engineering-and-Economical Designing. Moscow: GONTI, 1938. 441 p. (In Russian)
15. Efentev S.N., Zuev E.N. Economical Current Steps of Section of Wires of Power Lines - Yesterday, Today, Tomorrow. *Electro*. 2005, no. 3, pp. 43–48. (In Russian)
16. Kalimullina R.M. Cross Section Choice Using Economic Current Density. *Innovatsionnaya nauka*. 2016, no. 1, pp. 55–56. (In Russian)
17. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. The Algorithm Of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. *Procedia Engineering*. 2015, no. 129, pp. 951–955.
18. Panova E.A., Kochkina A.V. Tasking of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. *Elektrotehnika. Elektrotehnologiya. Energetika*. Novosibirsk: NGTU, 2015, pp. 225–228. (In Russian)
19. Khristoforov D.A., Khugina Z.B., Varganova A.V., Dubina I.A. Effective Line Conductor Cross-Section Procedure Under Conditions Electric Networks 35–220 kV. *Energeticheskiye I Elektrotekhnicheskiye Sistemy*. 2015, no. 3(24), pp. 49–52. (In Russian)
20. Vaskovskaya T.A. Possibility of Controlling Nonregulated Prices in the Electricity Market by Means of Varying the Parameters of a Power System. *Thermal Engineering*. 2014, no. 13, pp. 977–980.
21. Karapetian I.G., Faibisovich D.L. Reference-Book on Design of Electric Power Systems. Moscow, ENAS, 2012. 376 p. (In Russian)

Хужина З.Б., Варганова А.В. Определение величин экономических плотностей тока в условиях современного рынка на электротехническое оборудование // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3(36). С. 23–28. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-23-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-23-28)

Khuzhina Z.B., Varganova A.V. Calculation Of Economic Current Density In The Modern Electrical Engineering Market. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 23–28. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-23-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-23-28)

Панова Е.А.¹, Крюкова А.А.²¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова² ОАО «Магнитогорскгражданпроект»

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФАЗНЫХ КООРДИНАТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Расчет режима однофазного короткого замыкания в сети с эффективно заземленной нейтралью связан с рядом трудностей. Одна из них связана с необходимостью учета взаимоиндукции между проводящими элементами линии электропередачи (ЛЭП). Действующие руководящие указания предполагают учет данного явления с помощью метода симметричных составляющих, однако приведенные там выражения для определения сопротивления ЛЭП действительны только для линий с полным циклом транспозиции. В системах электроснабжения промышленных предприятий ЛЭП напряжением 110 кВ имеют сравнительно небольшую протяженность и потому являются нетранспонированными. Авторами предложена комбинированная схема замещения электрической сети, позволяющая моделировать ЛЭП с использованием метода фазных координат, а остальные элементы сети в симметричных составляющих. Такой подход эффективен для учета несимметрии расположения проводов и грозозащитного троса друг относительно друга на опоре. В статье приведена математическая модель ЛЭП, а также выполнено сравнение сопротивлений линий, определенных различными способами. Также выполнен расчет токов однофазного короткого замыкания в условиях реального объекта – системы электроснабжения крупного предприятия черной металлургии. Расчеты выполнены как для случая короткого замыкания на распределительном устройстве подстанции, так и для случая короткого замыкания на ЛЭП. Разработанная математическая модель ЛЭП реализована в программном комплексе КАТРАН.

Ключевые слова: система электроснабжения, линия электропередачи, взаимная индуктивность, короткое замыкание, несимметричный режим, фазные координаты, моделирование, КАТРАН, симметричные составляющие, режим.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование элементов электрической сети с целью выполнения расчетов параметров несимметричного режима (нормального или аварийного) может быть выполнено различными способами. Одним из наиболее простых является метод симметричных составляющих, основы которого подробно изложены в [1]. Данный метод может быть успешно использован для моделирования несимметричных режимов работы, в частности коротких замыканий [2], неполнофазных режимов [3], а также режимов сложной несимметрии [4]. Также данный метод может быть использован для моделирования линий электропередачи с учетом взаимоиндуктивного влияния их проводящих элементов [5–7].

Очевидным недостатком метода симметричных составляющих является отсутствие возможности учета пофазной несимметрии элементов сети. Указанный недостаток можно устранить применением метода фазных координат [8]. Фазные координаты широко используются для моделирования несимметричных режимов электрической сети [9–12], в том числе сложных видов повреждений [13]. Также данный метод удобен для моделирования электрических сетей с симметрирующими устройствами и устройствами FACTS [14, 15], учета электромагнитного влияния смежных линий [16]. Большое количество работ посвящено моделированию отдельных элементов сети в фазных координатах, таких как трансформаторы, синхронные двигатели и генераторы [17–20].

Использование метода фазных координат также связано с некоторыми сложностями. Так, при моделировании электрической сети в фазных координатах для расчета её режима может быть применен метод узловых напряжений или контурных токов. Однако это либо вносит погрешности при наличии ветвей с нулевым сопротивлением, так как их приходится заменять

ветвью с малым сопротивлением, чтобы избежать слабой заполненности матрицы узловых проводимостей, либо приводит к погрешностям при наличии обрыва в сети [21]. Устранить указанный недостаток можно, используя схему замещения, являющуюся комбинацией трехлинейной и однолинейной схем. При этом участки, для которых важен учет пофазной несимметрии, моделируются в фазных координатах, а остальная часть схемы с использованием метода симметричных составляющих. Авторами предлагается использовать такой подход к моделированию линий электропередачи напряжением 110 и 220 кВ систем электроснабжения промышленных предприятий. Актуальность поставленной задачи обусловлена сравнительно малой протяженностью указанных линий (до 15 км), в силу чего они все являются нетранспонированными, а значит, при несимметричном расположении проводящих элементов на опоре сопротивление ЛЭП по фазам будет отличаться. Этим различием можно пренебречь при расчете установившегося режима, однако, при расчетах режима однофазного короткого замыкания, особенно с целью определения места повреждения, его необходимо учитывать.

КОМБИНИРОВАННАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

На **рис. 1** упрощенно представлена комбинированная схема замещения. На ней в качестве примера приведена трехфазная схема замещения одноцепной ЛЭП с грозозащитным тросом. На **рис. 1** приняты следующие обозначения: Z_A, Z_B, Z_C – собственные сопротивления фаз; Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{AC} – сопротивления взаимоиндукции «фаза-фаза»; Z_T – сопротивление грозозащитного троса; Z_{AT}, Z_{BT}, Z_{CT} – сопротивления взаимоиндукции «фаза-трос»; Z_1, Z_2, Z_0 – сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности; E_1 – ЭДС прямой последовательности; s, s^{-1} – промежуточные элементы, осуществляющие перевод фазных координат в симметричные составляющие.

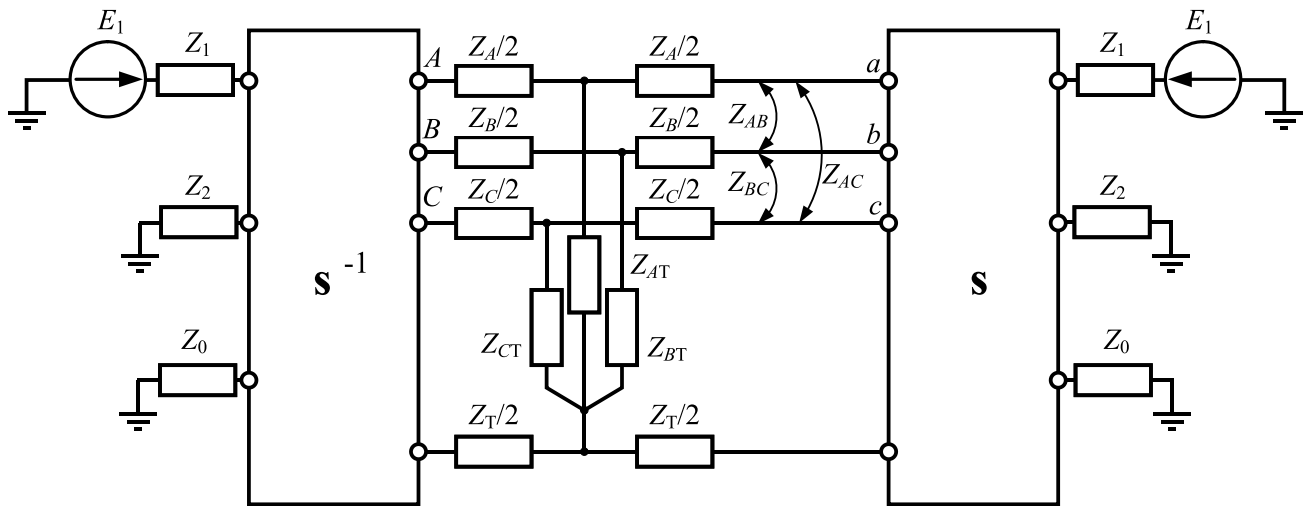


Рис. 1. Комбинированная схема замещения

Элементы матриц $\mathbf{s}$ и $\mathbf{s}^{-1}$ определяются следующим образом:

$$\dot{\mathbf{s}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{s}}^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $\dot{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – оператор, осуществляющий поворот вектора на 120° .

Фазные и междуфазные сопротивления ЛЭП в фазных координатах представляет собой матрицу размерностью 3×3 .

$$\dot{\mathbf{Z}}_{LM} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_A & \dot{Z}_{AB} & \dot{Z}_{AC} \\ \dot{Z}_{AB} & \dot{Z}_B & \dot{Z}_{BC} \\ \dot{Z}_{AC} & \dot{Z}_{BC} & \dot{Z}_C \end{pmatrix}, \quad (3)$$

а для двухцепной ЛЭП – 9×9

$$\dot{\mathbf{Z}}_{LM} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_A & \dot{Z}_{AB} & \dot{Z}_{AC} & \dot{Z}_{Aa} & \dot{Z}_{Ab} & \dot{Z}_{Ac} \\ \dot{Z}_{BA} & \dot{Z}_B & \dot{Z}_{BC} & \dot{Z}_{Ba} & \dot{Z}_{Bb} & \dot{Z}_{Bc} \\ \dot{Z}_{CA} & \dot{Z}_{CB} & \dot{Z}_C & \dot{Z}_{Ca} & \dot{Z}_{Cb} & \dot{Z}_{Cc} \\ \dot{Z}_{aA} & \dot{Z}_{aB} & \dot{Z}_{aC} & \dot{Z}_a & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac} \\ \dot{Z}_{bA} & \dot{Z}_{bB} & \dot{Z}_{bC} & \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_b & \dot{Z}_{bc} \\ \dot{Z}_{cA} & \dot{Z}_{cB} & \dot{Z}_{cC} & \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_c \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Сопротивления «фаза-трос» также представляют собой матрицу

$$\dot{\mathbf{Z}}_{пТ} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{AT} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_{BT} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_{CT} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Преобразование сопротивления в фазных координатах в сопротивления в симметричных составляющих выполняется по следующей формуле:

$$\dot{\mathbf{Z}}_S = \dot{\mathbf{s}}^{-1} \cdot \dot{\mathbf{Z}}_{LM} \cdot \dot{\mathbf{s}}. \quad (6)$$

Выполнив преобразование по (6), получим матрицу, диагональные элементы которой являются сопротивлениями ЛЭП по прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 &= \frac{1}{3} [\dot{Z}_A + \dot{Z}_B + \dot{Z}_C - (\dot{Z}_{AC} + \dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC})], \\ \dot{Z}_2 &= \frac{1}{3} [\dot{Z}_A + \dot{Z}_B + \dot{Z}_C - (\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{AC})], \\ \dot{Z}_0 &= \frac{1}{3} [\dot{Z}_A + \dot{Z}_B + \dot{Z}_C + 2(\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{AC})]. \end{aligned} \quad (7)$$

Собственные сопротивления фаз определяются по [5]

$$\dot{Z}_A = \dot{Z}_B = \dot{Z}_C = r_{\pi} + r_3 + j0,145 \lg \frac{D_3}{\rho_{\pi.п}}, \quad (8)$$

где r_{π} – активное сопротивление провода, Ом/км; $r_3 = 0,15$ Ом/км – сопротивление, учитывающего потери активной мощности в земле от протекающего в ней тока; $D_3 = 935$ м – эквивалентная глубина расположения обратного провода; $\rho_{\pi.п}$ – эквивалентный радиус провода, м (для сталеалюминевых проводов $\rho_{\pi.п} = 0,95 \rho_{\pi}$).

Сопротивления взаимной индукции «фаза-фаза»

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{AB} &= r_3 + j0,145 \lg (D_3 / D_{AB}), \\ \dot{Z}_{BC} &= r_3 + j0,145 \lg (D_3 / D_{BC}), \\ \dot{Z}_{AC} &= r_3 + j0,145 \lg (D_3 / D_{AC}), \end{aligned} \quad (9)$$

где D_{AB} , D_{BC} , D_{AC} – расстояния между соответствующими фазами, м.

Для линий электропередачи с грозозащитным тросом необходимо определить сопротивление взаимной индукции «провод-трос». Данное сопротивление также преобразуется из фазных координат в симметричные составляющие подстановкой (5) в (6). Для всех после-

довательностей получим

$$\dot{Z}_{\text{нТ}} = \frac{1}{3}(\dot{Z}_{\text{АТ}} + \dot{Z}_{\text{ВТ}} + \dot{Z}_{\text{СТ}}). \quad (10)$$

Сопротивление взаимной индукции «провод-трос» для каждой фазы

$$\dot{Z}_{\text{фТ}} = 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{D_{\text{фТ}}}, \quad (11)$$

где $D_{\text{фТ}}$ – расстояние от провода соответствующей фазы до грозозащитного троса.

В соответствии с [5] сопротивление троса для схемы нулевой последовательности:

$$\dot{Z}_{0\text{Т}} = 3r_{\text{Т}} + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{\rho_{\text{Э.Т}}}, \quad (12)$$

где $\rho_{\text{Э.Т}}$ – эквивалентный радиус троса, м.

Результирующее сопротивление ЛЭП с тросом

$$\dot{Z}_0^{(\text{Т})} = \dot{Z}_0 - \frac{\dot{Z}_{\text{нТ}}^2}{\dot{Z}_{0\text{Т}}}. \quad (13)$$

Для двухцепных ЛЭП с тросом к $\dot{Z}_0^{(\text{Т})}$ необходимо прибавить сопротивление взаимной индукции между цепями, которое вычисляется аналогично (7) и равно

$$\dot{Z}_0 = \frac{1}{3}[\dot{Z}_{\text{Аа}} + \dot{Z}_{\text{Вв}} + \dot{Z}_{\text{Сс}} + 2(\dot{Z}_{\text{Ав}} + \dot{Z}_{\text{Вс}} + \dot{Z}_{\text{Ас}})]. \quad (14)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Разработанная модель линии электропередачи реализована в программном комплексе КАТРАН, разработанном на кафедре электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Для оценки полученной модели в табл. 1 приведены удельные сопротивления двухцепной ЛЭП с одним грозотросом марки ТК-9,1, выполненной проводом АС-300/39 на опоре У-110-2.

Значения сопротивлений по последовательностям, полученных методом фазных координат, оказались меньше, чем тех же сопротивлений, рассчитанных по руководящим указаниям [5]. Это обусловлено тем, что в комбинированной схеме замещения использовались фактические расстояния между проводами, а при расчете по руководящим указаниям – среднегеометрические. Однако сопротивления по справочным данным для нулевой последовательности оказались меньше, чем рассчитанные по руководящим указаниям. Это объясняется тем, что в справочных данных сопротивление линии АС-300/39 не приводится для уровня напряжения 110 кВ, поэтому сопротивление принималось для напряжения 220 кВ, среднегеометрическое расстояние для которого – 8 м, что не соответствует среднегеометрическому расстоянию на опоре У-110-2.

Разработанная математическая модель и программный комплекс были использованы для выполнения расчетов токов однофазного короткого замыкания

в условиях Магнитогорского энергетического узла (МЭУ). Он представляет собой сложносвязную сеть напряжением 110 и 220 кВ. Источниками электроснабжения являются собственные электростанции суммарной установленной мощностью более 600 МВт, а также узлы примыкания к энергосистеме. Сеть 110 кВ разделена на два полукольца, имеющих связь через сеть 220 кВ. На рис. 2 приведена упрощенная схема «южного» полукольца МЭУ. Результаты расчета токов однофазного короткого замыкания с использованием разработанной комбинированной схемы замещения и упрощенной схемы представлены в табл. 2.

Таблица 1

Удельные сопротивления, Ом/км

Способ моделирования	$\dot{Z}_1, \dot{Z}_2$	$\dot{Z}_0$
Упрощенная схема замещения	0,098+j0,429	0,46+j2,0163
Расчет по [5]	0,097+j0,428	0,498+j2,306
Комбинированная схема замещения	0,097+j0,395	0,397+j2,194

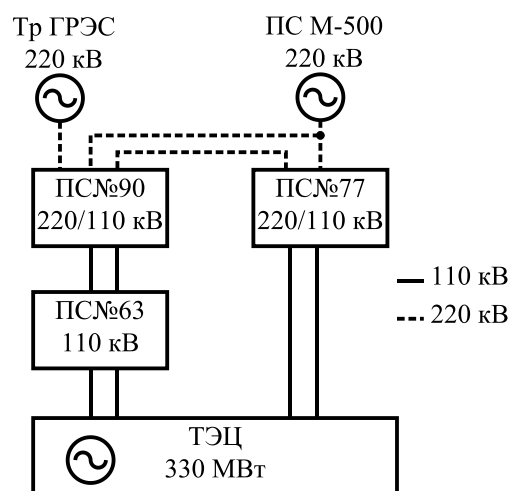


Рис. 2. Упрощенная схема «южного» полукольца МЭУ

Таблица 2

Результаты расчета тока однофазного короткого замыкания на РУ 110–220 кВ «южного» полукольца МЭУ

Ток, кА	Модель ЛЭП	ТЭЦ 110 кВ	ПС №77 220 кВ	ПС №77 110 кВ	ПС №90 220 кВ	ПС №90 110 кВ	ПС №63 110 кВ
$I_{\text{кз}}$	1	24,11	16,8	23,5	17,71	20,43	11,86
	2	25,23	16,94	24,34	17,74	20,77	12,62
ΔI		1,12	0,14	0,84	0,03	0,34	0,76
I_1	1	7,53	4,52	7,34	5,58	6,43	5,22
	2	7,41	5,08	7,22	5,52	6,28	4,99
ΔI		–0,12	0,56	–0,12	–0,06	–0,15	–0,23
I_2	1	6,9	4,96	6,67	5,74	6,15	4,81
	2	6,83	4,95	6,59	5,73	6,06	4,63
ΔI		–0,07	–0,01	–0,08	–0,01	–0,09	–0,18
I_0	1	5,63	3,89	5,53	3,7	4,58	1,08
	2	6,4	4	6,13	3,75	4,91	1,76
ΔI		0,77	0,11	0,6	0,05	0,33	0,68

Примечание. 1 – комбинированная схема замещения; 2 – упрощенная схема замещения.

Из табл. 2 видно, что при расчетах токов короткого замыкания прямой и обратной последовательности использование уточненной схемы замещения дает большие значения токов короткого замыкания, по сравнению с использованием упрощенной схемы замещения ЛЭП. Это обусловлено наличием сопротивления взаимоиндукции, которое уменьшает сопротивление прямой и обратной последовательности линии.

Токи нулевой последовательности, рассчитанные с помощью метода фазных координат, оказываются меньше, так как сопротивление взаимоиндукции проводов увеличивает собственное сопротивление линии по нулевой последовательности.

Фазные токи по уточненной схеме замещения оказались меньше, чем фазные токи по упрощенной, так как являются геометрической суммой токов симметричных составляющих и поэтому их изменение обусловлено изменением токов последовательностей.

Разработанная комбинированная схема замещения ЛЭП может быть эффективна при расчетах тока однофазного короткого замыкания с целью дистанционного определения места повреждения. В качестве примера в статье приведен расчет для линии ТЭЦ-ПС №77. Значения токов фиксировались для начала и конца линии и точки КЗ. Токи короткого замыкания рассчитывались тремя способами: с использованием упрощенной схемы замещения ЛЭП (по удельным справочным сопротивлениям), схемы замещения в соответствии с руководящими указаниями [5] и схемы замещения в фазных координатах. Результаты представлены на рис. 3.

Видно, что использование упрощенной схемы замещения ЛЭП дает завышенные значения токов КЗ. Это объясняется тем, что справочные данные для проводов марки АС-300 определены для среднегеометрических расстояний между фазами, соответствующих уровню напряжения 220 кВ, а в схеме замещения нулевой последовательности наличие троса учтено введением коэффициента. Использование выражений, приведенных в [5], дает меньшие значения токов, однако данные выражения справедливы для линий с полным циклом транспозиции. Так как в промышленных системах электроснабжения ЛЭП имеют сравнительно небольшую протяженность, транспозиция на них не применяется, поэтому при расчете токов КЗ с целью ОМП для повышения точности необходимо учитывать несимметрию расположения проводящих элементов на опоре друг относительно друга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами разработана комбинированная схема замещения, в которой ЛЭП моделируется в фазных координатах. Полученная схема замещения позволяет учесть несимметрию расположения проводящих элементов ЛЭП на опоре, что особенно актуально для нетранспонированных ЛЭП в системах электроснабжения промышленных предприятий. При этом остальная часть схемы может быть смоделирована в симметричных составляющих, что упрощает составление схемы замещения и повышает сходимость расчетов.

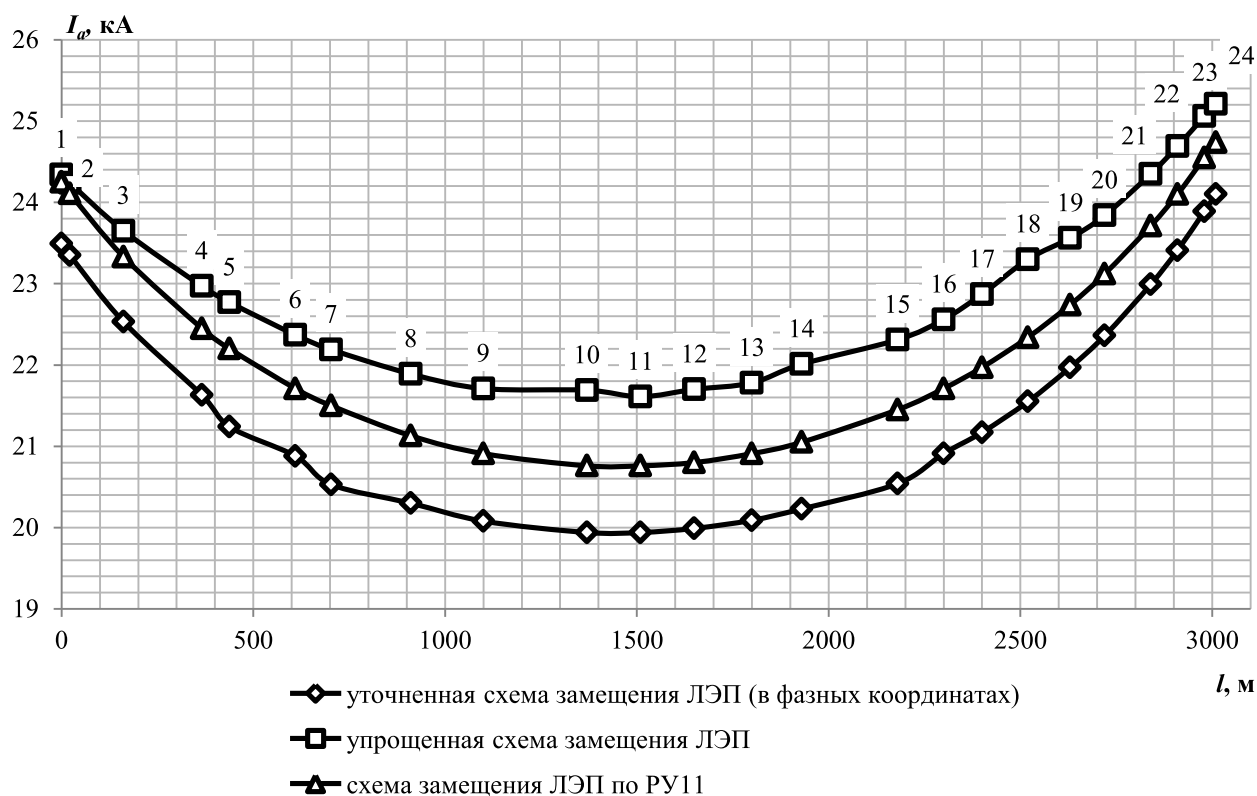


Рис. 3. Ток однофазного короткого замыкания на опорах ЛЭП ПС №77-ТЭЦ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Щедрин Н. Токи короткого замыкания высоковольтных систем: учебное пособие для энергет. вузов. М.; Л.: Объед. науч. техн. изд-во НКТП СССР, гл. ред. энергет. лит., 1935. 457 с.
- Панова Е.А. Повышение режимной надежности систем электроснабжения промышленных предприятий в условиях аварийной несимметрии: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03: защищена 25.05.12: утв. 10.06.13 / Панова Евгения Александровна. Магнитогорск, 2012. 205 с. Библиогр.: с. 137–157.
- Моделирование неполнофазных аварийных режимов в задаче расчёта и анализа работы систем промышленного электроснабжения / А.В. Малафеев, Е.А. Панова, С.В. Беляев, А.А. Емельянов, А.Я. Альбрехт, О.Ю. Биктеева // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. №4. С.119–123.
- Малафеев А.В., Панова Е.А. Алгоритм расчета сложно-несимметричных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий // Главный энергетик. 2011. №3. С.35–39.
- Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчет токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. М.: Энергия, 1979. 152 с.
- Панова Е.А., Альбрехт А.Я. Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С.35–40. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40
- Панова Е.А., Савельева К.С. Определение удельных электрических параметров воздушных линий электропередачи // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. №10. С.16–22.
- Лосев С.Б., Чернин А.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. М.: Энергоатомиздат, 1983. 528 с.
- Гусейнов Ак.М., Ибрагимов Ф.Ш. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся и переходных режимов в сложных электроэнергетических системах // Электричество. 2012. №5. С. 10–17.
- Гусейнов Ак.М., Ибрагимов Ф.Ш. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся и переходных режимов в сложных электроэнергетических системах // Электричество. 2012. №7. С. 23–34.
- He W.X., Teo C.Y. Unbalanced short-circuit calculation by phase coordinates, Energy Management and Power Delivery, 1995. Proceedings of EMPD '95., 1995 International Conference on, 1995, pp. 744–748, vol. 2. doi: 10.1109/EMPD.1995.500821
- Berman A., Xu Wilsun. Analysis of faulted power systems by phase coordinates, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 587–595, Apr 1998. doi: 10.1109/61.660932
- Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование сложных повреждений в электрических сетях на основе фазных координат // Системы. Методы. Технологии. 2010. №6. С. 46–52.
- Попов Н.М., Петрищев М.В. Моделирование линии с симметрирующим устройством в фазных координатах // Тр. Международной науч.-техн. конф. энергообеспечение и энергосбережение в сельском хоз-ве. 2012. Т. 1. С. 116–121.
- Ramirez J.M., Davalos R.J.M., Haro P.Z., Perez R.C. FACTS devices embedded into a power system in phase coordinates, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004., Denver, CO, 2004, pp. 1527–1534, vol. 2. doi: 10.1109/PES.2004.1373128
- Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование электромагнитных влияний на смежные ЛЭП на основе расчета режимов энергосистемы в фазных координатах: монография. Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2009. 120 с.
- L. A. F. R., Iov F., Blaabjerg F., Hansen A. D. Advanced Induction Machine model in Phase Coordinates for Wind Turbine Application, 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, 2007, pp. 1189–1194. doi: 10.1109/IEMDC.2007.383599
- Lagace P. J., Vuong M. H., Al-Haddad K. A time domain model for transient simulation of synchronous machines using phase coordinates, 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Que., 2006, 6 p. doi: 10.1109/PES.2006.1709083
- Yu Ting-Chung, Marti J. R., A robust phase-coordinates frequency-dependent underground cable model (zCable) for the EMTP, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 1, pp. 189–194, Jan 2003. doi: 10.1109/TPWRD.2002.807749
- Svenda G. S., Nahman J. M., Transformer phase coordinate models extended for grounding system analysis, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 4, pp. 1023–1029, Oct 2002. doi: 10.1109/TPWRD.2002.803799
- Осак А.Б. Практические методы расчета токов короткого замыкания в ЭЭС при сложных видах замыканий с использованием фазных координат // Технические науки – от теории к практике. 2016. №55. С.181–190.

Поступила в редакцию 31 июля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

APPLICATION OF PHASE COORDINATES TO AN INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEM OVERHEAD TRANSMISSION LINES SIMULATION

Evgeniya A. Panova

Ph.D (Eng.), Associate Professor, Industrial Electric Power Supply Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ea.panova@magtu.ru

Anastasiya A. Kryukova

Electrical department engineer, "Magnitogorskgrazhdanproekt" OJSC, Magnitogorsk, Russia.

Computation of a single-phase short circuit mode of an effectively grounded network faces a number of difficulties. One of them is the need of calculation of mutual inductance between conducting elements of an overhead transmission line (OHTL). Current guidelines refer to the symmetrical components method for mutual inductance calculation, but their formulas of OHTL complex impedance are good only for barrel OHTL. In 110 kV industrial electric power supply system OHTL are relatively short and therefore are nontransposed. The authors introduce a com-

bined equivalent scheme, which makes it possible to simulate OHTL with phase coordinates method and the rest network with symmetrical components. Such an approach is preferment for introduction of unsymmetrical position of wires and ropes on the line tower. The paper gives OHTL mathematical model and a comparison of line impedance calculated by different ways. Also the computation of a single-phase short circuit currents is conducted in the context of a real object – iron-and-steel industry enterprise electric power system. The computation is conducted

not only for the short circuit on the bus bars, but also for an OHTL short circuit. Elaborated OHTL mathematical model is applied in KATRAN software.

Keywords: Electric power system, overhead transmission line, mutual inductance, short circuit, unbalanced mode, phase coordinates, simulation, KATRAN, symmetrical components, mode.

REFERENCES

- Shchedrin N. *Toki korotkogo замыкания высоковольтных систем* [Short-circuit current of an electric power system]. Moscow, Leningrad, United scientific technical Publ. of USSR NKTP, general Publ. of power Eng. literature, 1935. 457 p.
- Panova E.A. *Povyshenie rezhimnoy nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya promyshlennyykh predpriyatiy v usloviyakh avariynoy nesimmetrii* [Performance reliability enhancement in industrial electric power systems in terms of out-of-balance emergency operating conditions. Ph.D(Eng.) Diss.]. Magnitogorsk, 2015. 205 p.
- Malafeev A.V., Panova E.A., Belyaev S.V., Emel'yanov A.A., Al'brekht A.Ya., Bikteeva O.Yu. Simulation of openphase mode in the problem of computation and analysis of industrial electric power system operation. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of higher education institutions. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 119–123. (In Russian)
- Malafeev A.V., Panova E.A. The algorithm of complex out-of-balance operation mode computation in industrial electric power systems. *Glavnyy energetik* [Chief power engineer], 2010, no. 3, pp. 35–39. (In Russian)
- Guidelines on relay protection. Iss.11. Short-circuit current calculation for relay protection and system automatics in 110–750 kV network. Moscow, Energiya Publ., 1979. 152 p.
- Panova E.A., Al'brekht A.Ya. Specified Per-unit Parameters of Double-circuit 110 kV Overhead Lines for Distant Fault Location. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 4(33), pp. 35–40. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40
- Panova E.A., Savel'eva K.S. Evaluation of specific electric parameters of overhead transmission lines. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: exploitation and maintenance], 2014, no. 10, pp. 16–22. (In Russian)
- Losev S.B., Chernin A.B. *Vychislenie elektricheskikh velichin v nesimmetrichnykh rezhimakh elektricheskikh sistem* [Calculation of electrical parameters in an unbalanced mode of electric power system]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 528 p.
- Guseynov Ak.M., Ibragimov F.Sh. Computation in phase coordinates of an unbalanced steady state and transient modes in complex power grids. *Elektrichestvo* [Electricity], 2012, no. 5, pp. 10–17. (In Russian)
- Guseynov Ak.M., Ibragimov F.Sh. Computation in phase coordinates of an unbalanced steady state and transient modes in complex power grids. *Elektrichestvo* [Electricity], 2012, no. 7, pp. 23–34. (In Russian)
- He W.X., Teo C.Y. Unbalanced short-circuit calculation by phase coordinates, Energy Management and Power Delivery, 1995. Proceedings of EMPD '95., 1995 International Conference on, 1995, pp. 744–748, vol. 2. doi: 10.1109/EMPD.1995.500821
- Berman A., Xu Wilsun. Analysis of faulted power systems by phase coordinates, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 587–595, Apr 1998. doi: 10.1109/61.660932
- Zakarjukin V.P., Kryukov A.V. Modelling of difficult damages in electric networks on the basis of phase coordinates. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2010, no. 6, pp. 46–52. (In Russian)
- Popov N.M., Petrishchev M.V. Simulation of overhead transmission lines with balancer set using phase coordinates. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skom khozyaystve* [Papers of the international scientific conference on power supply and power saving in agriculture], 2012, vol. 1, pp. 116–121. (In Russian)
- Ramirez J.M., Davalos R.J.M., Haro P.Z., Perez R.C. FACTS devices embedded into a power system in phase coordinates, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004., Denver, CO, 2004, pp. 1527–1534, vol. 2. doi: 10.1109/PES.2004.1373128
- Zakarjukin V.P., Kryukov A.V. *Modelirovanie elektromagnitnykh vliyaniy na smezhnye LEP na osnove rascheta rezhimov energosistemy v faznykh koordinatakh* [Modeling of electromagnetic influences on adjacent power lines on the basis of mode calculation in phase coordinates]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2009, 120 p.
- L. A. F. R., Iov F., Blaabjerg F., Hansen A. D. Advanced Induction Machine model in Phase Coordinates for Wind Turbine Application, 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, 2007, pp. 1189–1194. doi: 10.1109/IEMDC.2007.383599
- Lagace P. J., Vuong M. H., Al-Haddad K. A time domain model for transient simulation of synchronous machines using phase coordinates, 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Que., 2006, 6 p. doi: 10.1109/PES.2006.1709083
- Yu Ting-Chung, Marti J. R., A robust phase-coordinates frequency-dependent underground cable model (zCable) for the EMTP, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 1, pp. 189–194, Jan 2003. doi: 10.1109/TPWRD.2002.807749
- Svenda G. S., Nahman J. M., Transformer phase coordinate models extended for grounding system analysis, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 4, pp. 1023–1029, Oct 2002. doi: 10.1109/TPWRD.2002.803799
- Osak A.B. Practical methods of complex fault current computation in power grid with phase coordinates. *Tekhnicheskoe nauki - ot teorii k praktike* [Technical science – from theory to practice], 2016, no. 55, pp. 181–190. (In Russian)

Панова Е.А., Крюкова А.А. Применение метода фазных координат для моделирования линий электропередачи систем промышленного электроснабжения // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3(36). С. 29–34. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-29-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-29-34)

Panova E.A., Kryukova A.A. Application Of Phase Coordinates To An Industrial Power Supply System Overhead Transmission Lines Simulation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 29–34. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-29-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-29-34)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Прогнозирование времени нагрева сырьевой заготовки в методической печи перед прокаткой позволяет произвести формирование оптимальной энергосберегающей траектории нагрева каждой заготовки на момент загрузки в нагревательную печь. Эффективность энергосберегающего режима нагрева заготовки зависит от точности прогнозирования времени нагрева заготовки, что в условиях переменной производительности прокатного стана становится особенно актуальным. В условиях нестационарной работы прокатного стана и нагревательной печи рассматриваемый метод предусматривает коррекцию общего времени нагрева не только с учетом плановых остановок стана, но и непредсказуемых аварийных и скрытых простоев стана в пределах прогнозируемого времени нахождения заготовки в печи. В работе рассмотрено теоретическое обоснование и приведены результаты практической проверки предлагаемого метода прогнозирования и коррекции общего времени нагрева каждой заготовки. Реализация и опытная проверка метода показала, что отклонение прогнозируемого общего времени нагрева от действительного значения в диапазоне ± 4 мин составило 90,4% при изменении общего времени нагрева от 140 до 195 мин при объеме выборки 457 заготовок.

Ключевые слова: время нагрева заготовок, нагрев заготовок перед прокаткой, управление нагревом, управление перемещением заготовок, методическая печь, слежение за заготовками, прокатный стан, горячая прокатка полос.

ВВЕДЕНИЕ

Своевременная подача нагретых до заданного температурного состояния заготовок к прокатным клетям стана горячей прокатки является приоритетной задачей энергосберегающей системы автоматизированного управления тепловым режимом нагревательных печей [1].

Формирование оптимальной энергосберегающей траектории нагрева заготовки производится в момент её загрузки в нагревательную печь. Расчетная траектория нагрева заготовки является одним из параметров общей настройки листопрокатного комплекса «печи – стан» и её формирование зависит от ритмичности работы всего оборудования стана [2-6].

В условиях нестационарного режима работы прокатного стана, когда производительность стана изменяется от 200 до 1000 т/ч, а в печах одновременно нагревается несколько партий заготовок, различающихся по маркам стали, с различной начальной температурой от 20 до 700°C, реализация энергосберегающего режима нагрева не должна быть фактором повышенного риска выдачи на стан недогретых заготовок и возникновения связанных с этим негативных последствий [7].

При реализации энергосберегающего графика нагрева возможна выдача на стан недогретой заготовки. Это возможно в случае, если фактическое время нагрева выдаваемой заготовки составило меньшую величину, чем прогнозируемое время нагрева, значение которого использовалось при расчете энергосберегающей температурной траектории (изменения контролируемого температурного параметра – обычно температуры по длине рабочего пространства печи) для данной заготовки [8].

Соблюдение выполнения технологический условий нагрева металла при реализации энергосберегающего режима управления нагревом обуславливает главную приоритетность наличия достоверного и опе-

ративного (на текущий момент подачи очередной заготовки в печь) прогноза продолжительности времени нагрева и скорости продвижения этой заготовки по длине рабочего пространства нагревательной печи.

Выполнение расчета оптимальной траектории нагрева заготовки по критерию энергоэффективности производится на известном интервале времени, а вид этой траектории зависит от величины резерва времени на нагрев [9].

Как правило, для решения задачи по определению оптимальной траектории нагрева ставится и решается задача оптимального управления с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина или метода динамического программирования [10]. Постановка и решение задачи также должно обеспечивать учет динамики передачи тепла от греющей среды к поверхности нагреваемой заготовки [11, 12].

СПОСОБЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЩЕГО ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК

Существующие способы прогнозирования времени нагрева и темпа прокатки основаны на принципах последовательного измерения и сглаживания временных интервалов работы толкателей или извлекателей заготовок. Такой подход определения текущей производительности нагревательной печи проходного типа дает достаточно точные результаты и вполне приемлем в стационарных или близких к ним условиях [13]. Однако вследствие разнородного посада при изменении размеров заготовок от 1,5 до 16 мм возможно значительное изменение темпа прокатки, и в этом случае прогнозируемое время нагрева может значительно отличаться от действительного.

Наиболее точным методом определения времени нагрева заготовок является способ, основанный на расчете максимальной производительности стана при прокатке в целом для всех нагреваемых заготовок в печах с учетом плановых заготовок [14, 15].

Для определения максимально возможной производительности всего технологического комплекса рассчитываются минимально возможные интервалы времени: время прокатки каждой полосы в чистовой группе клетей, время смотки полосы в рулон на участке моталок, время между выдачей очередных заготовок на участке нагревательных печей. Максимальное время из полученных минимальных значений и будет определять прогнозируемый максимальный темп работы всего технологического комплекса для каждой конкретной заготовки, нагреваемой в печах перед загрузаемой в печь. Как правило, это время соответствует времени прокатки полосы в чистовой группе клетей стана.

При непрерывной работе стана прогнозируемое время нагрева $T_H^P(i)$ для каждой загрузаемой заготовки определяется как сумма времени прокатки в чистовой группе клетей стана всех заготовок, которые планируется выдать из нагревательной печи в прокатку перед этой заготовкой, т.е. время нагрева можно определить

$$T_H^P(i) = \sum_{i=1}^{q-1} \tau_{BC}(i), \quad (1)$$

где q – число слябовых заготовок, нагреваемых в печах стана; $\tau_{BC}(i)$ – время прокатки i -го сляба в чистовой группе клетей стана.

При таком способе прогнозирования времени нагрева $T_H^P(i)$ учитываются и продолжительности всех текущих плановых остановок стана на перевалку и ремонт в соответствии с выражением

$$T_H^P(i) = \sum_{i=1}^{q-1} \tau_{BC}(i) + \sum_{p=1}^G \tau_P^{SP}(i), \quad (2)$$

где G – число плановых остановок стана за прогнозируемое время нагрева i -й заготовки; p – номер плановой остановки; $\tau_P^{SP}(i)$ – продолжительность плановой остановки при нагреве i -го сляба.

После выдачи из печи очередной нагреваемой заготовки остальные должны переместиться на расстояние, занимаемое этой заготовкой. Путь S_i , пройденный заготовками в печи за время прокатки одной заготовки с учетом числа рядов заготовок во всех работающих печах K_F , составит

$$S_i = \frac{(B_i + r)}{K_F}. \quad (3)$$

Скорость перемещения заготовок в нагревательной печи соответственно будет равна

$$v(i) = \frac{(B_i + r)}{K_F \cdot \tau_{BC}(i)}. \quad (4)$$

Функция (4) представляет собой ломанную линию, каждый участок которой будет определяться сортаментом нагреваемого металла. Число участков равно количеству партий, одновременно находящихся в печи, а их длина будет зависеть от количества одинаковых заготовок в каждой партии металла.

При фиксированной длине каждой отапливаемой

зоны $L_{F,M}$ можно рассчитать прогнозируемое время $\tau_{i,M}$ пребывания каждой заготовки в этой зоне.

$$\tau_{i,M} = \frac{L_{F,M}}{v(i)}, \quad M \in (1;10), \quad (5)$$

где M – номер отапливаемой зоны в 10-ти зонной методической печи.

Метод расчета $T_H^P(i)$ в соответствии с (2) позволяет достаточно точно определить искомую величину при отсутствии при отсутствии случайных аварийных простоев стана и постоянной величине коэффициента использования стана.

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ПРОГНОЗИРУЕМОГО ЗНАЧЕНИЯ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ЗАГОТОВКИ

Коэффициент использования стана K_{RM} количественно характеризует величину скрытых простоев стана и в реальных условиях изменяется в диапазоне 0,87–0,95. Косвенным показателем наличия скрытых простоев, вызванных неритмичной работой стана, может служить частотное распределение времени пауз между прокаткой очередных полос. Исследования, проведенные на стане 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», показали, что при регламентируемой продолжительности паузы, равной 5 с, принятой в прогнозирующих расчетах, действительное значение этого параметра представлено частотным распределением (рис. 1).

Наличие непрогнозируемых аварийных простоев стана, вызванных непредсказуемой случайной поломкой технологического оборудования или отказом системы управления станом, является наиболее значимым источником ошибки при прогнозировании общего времени нагрева заготовки.

Поэтому для повышения точности прогноза времени нагрева заготовки в момент её посадки в нагревательную печь предлагается через определённый выбранный интервал времени $\Delta t_s = 10\text{--}15$ мин корректировать прогнозируемое время нагрева путем учета текущего значения K_{RM} и продолжительности текущего аварийного простоя.

Блок-схема предложенного алгоритма прогнозирования времени нагрева заготовок на момент посадки и коррекции прогнозируемого времени нагрева $T_H^P(i)$ представлена на рис. 2.

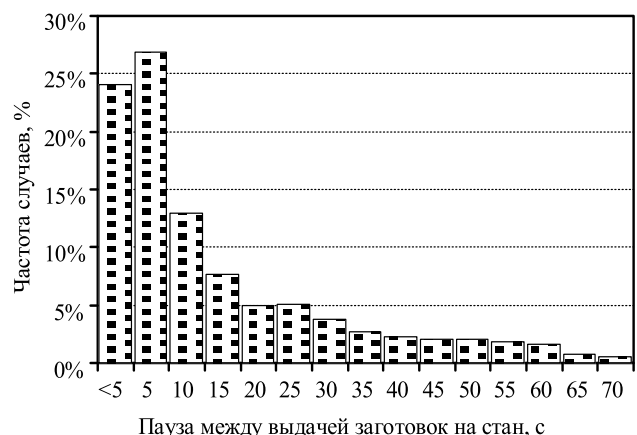


Рис. 1. Время паузы между выдачей заготовок на стан с участка нагрева

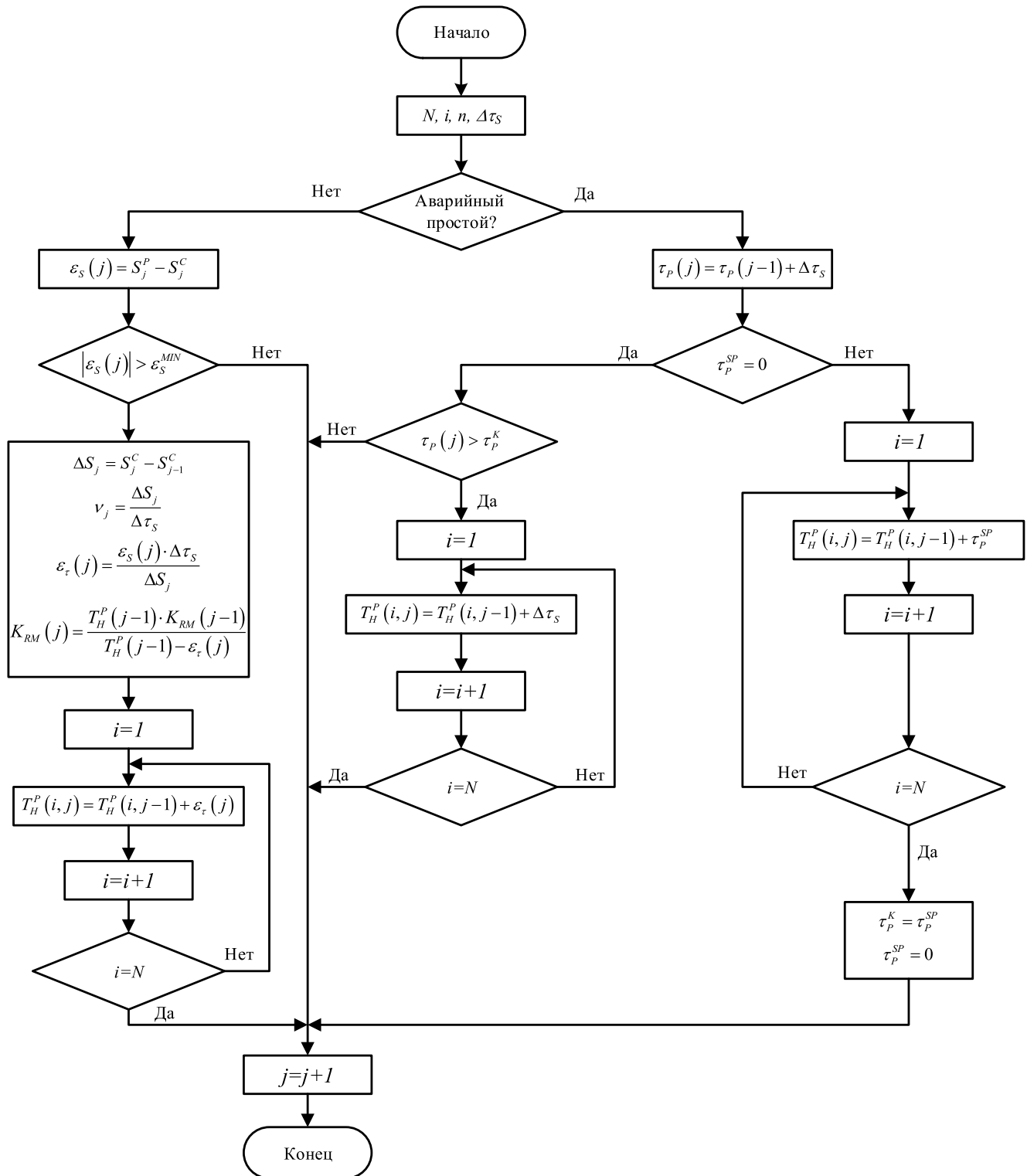


Рис. 2. Блок-схема алгоритма прогнозирования времени нагрева заготовок в проходной нагревательной печи с коррекцией по аварийным простоям и переменной производительности стана

Левая по схеме рис. 2 часть алгоритм обеспечивает коррекцию $T_H^P(i)$ за счет слежения за текущим значением K_{RM} следующим образом. Периодически контролируется рассогласование между текущим положением заготовки S_j^C по длине печи и прогнозируемым положением S_j^P на j -м шаге коррекции путем вычисления ошибки прогноза положения заготовки $\varepsilon_S(j)$.

$$\varepsilon_S(j) = S_j^P - S_j^C. \quad (6)$$

Если полученная ошибка $\varepsilon_S(j)$ лежит в зоне допустимой погрешности ε_S^{MIN} , равной длине одного шага подвижных балок 450 мм, то коррекция $T_H^P(i)$ на j -м шаге не производится. Если $|\varepsilon_S(j)| > \varepsilon_S^{MIN}$, то вычисляемый путь ΔS_j , пройденный заготовкой за время $\Delta \tau_S$, равное интервалу времени между двумя циклами коррекции, определяется в соответствии с выражением

$$\Delta S_j = S_j^C - S_{(j-1)}^C, \quad (7)$$

где S_{j-1}^C – положение заготовки на предыдущем цикле коррекции.

Затем определяется средняя скорость перемещения заготовки v_j за время $\Delta\tau_s$

$$v_i = \frac{\Delta S_j}{\Delta\tau_s}, \text{ при } \Delta\tau_s = \text{const.} \quad (8)$$

Коррекция общего времени нагрева $T_H^P(i)$ на j -м шаге коррекции $\varepsilon_\tau(j)$ определяется с учетом допущения, что расстояние равно $\varepsilon_s(j)$, заготовка проходит со средней скоростью v_j , т.е. коррекция времени определяется следующим образом:

$$\varepsilon_\tau(j) = \frac{\varepsilon_s(i)}{v_j} = \frac{\varepsilon_j \cdot \Delta\tau_s}{\Delta S_j}. \quad (9)$$

Величина прогнозируемого времени нагрева каждой i -й заготовки на j -м шаге коррекции величины $T_H^P(i)$ будет равна

$$T_H^P(i, j) = T_H^P(i, j-1) \pm \varepsilon_\tau(j). \quad (10)$$

Величину коррекции прогнозируемого времени нагрева $\varepsilon_\tau(j)$ для i -й заготовки на j -м шаге коррекции можно выразить через коэффициент использования стана K_{RM}

$$\varepsilon_\tau(j) = T_H^P(i, j-1) \cdot \left(1 - \frac{K_{RM}(j-1)}{K_{RM}(j)} \right), \quad (11)$$

где $K_{RM}(j-1)$, $K_{RM}(j)$ – соответственно коэффициенты использования стана на предыдущем и текущем шаге коррекции.

Правая по схеме (см. **рис. 2**) часть алгоритма коррекции $T_H^P(i)$ учитывает случайные и аварийные простои. Коррекция прогнозируемого времени осуществляется двумя способами. Первый способ обеспечивает коррекцию $T_H^P(i)$ в случае, когда время аварийного простоя известно и задается в виде τ_P^{SP} . В этом случае прогнозируемое время для всех заготовок на j -м шаге коррекции определится в соответствии с выражением

$$T_H^P(i, j) = T_H^P(i, j-1) + \tau_P^{SP}. \quad (12)$$

Второй вариант коррекции времени нагрева используется, если время аварийного простоя неизвестно, т.е. $\tau_P^{SP} = 0$. В этом случае прогнозируемое время нагрева для всех заготовок автоматически на каждом шаге коррекции увеличивается на $\Delta\tau_s$

$$T_H^P(i, j) = T_H^P(i, j-1) + \Delta\tau_s. \quad (13)$$

Одновременно определяется общее время аварийного простоя стана в соответствии с выражением

$$\tau_P(j) = \tau_P(j-1) + \Delta\tau_s, \quad (14)$$

где $\tau_P(j)$, $\tau_P(j-1)$ соответственно текущее время аварийного простоя и время простоя на предыдущем шаге (цикле) коррекции.

В последующих циклах коррекции осуществляется контроль соответствия текущего времени аварийного

простоя $\tau_P(j)$ и заданной продолжительности аварийного простоя τ_P^{SP} . Для этого осуществляется проверка условия, что прогнозируемое время нагрева было увеличено на заданное время аварийного простоя в предыдущем цикле коррекции и время коррекции ($\tau_P^K = \tau_P^{SP}$) еще больше, чем время текущего простоя. Если $\tau_P(j) > \tau_P^K$, то дальнейшее увеличение прогнозируемого времени нагрева для всех заготовок будет происходить автоматически в каждом шаговом цикле коррекции на величину $\Delta\tau_s$.

Алгоритм коррекции прогнозируемого времени нагрева функционирует непрерывно и одновременно с алгоритмом предварительного прогнозирования общего времени нагрева с момента подачи заготовки в нагревательную печь до момента выдачи заготовки на стан.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АЛГОРИТМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА

С целью определения погрешности предложенного метода прогнозирования общего времени нагрева на момент загрузки заготовки в печь на стане 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» проведено специальное исследование по определению отклонения прогнозируемого времени нагрева T_H^P от действительного T_H^C (фактического) для 457 заготовок.

Значительная часть (55%) нагреваемых заготовок в анализируемый период работы стана попала под одну переделку. Часть заготовок (45%) нагревалась в печах без остановок стана. Частотное распределение отклонений фактического времени нагрева от прогнозируемого $\Delta T = T_H^C - T_H^P$ в процессе проведения экспериментального исследования представлено на **рис. 3**.

Практически все (97,4%) величины отклонений находятся в диапазоне ± 12 мин, т.е. в пределах принятого цикла коррекции. Из них 90,4% отклонений находятся в диапазоне ± 4 мин. Общая ошибка прогноза при изменении общего времени нагрева от 140 до 195 мин за период проведения эксперимента составила 2,5%. Такая точность прогноза на момент подачи заготовки в нагревательную печь вполне достижима для достоверного оперативного прогноза общего времени нагрева заготовки при расчете энергосберегающей температурной траектории нагрева для обеспечения гарантированного нагрева заготовок.

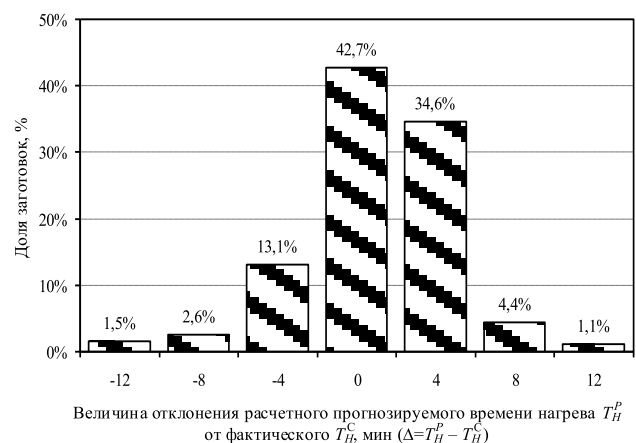


Рис. 3. Частотное распределение отклонений расчетного времени нагрева от фактического (для 457 заготовок)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод прогноза и коррекции времени нагрева заготовок на момент их загрузки в нагревательную печь обладает достаточной для практического применения точностью. Учет аварийных и скрытых простоев прокатного стана позволяет оперативно корректировать прогнозируемое время нагрева и соответственно производить коррекцию траектории нагрева заготовок. Прогнозирование времени нагрева позволяет решить проблему расчета энергосберегающего управления нагревом заготовок перед прокаткой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С.М., Парсункин Б.Н., Ахметов У.Б. Разработка и исследование работы системы энергосберегающего управления нагревом заготовок в методических печах листопрокатных станов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 122–128.
2. Генкин А.Л., Куделин А.Р. Проблемы энергосберегающего управления листопрокатным комплексом. Ч.1. // Проблемы управления. 2006. № 6. С. 50–54.
3. Управление технологическим комплексом «ПЕЧЬ-СТАН» при горячей прокатке стальных полос / Р.Л. Шаталов, А.Л. Генкин, Т.А. Койнов, Е.Ю. Верхов, С.А. Бражников // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология: труды VII международной научно-практической конференции; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». М., 2014. С. 449–457.
4. Шаталов Р.Л., Генкин А.Л. Энергосберегающее управление как фактор интенсификации производства горячекатаных стальных полос // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии / I Международная научно-техническая конференция, Череповец, 2013. С. 406–412.
5. Генкин А.Л. Энергосберегающее управление листопрокатным комплексом «Печи-Стан» // Сталь. 2011. № 3. С. 34–40.
6. Генкин А. Л. Энергосберегающее управление современным листопрокатным производством // Производство проката. 2008. № 7. С. 38–43.
7. Маковский В.А., Лаврентик Н.Н. Алгоритм управления нагревательными печами. М.: Металлургиздат, 1977. 184 с.
8. Автоматизированная система управления топливосберегающим несимметричным нагревом непрерывнолитых заготовок перед прокаткой / Андреев С.М., Ахметов Т.У., Нужин Д.В., Парсункин Б.Н. // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №3(32). С. 60–65.
9. Оптимальные топливосберегающие режимы нагрева непрерывнолитых заготовок в методических печах / Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Жадинский Д.Ю., Ахметова А.У. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 89–96.
10. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983. 393 с.
11. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Akhmetov, T.U. Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer London, vol. 79, iss. 9–12, 2015, pp. 1797–1803.
12. Lee D. E., Kim M. Y. Optimum residence time for steel productivity and energy saving in a hot rolled reheating furnace // Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 27, iss. 9, pp. 2869–2877.
13. Автоматизация методических печей / Л.И. Буглак, И.Б. Вольфман, С.Ю. Ефроймович, Г.К. Захаров, М.Д. Климовицкий, А.М. Сегаль. М.: Металлургия, 1981. 196 с.
14. Зуев Е.С., Парсункин Б.Н., Фомичев А.В. Прогнозирование времени прокатки слэбов на широкополосном стане горячей прокатки // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2011. №1–1. С. 119–125.
15. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режимов управления нагревом в печах проходного типа: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 375 с.

Поступила в редакцию 31 июля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CONTINUOUS-CAST BILLET HEATING TIME FORECAST IN THE CONTEXT OF NON-STATIONARY RUN OF A CONTINUOUS FURNACE

Sergey M. Andreev

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The forecasting of slab billet heating time in a continuous furnace before rolling enables forming of an optimal power saving heating path of each billet at the moment of its charge into the furnace. The optimal heating mode efficiency depends on the accuracy of the slab heating time forecasting, which is especially urgent amidst rolling mill variable performance. In the context of non-stationary run of a rolling mill and continuous furnace, the involved method provides for the improvement of the heating time not only subject to mill planned shutdown but also taking into account unpredictable emergency and undetected standing time within forecasting billet occurrence in the furnace. The paper gives theoretical and experimental justification of the suggested method of forecasting and improvement of each slab total heating time. Implementation and experimental check of the method revealed that the deviation of the total forecast heating time in the 4 min range is 90.4 % with the variation of the total heating time from 140 to 195 min and 457 slab sample volume.

Keywords: Continuous-cast heating time, slab billet heating

before rolling, heating control, billet movement control, continuous furnace, slab billet detection, rolling mill, hot rolling.

REFERENCES

1. Andreev S.M., Parsunkin B.N., Akhmetov U.B. Development and research of the system of energy-saving control of billet heating in methodical furnaces of sheet rolling mills. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1, pp. 122–128. (In Russian)
2. Genkin A.L., Kudelin A.R. Problems of Energy-saving Control of Sheet Mill. Part 1. *Problemy upravleniya* [Control sciences], 2006, no.6, pp. 50–54. (In Russian)
3. Shatalov R.L., Genkin A.L., Kojnov T.A., Verhov E.Ju., Brazhnikov S.A. The technological complex control "FURNACES-STAN" in the hot rolling of steel strips. *Jenergoberegajushhie tehnologii v promyshlennosti. Pechnye agregaty. Jekologija Trudy VII mezhdunarodnoj nauchno-*

- prakticheskoy konferencii. Nacional'nyj issledovatel'skij tehnologicheskij universitet «MISIS»*. [Energy-saving technologies in industry. Oven aggregates. Ecology Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference. National Research Technological University "MISIS"], Moscow, 2014, pp. 440–457. (In Russian)
4. Shatalov R.L., Genkin A.L. Energy-saving control as a factor of intensification of production of hot-rolled steel strips. *Nauchno-tehnicheskij progress v chjornoj metallurgii. I Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija*. [Scientific and technical progress in ferrous metallurgy. I International scientific and technical conference.], Cherepovets, 2013, pp. 406–412. (In Russian)
 5. Genkin A.L. Energy-efficient control of the sheet-rolling complex "Furnaces-Rolling Mill". *Stal* [Steel], 2011, no. 3, pp. 34–40. (In Russian)
 6. Genkin A.L. Energy-saving control of modern sheet rolling production. *Proizvodstvo Prokata* [Rolled Products Manufacturing], 2008, no. 7, pp. 38–43. (In Russian)
 7. Makovskiy V.A., Lavrentik N.N. *Algoritm upravleniya nagrevatel'nyimi pechami* [The control algorithm heating furnaces], Moscow, Metallurgizdat, 1977. 184 p.
 8. Andreev S.M., Akhmetov T.U., Nuzhin D.V., Parsunkin B.N. Automated control system of fuel saving in asymmetric heating of continuous cast billets before rolling. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2016, no. 3(32), pp. 60–65. (In Russian)
 9. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinsky D.Yu., Akhmetova A.U. Optimal fuel-efficient modes of heating continuously cast billets in continuous reheating furnaces. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 89–96. (In Russian)
 10. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gapkrelidze R.V. *Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov* [The mathematical theory of optimal processes]. Moscow, Nauka, 1969, 393 p.
 11. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Akhmetov T.U. Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer London, vol. 79, iss. 9–12, 2015, pp. 1797–1803
 12. Lee D.E., Kim M.Y. Optimum residence time for steel productivity and energy saving in a hot rolled reheating furnace. *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27, iss. 9, pp. 2869–2877.
 13. Buglak L.I., Vol'fman I.B., Efrogmovich S.Ju., Zaharov G.K., Klimovickij M.D., Segal' A.M. *Avtomatizacija metodicheskikh pechej* [Automation of continuous furnaces]. Moscow, Metallurgija, 1981. 196 p.
 14. Zuev E.S., Parsunkin B.N., Fomichev A.V. Forecasting of rolling time of slabs on a wide-strip hot rolling mill. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsial'noy sferakh* [Software of system in the industrial and social fields], 2011, no. 1–1, pp. 119–125.
 15. Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Optimizatsiya rezhimov upravleniya nagrevom v pechakh prokhodnogo tipa: monografiya* [Optimization of control modes heating furnaces transmission type], Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. 375 p.

Андреев С.М. Прогнозирование времени нагрева заготовок в условиях нестационарного режима работы методических печей // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 3(36). С. 35–40. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-35-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-35-40)

Andreev S.M. Continuous-Cast Billet Heating Time Forecast In The Context Of Non-Stationary Run Of A Continuous Furnace. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 35–40. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-35-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-35-40)

Васильев А.Е.¹, Михайлец В.Ф.¹, Сарваров А.С.¹, Даниленко К.В.²¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова² ОАО «НПО Андроидная техника»

ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕМАТИКИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ ГРУППЫ ЗВЕНЬЕВ АНТРОПОМОРФНОГО ЗАХВАТА С ГРУППОВЫМ ПРИВОДОМ

Для современного этапа развития антропоморфной техники характерным является продвижение её из производственной сферы в социальную. Особое место при этом занимают антропоморфные роботы, способные не только взаимодействовать с человеком, но и заменить его действия в неблагоприятных условиях. Структура, аналогичная скелету человека, позволяет реализовать аналогичную кинематику и легче адаптировать их в среду жизнедеятельности людей.

Основные функциональные действия выполняются, как известно, захватом. В большинстве конструкций роботов используются антропоморфные захваты. Их создание предполагает максимальное совпадение числа степеней подвижности с аналогичным параметром, присущим кисти. Однако реализация всех подвижностей с требуемыми силовыми характеристиками захвата при использовании современных приводов представляется сложной задачей. Рассмотрен вариант применения группового привода, реализующего движения звеньев в кинематических парах с параллельными осями вращения. Проведены аналитические исследования механизма группового привода в двух исполнительных группах звеньев, реализующих движение в одной группе отдельно большого пальца и в другой одновременное движение остальных пальцев. Для кинематического анализа были составлены выражения геометрических связей в векторной форме и затем получена система скалярных уравнений. Решение систем найдено численно с помощью математического пакета MathCad. По результатам построены графики изменения углов от хода ползуна, планы положений и траекторий узловых точек механизмов и определены их угловые скорости. Полученные планы скоростей позволили получить допустимые нагрузки на исполнительную группу звеньев. Изложенная последовательность аналитического исследования позволяет проводить кинематический и силовой анализ на стадии проектирования.

Ключевые слова: антропоморфный захват, исполнительная группа звеньев, групповой привод кинематический и силовой анализ, привод, поступательной пары, усилие захвата.

ВВЕДЕНИЕ

Для современного этапа развития антропоморфной техники характерным является её активное продвижение в социальную сферу. В частности, неуклонно увеличивается число роботов, используемых вне производственной сферы [1–4]. Особое место при этом занимают антропоморфные роботы, способные не только взаимодействовать с человеком, но и заменить его действия в неблагоприятных условиях [5–9]. Структура, аналогичная скелету человека, позволяет реализовать подобную кинематику.

Основные функциональные действия выполняются захватом. В большинстве конструкций роботов используются антропоморфные захваты [10–13]. Создание антропоморфных захватов предполагает максимальное совпадение числа степеней подвижности с аналогичным параметром, присущим кисти. Однако реализация всех подвижностей с использованием современных приводов пока невозможна. Каждый палец имеет 4 независимых подвижности.

Создание захвата с 20 и более независимыми степенями подвижности – достаточно сложная задача. Размещение приводов в основании захвата возможно только при небольших мощностях приводов. При этом силовые характеристики захвата не удовлетворяют исходным требованиям. Вынесение силовой части приводов на предшествующее звено манипулятора [14] ведет к существенному усложнению конструкции и увеличению массы манипулятора.

Компромиссным вариантом является использование группового привода, реализующего движения звеньев в кинематических парах с параллельными осями вращения [15–18]. В этом случае движение в каждой исполнительной группе звеньев (ИГЗ) обеспечивается

двумя приводами. Одним из возможных вариантов является схема, основанная на использовании рычажной схемы передачи движения.

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ИГЗ АНТРОПОМОРФНОГО ЗАХВАТА

Кинематическая схема ИГЗ, аналогичных пальцу, показана на **рис. 1**. Механизм пальца состоит из последовательно соединенных при помощи коромысел МОСД и КСВ трех групп Ассур четвертого класса: 1 – шарнирного четырехзвенника RQMO с поступательным движением двухповодковой группы Ассур; 2 – антипараллелограмма OABC и 3 – антипараллелограмма CDEK.

Кинематическая схема ИГЗ большого пальца показана на **рис. 2**. Механизм большого пальца состоит из параллельно соединенных при помощи коромысла AO₁O₃ и стойки O₁O₂ двух групп Ассур четвертого класса: 1 – шарнирного четырехзвенника O₁O₂MO₃ с поступательным движением двухповодковой группы Ассур и 2 – антипараллелограмма O₁O₂MA.

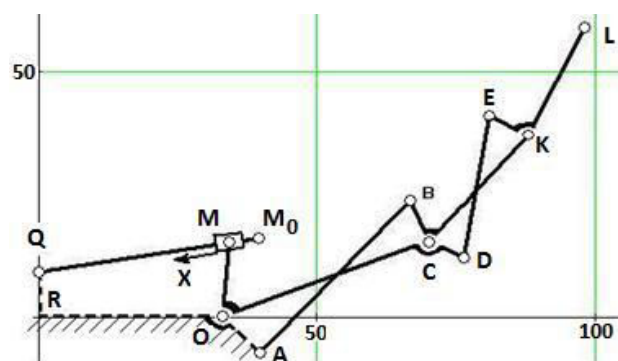
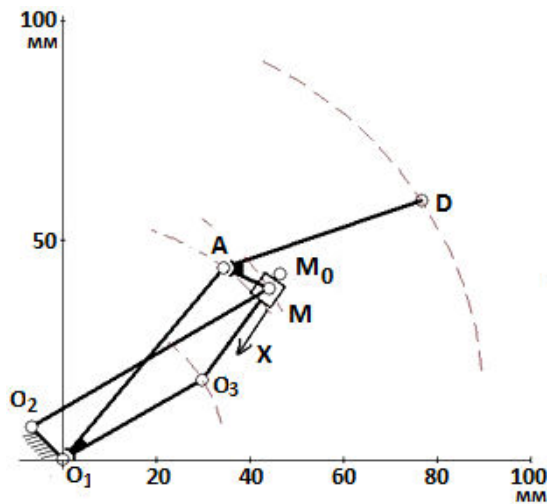


Рис. 1. Кинематическая схема ИГЗ
I с групповым приводом



**Рис. 2. Кинематическая схема ИГЗ
II аналога большого пальца**

Разработка конструкции группового привода предполагает предварительный силовой анализ механизма. Исследование может выполняться графическим или аналитическим способом. Каждый из способов имеет свои положительные аспекты. В отличие от работы [19] предшествующий кинематический анализ выполняется на основе аналитических зависимостей, связывающих изменение координат. На первом этапе определяется функциональная зависимость углов относительно поворота звеньев φ_i от перемещения ползуна.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для кинематического анализа по схемам механизмов (см. **рис. 1, 2**) были составлены выражения геометрических связей в векторной форме [20, 21, 23, 26].

$$\begin{aligned} R_{RM}(t) &= R_{QR}(t) + \rho_{QM}(t) - R_{OR}(t) - \rho_{OM}(t) \\ R_{RE}(t) &= \rho_{OC}(t) + \rho_{EC}(t) - \rho_{OA}(t) - \rho_{AB}(t) \\ R_{RE}(t) &= \rho_{CK}(t) + \rho_{KE}(t) - \rho_{CD}(t) - \rho_{DE}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Для механизма большого пальца получаем два векторных уравнения:

$$\begin{aligned} R_M(t) &= R_{O_2}(t) + \rho_{O_2M}(t) - \rho_{AM}(t) - R_A(t) \\ R_{Mb}(t) &= R_A(t) - \rho_{O_2M}(t) - R_{O_2}(t) + \rho_{AM}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Из трех векторных уравнений (1) получаем систему шести скалярных уравнений.

$$\begin{aligned}
& OM \cdot \sin(\psi_1) + QM(t) \cdot \cos(\psi_0) = OR \\
& -OM \cdot \cos(\psi_1) + QM(t) \cdot \sin(\psi_0) = -QR \\
& AB \cdot \cos(\psi_3) + BC \cdot \sin(\psi_4) + \\
& + OC \cdot \sin(\psi_1 - \beta_2) = OA \cdot \cos(\beta_1) \\
& OC \cdot \cos(\psi_1 - \beta_2) - AB \cdot \sin(\psi_3) + \\
& + BC \cdot \cos(\psi_4) = -OA \cdot \sin(\beta_1) \\
& -CK \cdot \sin(\psi_4 - \beta_4) - CD \cdot \sin(\psi_1 - \beta_2 + \beta_3) - \\
& - DE \cdot \cos(\psi_6) - KE \cdot \sin(\psi_7) = 0 \\
& CK \cdot \cos(\psi_4 - \beta_4) + CD \cdot \cos(\psi_1 - \beta_2 + \beta_3) - \\
& - DE \cdot \sin(\psi_6) + KE \cdot \cos(\psi_7) = 0
\end{aligned}
\tag{3}$$

где Ψ_i – искомые углы положений звеньев механизма; β_j – углы между рычагами коромысел, имеют постоянные значения, зависящие от конструкции механизма.

Направление каждого радиуса-вектора R_i , соответствующего i -му звену механизма пальца, задавалось углом φ_i , отсчитываемым от положительного направления оси x_i . Но в силу того, что фактические значения координат φ_i изменялись в диапазоне $0 < \varphi_i < \pi$, а используемый математический пакет (MathCad) некорректно оперирует с углами более $\pi/2$, то угол φ_i представлен суммой $\varphi_i = \Psi_i + \pi/2$, где Ψ_i – угол, связанный с φ_i и принимающий значения в диапазоне $(-\pi/2 < \Psi_i < +\pi/2)$.

$$\begin{aligned}\varphi_0(t) &= \psi_0, \varphi_1(t) = \frac{\pi}{2} + \psi_1, \\ \varphi_3(t) &= \psi_3, \varphi_4(t) = \frac{\pi}{2} + \psi_4 \\ \varphi_5(t) &= \frac{\pi}{2} + \psi_4 - \beta_4, \varphi_6(t) = \psi_6, \\ \varphi_7(t) &= \frac{\pi}{2} + \psi_7\end{aligned}$$

Векторы, образующие перечисленные выше углы φ_i , Ψ_i и β_i механизма пальца (см. **рис. 1**), сведены в **табл. 1**.

Из двух векторных уравнений (2) получаем систему четырех скалярных уравнений геометрических связей механизма большого пальца:

$$\begin{aligned} & O2M \cdot \cos(\varphi_{10}) - O1A \cdot \cos(\varphi_9) - AM \cdot \cos(\beta_9 - \varphi_{12}) - \\ & - O1O2 \cdot \sin(\beta_6) = 0 \\ & AM \cdot \sin(\beta_9 - \varphi_{12}) - O1A \cdot \sin(\varphi_9) + O2M \cdot \sin(\varphi_{10}) - \\ & - O1O2 \cdot \cos(\beta_6) = 0 \\ & AM \cdot \cos(\beta_9 - \varphi_{12}) - O1O3 \cdot \cos(\varphi_9 - \beta_7) - \\ & - O3M(t) \cdot \cos(\varphi_{11}) + O1A \cdot \cos(\varphi_9) = 0 \\ & O1A \cdot \sin(\varphi_9) - O1O3 \cdot \sin(\varphi_9 - \beta_7) - \\ & - O3M(t) \cdot \sin(\varphi_{11}) - AM \cdot \sin(\beta_9 - \varphi_{12}) = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где φ_i – искомые углы положений звеньев механизма; β_j – углы между рычагами коромысел, имеют постоянные значения, зависящие от конструкции механизма.

Векторы, образующие углы φ_i и β_i механизма большого пальца (см. **рис. 2**), сведены в **табл. 2**.

Таблица 1

Описание векторов, использованных при разработке модели пальца

Векторы, образующие угол	Наименование угла
$0\mathbf{X}^{\wedge}\mathbf{QM}$	$\varphi_0 = \Psi_0$
$0\mathbf{X}^{\wedge}\mathbf{OM}$	φ_1
$0\mathbf{X}^{\wedge}\mathbf{AB}$	$\varphi_3 = \Psi_3$
$0\mathbf{X}^{\wedge}\mathbf{CB}$	φ_4
$0\mathbf{X}^{\wedge}\mathbf{CK}$	φ_5
$0\mathbf{X}^{\wedge}\mathbf{DE}$	$\varphi_6 = \Psi_6$
$0\mathbf{X}^{\wedge}\mathbf{KE}$	φ_7
$0\mathbf{Y}^{\wedge}\mathbf{OM}$	Ψ_1
$0\mathbf{Y}^{\wedge}\mathbf{CB}$	Ψ_4
$0\mathbf{Y}^{\wedge}\mathbf{KE}$	Ψ_7
$0\mathbf{R}^{\wedge}\mathbf{OA}$	β_1
$0\mathbf{M}^{\wedge}\mathbf{OC}$	β_2
$0\mathbf{O}^{\wedge}\mathbf{CD}$	β_3
$0\mathbf{C}^{\wedge}\mathbf{CK}$	β_4

Таблица 2

Описание векторов, использованных
при разработке модели большого пальца

Векторы, образующие угол	Наименование угла
$01X^{\wedge}01A$	φ_9
$01X^{\wedge}02M$	φ_{10}
$01X^{\wedge}03M$	φ_{11}
$01X^{\wedge}AD$	φ_{12}
$01X^{\wedge}01O2$	β_6
$01O3^{\wedge}01A$	β_7
$AM^{\wedge}AD$	β_9

Уравнения систем (3) и (4) являются трансцендентными, содержат искомые углы положений звеньев Ψ_i и φ_i и аналитического решения не имеют. Решение систем (3) и (4) было найдено численно с помощью математического пакета MathCad [24–26]. По результатам решения построены графики изменения углов Ψ_i и φ_i в зависимости от хода ползуна М вдоль обобщенной координаты Х. Для визуализации решения в MathCad были построены планы положений и траектории узловых точек механизмов (рис. 3 и 4). Полный ход ползуна М: для ИГЗ I – 16 мм; для ИГЗ II – 8 мм.

Для определения угловых скоростей механизмов пальцев системы уравнений (3) и (4) были продифференцированы. Полученные системы относительно угловых скоростей решены в MathCad аналитически. По векторным выражениям были найдены и определены абсолютные скорости узловых точек ИГЗ. Векторы скоростей с учетом направлений и их модулей показаны на планах положений механизмов (см. рис. 3 и 4).

Изменение модулей линейных скоростей показано на рис. 5 и 6 при постоянной относительной скорости ползуна, равной единице ($V_M = 1$).

Проекция ИГЗ II в плоскость движения других четырех ИГЗ I показана на рис. 7.

При $V_M = 1$ графики линейных скоростей становятся графиками аналогов скоростей и по ним можно определить передаточное отношение механизмов ИГЗ в любом его положении. Из условия равенства мощностей можно определить соотношение между внешними силами, действующими на звенья ИГЗ, и силой, приложенной к ползуну.

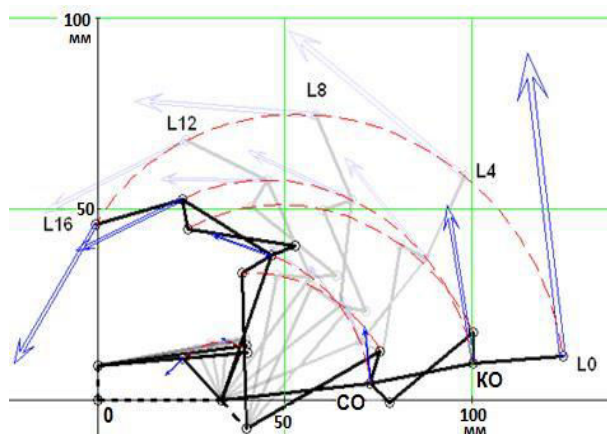


Рис. 3. Планы положений механизма ИГЗ I

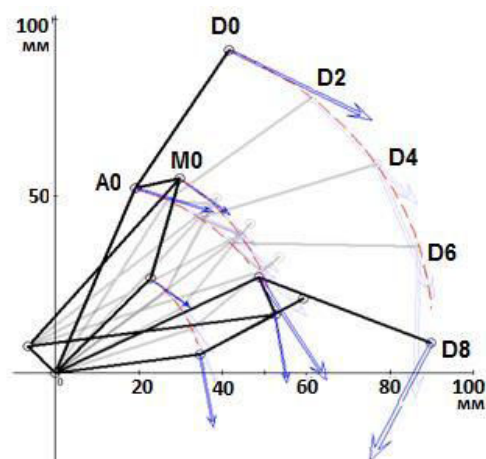


Рис. 4. Планы положений механизма ИГЗ II

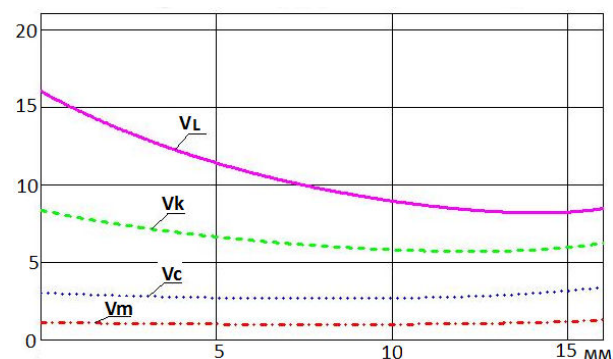
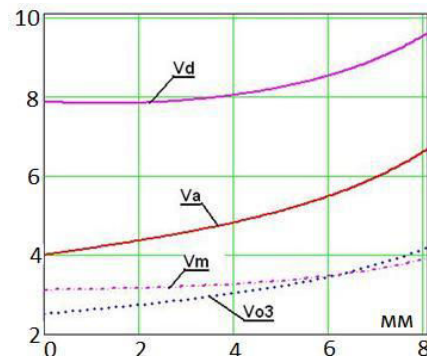
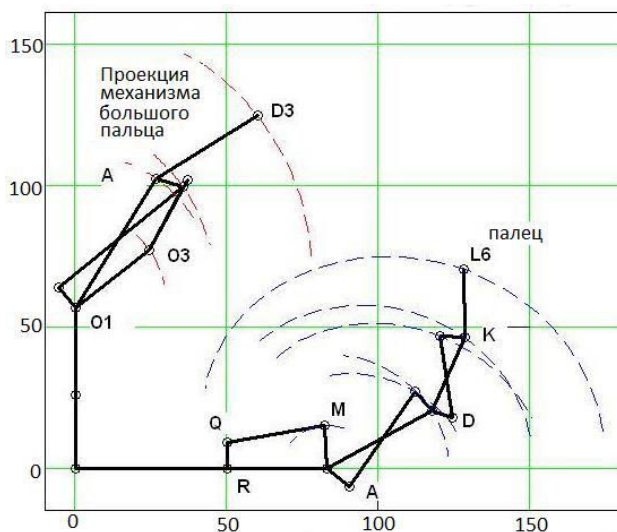
Рис. 5. Модули абсолютных скоростей узлов М, С, К и L ИГЗ I за полный ход ползуна М при $V_M = 1$ Рис. 6. Модули абсолютных скоростей узлов М, O₃, А и D ИГЗ II за полный ход ползуна М при $V_M = 1$ 

Рис. 7. План положения механизмов ИГЗ на кисти и траектории некоторых точек

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По графику на **рис. 5** аналог скорости точки L на конце пальца равен 16 в начальном (выпрямленном) положении и в конечном (согнутом) – 8. Тогда передаточное отношение будет в начальном $U_L(X=0) = 1/V_L(0) = 1/16$ и в конечном $U_L(X=16) = 1/V_L(16) = 1/8$. Это значит, что осевое усилие на винте привода механизма (звено QM, см. **рис. 1**) будет в 16 раз больше усилия на конце пальца (точка L) в начальном его положении по касательной к траектории точки.

Соответственно наиболее нагруженным узлом является винт шарико-винтовой передачи. Одним из вариантов реализации привода поступательной пары M является шарико-винтовая передача [21]. В этом случае может быть использован электропривод.

Полученные планы скоростей позволяют определить допустимые нагрузки на ИГЗ при параметрах шарико-винтовой передачи, принятых из соображений компактности конструкций, и диаметре по впадинам $d=3\text{мм}$ допускаемым нормальным напряжением $[\sigma]=200\text{МПа}$. Величина σ выбрана равной 50% от предела прочности материала винта с учетом того, что винт не является сплошным цилиндром и нагрузка на винт не строго осевая), предельное (допускаемое) усилие растяжения винта $[N]$ определится из выражения

$$[N] \leq \frac{[\sigma]\pi d^2}{4} = \frac{200 \cdot 3.14 \cdot 3^2}{4} = 1413 \text{ Н.} \quad (5)$$

Тогда на конце пальца можно приложить усилие в 16 раз меньше $[P] < [N] / V_L(0) = 1413 / 16 = 88 \text{ Н}$.

Изложенная последовательность аналитического исследования рычажного механизма ИГЗ позволяет проводить кинематический и силовой анализ на стадии проектирования электропривода антропоморфного захвата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Marchal-Crespo L., Reinkensmeyer D.J. Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury // J of NeuroEng Rehab. 2009. Vol. 6. P. 1–20.
- Wolbrecht E.T., Chan V., Reinkensmeyer D., Bobrow J.E. Optimizing compliant, model-based robotic assistance to promote neurorehabilitation. IEEE Trans on Neur Syst and Rehab Eng. 2008. V. 16(3). P. 286–297.
- Сорокин В.Г., Сохин И.Г. Возможные области применения антропоморфных роботов-помощников экипажей в отсеках перспективных космических комплексов // Пилотируемые полеты в космос. 2015. № 4 (17). С. 71–79.
- Падалка Г.И., Долгов П.П., Алтунин А.А. Подход к построению робототехнических систем для работы в космосе // Пилотируемые полеты в космос. 2013. № 4 (9). С. 92–94.
- Захват манипулятора для работы в экстремальных условиях / Богданов А.А., Пермяков А.Ф., Канаева Е.И., Кутлубаев И.М. // Решетневские чтения: материалы XV междунар. науч. конф.: в 2 ч.; под общ.ред. Ю.Ю.Логинова; Сиб. гос. ун-т. Красноярск, 2011. Ч.1. С. 218.
- Создание и исследование робототехнической системы с интерактивным управлением / Богданов А.А., Сычков В.Б., Жиденко И.Т., Кутлубаев И.М. // Решетневские чтения. 2012. Т. 1. № 16. С. 230–231.
- Жиденко И.Г., Кутлубаев И.М. Методика определения сигналов управления антропоморфным манипулятором // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 5. С. 41–46.
- Морошкин Ю.Ф. Определение конфигураций механизмов // Докл. АН СССР. 1953. Т.82. №4. С. 56–58.
- Теория механизмов, машин и манипуляторов: метод. указания по курсовому проектированию для студ. инженер. специальностей / сост. В.Г. Заяц. Барановичи: РИО БарГУ, 2010. 55 с.
- Механика. Теория механизмов и машин: учеб.пособие / О.В. Конищева, Е.В. Брюховецкая, П.Н. Сильченко. 2-е изд., испр. и доп. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2013. 330 с.
- Евдокимов Ю.И. Теория механизмов и машин. Ч. 1: Структура, кинематика и кинестатика механизмов: курс лекций / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т. Новосибирск: Изд-во НГАУ, 2013. 136 с.
- Митрев Р.П. Компьютерный кинематический анализ шестизвенного механизма для привода рабочих органов строительных и дорожных машин // Теория механизмов и машин. 2008. №1 (11). Т. 6. С. 81–88.
- Бояркина И.В. Технологическая механика однокосовых фронтальных погрузчиков: монография. Омск: СибАДИ, 2011. 336 с.
- Левитский Н. Теория механизмов и машин. М.: Наука, 1979.
- Деграве В.С. Особые положения плоских неассуровых структурных групп с внутренними входами // Теория механизмов и машин. 2006. №2. Т. 4. С. 81–85.
- Ащеулов А.В. Простые для ТММ механизмы с внутренними входами оказываются сложными при проектировании // Теория механизмов и машин. 2003. №2. Т. 1. С. 76–78.
- Craig J. Introduction to robotics, mechanics and control. Addison Wesley publishing company, 1989.
- Hiller M., Möller M. Computer-based kinematical analysis of multiloop mechanisms. Proc. of the 22-nd Biennial ASME Mechanisms Conference on Flexible Mechanisms, Dynamics and Analysis, pp. 135–142, 1992, Scottsdale, USA.
- Константинов М., Неделчев И. Теория на механизмите и машините. София: Техника, 1964.
- Теория механизмов и машин: учебник для вузов / К.В. Фролов, С.А. Попов, А.К. Мусатов и др.; под ред. К.В. Фролова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1998. 496 с.
- Сумский С.Н. Расчёт кинематических и динамических характеристик плоских рычажных механизмов: справочник. М.: Машиностроение, 1980. 312 с.
- Справочник машиностроителя: в 6 т. / Люкшин В.С., Ниберг Н.Я., Обморшев Н.А., Плужников И.С.; под ред. Н.С. Ачеркана. 2-е изд., исправл. и доп. М.: Машлит, 1955. Т. 1. 568 с.
- Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах: учеб. пособие. В 3 т. М.: Наука, 1990. Т. 1. Статика и кинематика. 672 с.
- Дьяконов В.П. MathCAD 2000. СПб.: Питер Бук, 2000. 586 с.
- Макаров Е.Г. Инженерные расчёты в Mathcad 15: учебный курс. СПб.: Питер, 2011. 400 с.
- Бертяев В.Д. Теоретическая механика на базе Mathcad. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 752 с.

Поступила в редакцию 03 августа 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INVESTIGATION OF KINEMATICS OF THE FINAL CONTROL ELEMENTS OF THE ANTHROPOMORPHIC GRIPPER WITH A COMMON DRIVE

Alexander E. Vasilyev

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Vladimir F. Mikhaylets

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanik, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Anvar S. Sarvarov

D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Automatic Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Kristina V. Danilenko

Scientific Development and Production Center «Android Technology», Moscow, Russia.

The current stage of anthropomorphic engineering development is characterized by its transfer from the industry to the social sphere. However, anthropomorphic robots capable both of interacting with human beings and of substituting human beings in hazardous conditions hold a special place. Their structure, which is similar to the human skeleton, makes it possible to provide similar kinematics and to introduce them easily into the human life and activities.

It is well known that the main functions are fulfilled by the gripper. In most cases anthropomorphic grippers are used in such robots. Their design assumes the maximum match of the freedom of movement to that of human hand. However, providing the same freedom of movement and the necessary power characteristics using modern drives is a complicated task. The authors considered making use of a common drive providing the movement of elements in kinematic pairs with parallel lines of rotation. They carried out analytical investigations of the common drive in the two actuating groups of elements providing movement in one separate group of a thumb, while in the other one simultaneous movement of the fingers. To carry out the kinematic analysis, the expressions of geometric constraints in the vector form were developed, and after that, a system of scalar equations was obtained. The solution of the systems was found using the MathCad mathematical software. As a result, the authors developed the diagrams reflecting the relationship between the angle change and the slide block stroke, the position plans and the paths of junction points of the mechanisms, their angular velocities were also calculated. The obtained velocity plans made it possible to calculate the permissible loads on the actuating group of elements. The described sequence of the analytical investigation makes it possible to carry out the kinematic and power analysis at the design stage.

Key words: Anthropomorphic gripper, actuating group of elements, common drive, Kinematic and power analysis, sliding pair drive, gripping force

REFERENCES

- Marchal-Crespo L., Reinkensmeyer D.J. Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury. *J of NeuroEng Rehab.* 2009, vol. 6, pp. 1–20.
- Wolbrecht E.T., Chan V., Reinkensmeyer D., Bobrow J.E. Optimizing compliant, model-based robotic assistance to promote neurorehabilitation. *IEEE Trans on Neur Syst and Rehab Eng.* 2008, vol. 16(3), pp. 286–297.
- Sorokin V.G., Sokhin I.G. *Vozможные области применения антропоморфных роботов-помощников экипажей в отсекках перспективных космических комплексов* [Possible application fields of anthropomorphic robots helping to the crew in the future space shuttles]. *Manned flights to the space.* 2015, no. 4(17), pp. 71–79.
- Padalka G.I., Dolgov P.P., Altunin A.A. *Podkhod k postroyeniyu robototekhnicheskikh sistem dlya raboty v kosmose* [An approach to design of robotic systems intended for operation in the space]. *Manned flights to the space.* 2013, no. 4(9), pp. 92–94.
- Bogdanov A.A., Permyakov A.F., Kanaeva E.I., Kutlubaev I.M. *Zakhvat manipulyatora dlya raboty v ekstremalnykh usloviyakh* [Mechanic arm gripper for operation under extreme conditions]. *Reshentev Readings: proceedings of XV international scientific conference: in 2 parts; under the editorship of Yu.Yu. Loginov; Siberian state university. Krasnoyarsk.* 2011. Part 1. 218 p.
- Bogdanov A.A., Sychkov V.B., Zhidenko I.T., Kutlubaev I.M. *Sozdanie i issledovanie robototekhnicheskoy sistemy s interaktivnym upravleniem* [Design and investigation of the robotic system with interactive control]. *Reshentev Readings.* 2012, vol. 1, no. 16, pp. 230–231.
- Zhidenko I.G., Kutlubaev I.M. *Metodika opredeleniya signalov upravleniya antropomorfnyim manipulyatorom* [Method for detecting signals of an anthropomorphic manipulator control]. *Mechatronics, automation, control.* 2014, no. 5, pp. 41–46.
- Moroshkin Yu.F. *Opredelenie konfiguratsiy mekhanizmov* [Defining the layout of mechanisms]. *Report of the Academy of science of the USSR.* 1953, vol. 82, no. 4, pp. 56–58.
- Zayats V.G. *Theory of mechanisms, machines and manipulators: manual for the course work development for student majoring in engineering.* Baranovich: RIO BarGU, 2010. 55 p.
- Konishcheva O.V., Bryukhovetskaya E.V., Silchenko P.N. *Mekhanika. Teoriya mekhanizmov i mashin* [Mechanics. Theory of mechanisms and machines]. 2-nd edition, revised and enlarged. Krasnoyarsk: Siberian federal university, 2013. 330 p.
- Evdokimov Yu.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Part 1. Structure, kinematics and dynamic force analysis of mechanisms: a course of lectures / Novosibirsk state rural university. Engineering institute. Novosibirsk: Publishing center of NGAU, 2013. 136 p.
- Mitrev R.P. *Kompyuternyi kinematicheskiy analiz shestizvennogo mekhanizma dlya privoda rabochikh organov*

- stroitelnykh i dorozhnykh mashin* [Computer kinematic analysis of the six element mechanism for actuating the working element of construction and road making machines]. 2008, no. 1(11), vol. 6, pp. 81–88.
13. Boyarkin I.V. *Tekhnologicheskaya mekhanika odnokovshovykh frontalnykh pogruzchikov* [Technological mechanics of mechanical shovels]. Monograph / I.V. Boyarkina. Omsk: SibaDi, 2011. 336 p.
 14. Levitskiy N. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow: Science, 1979.
 15. Degraev V.S. *Osobyie polozheniya ploskikh neassurovykh strukturnykh grupp s brutrennimi vkhodami* [Specific positions of flat non-Assur structural groups with inside entrances]. Theory of mechanisms and machines. 2006, no. 2, vol. 4, pp. 81–85.
 16. Ashcheulov A.V. *Prostye dlya TMM mekhanizmy s vnutrennimi vkhodami okazyvayutsya slozhnymi pri proektirovanii* [Simple for TMM mechanisms with inside entrances turn out to be complex for design]. Theory of mechanisms and machines. 2003, no. 2, vol. 1, pp. 76–78.
 17. Craig J. Introduction to robotics, mechanics and control. Addison Wesley publishing company, 1989.
 18. Hiller M., Möller M. Computer-based kinematical analysis of multiloop mechanisms. Proc. of the 22-nd Biennial ASME Mechanisms Conference on Flexible Mechanisms, Dynamics and Analysis, pp. 135–142, 1992, Scottsdale, USA.
 19. Konstantinov M., History I. Theory of mechanisms and machines. Sofia: Tekhnika, 1964.
 20. Frolov K.V., Popov S.A., Musatov A.K. Theory of mechanisms and machines: textbook for technical universities. Et.al.; under the editorship of K.V. Frolov. 2-nd edition, revised and enlarged. M.: High school, 1998. 496 p.
 21. Sumskiy S.N. *Raschet kinematicheskikh i dinamicheskikh kharakteristik ploskikh ryuchaznykh mekhanizmov* [Calculation of kinematic and dynamic characteristics of flat lever mechanisms]; Reference book. M.: Machine building, 1980. 312 p.
 22. Reference book of a machine builder in 6 volumes. / Lyukshin V.S., Niberg N.Ya., Obmorshev N.A., Pluzhnikov I.S.; under the editorship of N.S. Acherkan. 2-nd revised and enlarged. M.: Mash. Literature, 1955. Vol. 1. 568 p.
 23. Bat M.I., Dzhanlidze G.Yu., Kelzon A.S. *Teoreticheskaya mekhanika v primerakh i zadachakh* [Theoretical mechanics in examples and tasks]: Text book in 3 volumes. Moscow: Science, 1990. Vol. 1. Statics and kinematics. 672 p.
 24. Dyakonov V.P. MathCAD 2000. Saint-Petersburg: Peter Book, 2000. 586 p.
 25. Makarov E.G. Engineering calculations in Mathcad 15: training course. Saint-Petersburg: Peter, 2011. 400 p.
 26. Bertyaev V.D. Theoretical mechanics based on Mathcad. Saint-Petersburg: BHV Petersburg, 2005. 752 p.

Исследования кинематики исполнительной группы звеньев антропоморфного захвата с групповым приводом / Васильев А.Е., Михайлец В.Ф., Сарваров А.С., Даниленко К.В. // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3(36). С. 41–46. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-41-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-41-46)

Vasilyev A.E., Mikhaylets V.F., Sarvarov A.S., Danilenko K.V. Investigation Of Kinematics Of The Final Control Elements Of The Anthropomorphic Gripper With A Common Drive. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 41–46. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-41-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-41-46)

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 004: 62-52-83:656.56

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-47-55](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-47-55)

Бабанова И.С., Жуковский Ю.Л., Королев Н.А.

Санкт-Петербургский горный университет

СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ И ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДНОГО ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

В статье представлен способ управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и оценки технического состояния электроприводного газоперекачивающего агрегата для подсистем диагностирования с определением коэффициента, учитывающего проявление неисправностей с учетом работы двух нейронных сетей Кохонена. Полученные ко-эффективности, учитывающие проявление неисправностей в определенных подсистемах, позволяют выявлять и оценивать наличие неисправностей. Представлены графики результатов оценки технического состояния электроприводного газоперекачивающего агрегата (ЭГПА) с учетом выявленных неисправностей в подсистемах (система смазки, нагнетатель, двигатель (обмотка статора), двигатель (механические дефекты)). Предлагаемая система позволяет повысить точность и полноту диагностики ЭГПА путем применения нейронных сетей Кохонена, позволяющих выявлять и прогнозировать неисправные состояния ЭГПА в динамике посредством выявления кластеров (подсистем диагностирования) и соответствующим им дефектам, а также системой управления, воздействующей на ЭГПА с учетом оценки технического состояния и дальнейшего изменения управления режимами ЭГПА.

Ключевые слова: электроприводной газоперекачивающий агрегат, система управления режимами, оценка технического состояния, подсистемы диагностирования, нейронная сеть Кохонена, коэффициент, учитывающий проявление неисправностей.

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме диагностирования объектов газовой промышленности уделяется особое внимание, что подтверждается требованиями Правительства Российской Федерации обеспечить, в рамках реализации Концепции федеральной системы мониторинга критически важных объектов [1], а также в соответствии с [2–4], информационную поддержку разработки и реализации мер по своевременному прогнозированию, выявлению и предупреждению угроз для нормального функционирования газотранспортной системы РФ. В соответствии с [5] предусматривается дальнейшее увеличение добычи газа как для внутреннего потребления, так и для экспорта, интенсивную реализацию организационных и технологических мер по экономии топлива и энергии.

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Из опыта эксплуатации компрессорных станций (КС) можно выделить основные факторы, способствующие выходу из строя [6]: дефекты возникающие в ходе строительно-монтажных работ; повреждения изоляции; вибрация, способствующая образованию трещин; подвижки грунта, приводящие к повышенным напряжениям в трубопроводах, следствием которых является потеря устойчивости; дефекты как изготовления оборудования, так и износ оборудования, вызванный различными отказами.

Рассматривая срок эксплуатации парка газоперекачивающих агрегатов (ГПА), наработку на отказ на примере газотранспортного предприятия (ГТП) (рис. 1, 2), можно сделать вывод, что повышение

эксплуатационной надежности ГПА КС является актуальной проблемой в связи с тем, что большая часть парка энергетического оборудования КС была введена в эксплуатацию в 1980–1990 гг., и значительная его доля работает сверх установленного производителями нормативного срока. Однако на диагностику для КС накладываются существенные ограничения, вызванные, с одной стороны, невозможностью вывода из эксплуатации или снижения рабочего давления в газопроводе (даже кратковременного), с другой стороны, стоимостью проведения работ по диагностике и мониторингу. Важным аспектом для развития дефектов для газотранспортных систем (ГТС) является интервал между моментом возникновения минимально обнаруживаемых уровней дефектов и критическими дефектами, который может быть меньше интервала между соседними диагностическими обследованиями.

Из анализа работ, посвященных диагностике и мониторингу, можно отметить рост внедрения интеллектуальных систем диагностирования для электроприводных ГПА (ЭГПА) [7, 8]. Эффективность применения прогнозных моделей с помощью искусственных нейронных сетей показана в работах [9–16], а также в ряде исследований, проведенных по диагностике оборудования [17–22]. В результате появляется возможность использовать непрерывное наблюдение (мониторинг) с учетом программного обеспечения, способного на ранних стадиях обнаружить некоторые виды дефектов и неисправностей в процессе эксплуатации и выработки управляющих воздействий для нормальной эксплуатации.

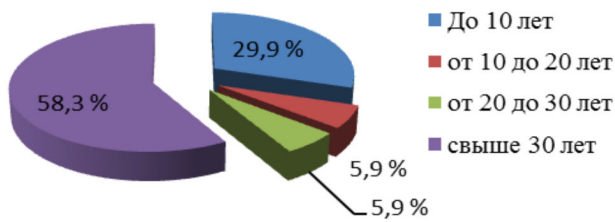


Рис. 1. Срок эксплуатации парка ГПА на примере газотранспортного предприятия

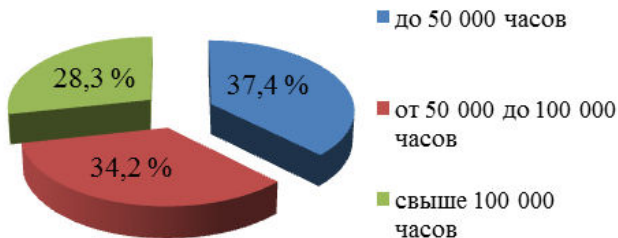


Рис. 2. Наработка парка ГПА на примере газотранспортного предприятия

В проведенных исследованиях авторами [7, 8, 23, 24] по внедрению таких систем можно выделить следующие недостатки:

- отсутствие классификации неисправностей для ГПА, которая не позволяет производить оценку технического состояния с учетом отсутствия как внешних факторов, влияющих на процесс диагностирования, так и *функции управления агрегатом* и принятия решения диагностирования с учетом эксплуатации;

- оценка технического состояния ГПА только для одной подсистемы (двигатель-обмотка статора), то есть невозможность классификации распознавания системы кластеров для выявления неисправностей (подсистем) и последующей оценки технического состояния для ГПА;

- недостаточная точность диагностики для определения подсистем диагностирования и соответствующих им классов выявленных неисправностей ГПА для формирования и функционирования непрерывного технического обслуживания и ремонта ГПА;

- отсутствие выбора режима диагностирования, а также дальнейшего управления режимами ГПА с учетом выявленных неисправностей.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С учетом сложности объекта исследования ЭГПА по выделенным подсистемам диагностирования (система смазки, нагнетатель, двигатель (обмотка статора), двигатель (механические дефекты) возникает проблема выявления неисправностей в режиме как реального времени, так и последующей оценки технического состояния, относящейся к такому классу задач по прогнозированию, где зависимость между входными и выходными переменными сложна, а нахождение закономерностей в больших объемах данных требует нетривиальных алгоритмов и занимает много времени. На настоящий момент

спектр методик прогнозирования достаточно широк. Однако сегодня все большее распространение получают интеллектуальные информационные технологии, связанные с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС). Применение ИНС обусловлено тем, что они позволяют воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости, которые сопутствуют плохо формализованным задачам.

На основе [9–16] было принято решение использовать нейронные сети, которые позволяют эффективно строить нелинейные зависимости, более точно описывают наборы данных, по сравнению с линейными методами статистики (линейная регрессия, авторегрессия, модели SARIMA, ARIMA и др.), повышая точность прогноза для разных интервалов прогнозирования в рамках исследований, проведенных для предприятий минерально-сырьевого комплекса и электросетевых компаний. Преимуществами использования ИНС данного типа для диагностики неисправностей ЭГПА (в рамках данного исследования) являются: возможность работы с Big data для обнаружения определенных классов дефектов; использование самоорганизующихся карт Кохонена, позволяющих выполнить прогноз и поиск закономерностей в больших массивах данных с учетом входных данных для ЭГПА (распознавать кластеры в данных, а также устанавливать близость классов); выявление наборов независимых признаков.

Вынужденная или аварийная остановка любого ЭГПА сопровождается не только дополнительной статьей расходов для ГТП, связанной с проведением ремонтно-восстановительных работ, но и снижением производительности газопровода, потерями пускового и топливного газа, электроэнергии. Возникшее противоречие между выбором метода диагностирования неисправностей по нескольким подсистемам ЭГПА и основанного на нем способа управления режимами и оценки технического состояния ЭГПА (СУР ДиОТС ЭГПА) обуславливают актуальность исследования.

Для реализации предлагаемого способа управления режимами ЭГПА был выполнен комплексный анализ, включающий в себя: системный подход, нейросетевое моделирование и прогнозирование с помощью ИНС Кохонена, структурно-параметрическую оптимизацию с учетом нейросетевого диагностирования неисправностей и оценку технического состояния ЭГПА.

На **рис. 3** показана структурная схема предлагаемой СУР ДиОТС ЭГПА.

Способ осуществляется следующим образом. С помощью датчиков контролируемых параметров 2 (см. **рис. 3**) в количестве D_i , $i=1...N$ регистрируют параметры ЭГПА 1, которые поступают в устройство сбора информации 3, и далее поступают в блок подготовки данных 4, где осуществляется фильтрация измерений в фильтре 5, в котором происходит проверка однородности наблюдений с последующей оценкой значимости изменения значений параметров по статистическому r - критерию. При выполнении

нии условия $r > r_{кр}$, сигналы поступают в блок сверки с ограничениями 6, иначе из фильтра 5 возвращаются в устройство сбора информации 3 и поступают в блок самопроверки каналов измерений 7 для выявления причин изменения значений параметров, в котором происходит сравнение отклонения значений параметров эталонного ЭГПА, хранящиеся в базе данных-2 13, и ЭГПА 1 с составлением массива данных, возвращаются в блок фильтрации 5, при отсутствии аномальных изменений значений параметров, далее поступают в блок сверки с ограничениями 6, в котором происходит сравнение параметров, включенных в систему защиты ЭГПА с установленными ограничениями. При превышении 0,95 от заданного уровня параметра сигналы поступают на микропроцессор 8, который воздействует на систему управления 9, изменяя режим работы ЭГПА, исключая аварийную остановку агрегата, иначе сигналы из блока сверки с ограничениями 6 поступают в блок приведения параметров 10, в котором параметры приводятся к одним сопоставимым условиям, а затем к средним значениям в блоке усреднения измерений 11. После усреднения параметров в ПЗУ 16 формируют базу данных-1 12, где происходит сбор информации для дальнейшего составления общей базы данных 15, включающей базу данных-2 13, хранящей эталонные параметры ЭГПА 1, и базу данных внешних факторов 14. Затем в блоке нормировки 17 происходит процесс нормирования параметров ЭГПА из общей базы данных 15, переходя к безразмерным величинам, представленными числами в диапазоне $[0...1]$, ввиду разнородности физических размерностей и диапазонов параметров. После нормирования данных в блоке нормировки 17 формируется массив данных для работы блока ИНС Кохонена-1 18, представленный базой данных-1. Далее происходит сравнение нормированных параметров ЭГПА в блоке хранения нормированных данных ЭГПА 19 с рассчитанными с помощью блока ИНС Кохонена-1 18 в блоке вычитания 20 и формируется сигнал о выявлении неисправностей ЭГПА с формированием массива данных для блока ИНС Кохонена-2 21, на выходе которой образуется бинарный вектор $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$, компоненты его определяет класс, к которому относится выявленная неисправность с учетом измеренных параметров для ЭГПА. Далее производится тестирование результата в блоке тестирования 22. Оценка вероятности технического состояния ЭГПА производится в блоке тестирования 23, с учетом выявленных диагностируемых неисправностей производилась на основе анализа вектора R расчета расстояния K_d , с дальнейшим расчетом прогнозного значения нагрузки для ЭГПА в блоке прогнозирования 24 и формирование в блоке выбора режима диагностирования ЭГПА 25 сигнала об изменении режима, который поступает на микропроцессор 8, воздействуя на систему управления 9, изменяя режим работы ЭГПА, исключая аварийную остановку агрегата.

Выделим типичные неисправности с учетом подсистем диагностирования, а также в составе обучающей выборки пять обобщенных классов состояний S_i ЭГПА, соответствующих вектору R (табл. 1).

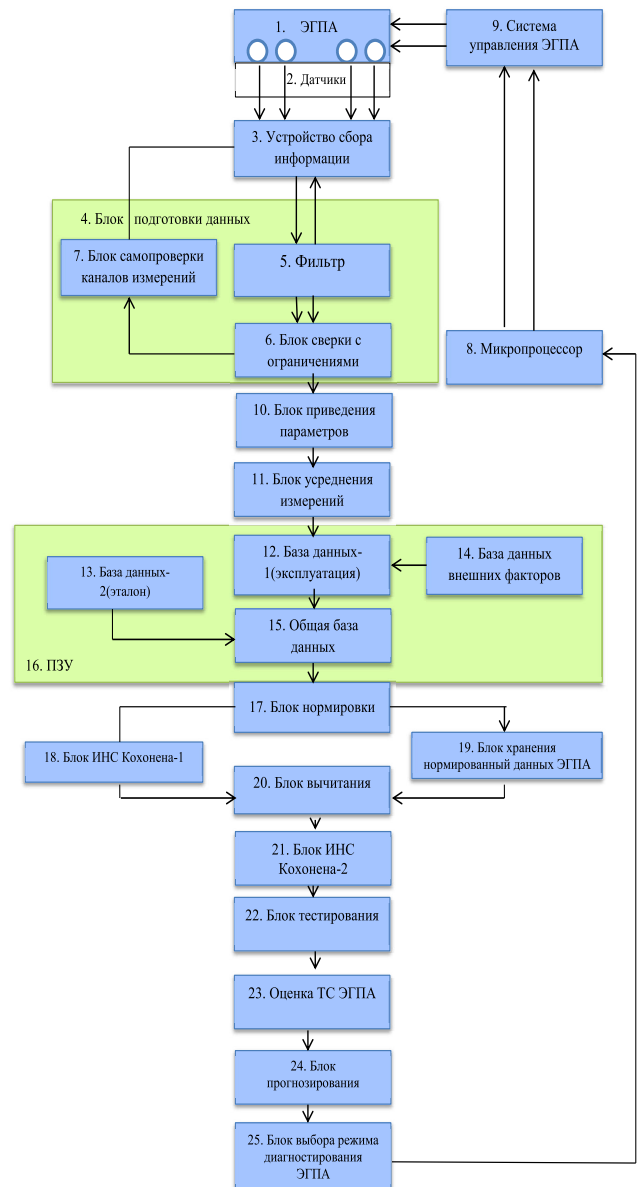


Рис. 3. Структурная схема управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и оценки технического состояния ЭГПА

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЛЯ ЭГПА. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основа обучения НС Кохонена-2 – конкуренция между нейронами. Сеть состоит из семнадцати входов (отклонения ΔY_i) и выходов (по числу обобщенных классов состояний S_i).

Обучение сети представляет собой процесс подбора значений весовых коэффициентов, которые минимизируют среднеквадратичные ошибки в результате замены близких векторов весов. Набор данных был разбит на обучающие – 95% и тестовые – 5%. Входные векторы кодируются номерами нейронов-победителей (номера кластеров). Таким образом, все векторы из некоторой области входного пространства заменяются одним и тем же опорным вектором, являющимся их ближайшим соседом. Если максимум достигается одновременно на выходах нескольких сумматоров, то выходной сигнал, равный единице, соответствует одному из них, например первому.

Результаты процесса обучения ИНС Кохонена-2 показаны в табл. 2 по выявленным классам (подсистемам диагностирования) для ЭГПА.

Таблица 1

Обучающая выборка для работы НС Кохонена-2

Номер подсистемы диагностирования	Отклонения параметров ЭГПА	Неисправности ЭГПА/неисправности подсистемы диагностирования	Система диагностирования/Дефекты системы S_i	
1	1) температура масла; 2) частота вращения; 3) давление масла; 4) расход масла;	1) утечка масла; 2) засорение фильтров; 3) разгерметизация масляной системы; 4) отсутствие признаков дефектов;	система смазки	$R=[1; 0; 1]$
2	5) перепад давления до и после нагнетателя; 6) производительность объемная; 7) температура газа на входе в нагнетатель;	5) разрушение колеса нагнетателя; 6) разрушение уплотнения масло-газ; 7) разрушение подшипника; 8) отсутствие признаков дефектов;	нагнетатель	$R=[1; 0; 0]$
3	8) давление газа начальное на входе в нагнетатель; 9) плотность газа, отнесенная к 20°C и давлению 0,1013 МПа; 10) номинальная частота вращения ротора; Внешние факторы и факторы для прогноза: 11) температура окружающего воздуха; 12) количество измеряемых параметров; 13) интервал времени между измерениями; 14) число интервалов в прошлое; Параметры, характеризующие ТС изоляции обмотки статора (для ввода в ИНС): 15) температура меди; 16) интенсивность частичных разрядов (ЧР); 17) уровень перенапряжений питающей сети.	9) перегрев в пазовой части ротора; 10) перегрев в лобовой части обмотки; 11) перегрев на выводах; 12) перегрев при запуске агрегата; 13) перенапряжения выхода из синхронизма; 14) перенапряжения при дребезге контактов; 15) перенапряжения при ОЗЗ; 16) перенапряжения при МКЗ; 17) дефект изоляции в пазовой части; 18) дефект изоляции в лобовой части; 19) отсутствие признаков дефектов изоляции;	двигатель (обмотка статора)	$R=[0; 1; 1]$
		20) механические ослабления; 21) расцентровка валов; 22) дефект подшипников; 23) механические ослабления; 24) дефект сцепных муфт или передаточных звеньев; 25) отсутствие признаков дефектов;	механические дефекты	$R=[1; 0; 1]$
		26) отсутствуют (эталон), исправное состояние.	исправное состояние	$R=[0; 0; 0]$

Таблица 2

Результаты процесса обучения ИНС Кохонена-2

Тип неисправности в ЭГПА	Количество возможных состояний (частоты выигрышей)	Количество неблагоприятных состояний (с учетом $d \geq 1$) НС
Система смазки	4	0
Нагнетатель	4	0
Двигатель (обмотка статора)	11	1
Механические дефекты двигателя	6	1
Отсутствуют (эталон)	0	0
Всего состояний	25	-

Определение управления режима работы с учетом нейросетевого диагностирования неисправностей и технического состояния для ЭГПА сводится к нахождению K_d – расстояния до центра ближайшего (p-го) кластера (прецедента), образованного между координатами выявленного кластера S_i (см. табл. 1) и координатами выхода НС Кохонена-2 («нейрона победителя»), дальнейшего расчета прогнозного значения нагрузки для ЭГПА.

При этом расстояние вычисляется с использованием евклидовой метрики с учетом коэффициентов, учитывающих работу двух НС Кохонена. По значениям компонент R_i можно оценить интенсивность дефекта (чем больше интенсивность дефекта, тем меньше расстояние до соответствующего прецедента). Формула нахождения коэффициента, учитывающего проявление неисправностей для определенного ЭГПА, или расстояния до центра ближайшего (p-го) кластера для выявления неисправностей ЭГПА и оценки технического состояния с учетом работы НС Кохонена-2

$$K_d = d(S, S_i) = \sqrt{(K \cdot R_{1HC} - R_{1S_i})^2 + (K \cdot R_{2HC} - R_{2S_i})^2 + (K \cdot R_{3HC} - R_{3S_i})^2}, \quad (1)$$

где R_{1HC} , R_{2HC} , R_{3HC} – значения координат для выявленного состояния S_i ЭГПА с учетом появления неисправностей (результат НС Кохонена-2); R_{1S_i} , R_{2S_i} , R_{3S_i} – значения координат для выявленных пяти состояний ЭГПА S_i , соответствующие вектору R , с учетом систем диагностирования и выявленных неисправностей;

$K = OUT_k = \sum_n^{17} w_i^{k+1} \cdot \Delta Y_i = (w_i^k + \eta_i^k [\Delta Y_i - w_i^k]) \cdot \Delta Y_i$ – коэффициент, учитывающий влияние НС Кохонена на

выявленную неисправность в системе диагностирования ЭГПА.

В рамках исследования была поставлена первоестественная задача – выявить и распознать данные виды неисправностей сначала с учетом предложенного способа, решение задачи кластеризации для ЭГПА с учетом сети Кохонена, вторая (над которой авторский коллектив продолжает работать) – это повышение точности диагностики в процессе кластеризации при управлении режимами. Для первой задачи это являлось несущественным параметром, и им можно было «пожертвовать». Исследования о качественном сравнении применения различных значений бинарных векторов проводятся и будут отражены в следующих статьях авторского коллектива.

В ходе исследования были получены различные оценки расстояний до центра ближайшего (p -го) кластера (прецедента) для ЭГПА по нескольким подсистемам (табл. 3 и 4).

Из табл. 3 можно сделать вывод, что полученный коэффициент K_d , позволяет не только дать количественный состав оценки расстояния до центра ближайшего кластера, но и выявить неисправность в системе диагностирования ЭГПА с учетом кластеризации.

Таблица 3
Оценка расстояний K_d до центра ближайшего (p -го) кластера (прецедента) для ЭГПА

Значения выходов НС			K_d – расстояние до центра ближайшего (p -го) кластера (прецедента) с учетом состояний			Состояния, S/дефекты
R_1	R_2	R_3	$d(SS_0)$	$d(SS_1)$	$d(SS_2)$	
0,6	0,67	0,46	1,010	0,825	0,906	система смазки
0,33	0,65	0,7	1,010	0,849	1,167	нагнетатель
0,001	0,34	0,56	0,655	0,866	1,195	Двигатель (обмотка статора)
0,64	0,715	0,312	1,009	0,767	0,859	Двигатель (механические дефекты)
0	0	0	0,000	0,000	1,000	Исправное состояние

Таблица 4
Оценка расстояний K_d до центра ближайшего (p -го) кластера (прецедента) для ЭГПА

Значения выходов НС			K_d – расстояние до центра ближайшего (p -го) кластера (прецедента) с учетом состояний			Состояния, S/дефекты
R_1	R_2	R_3	$d(SS_3)$	$d(SS_4)$	$d(SS_5)$	
0,6	0,67	0,46	0,872	0,948	0,693	Система смазки
0,33	0,65	0,7	0,567	0,980	1,030	Нагнетатель
0,001	0,34	0,56	0,793	1,143	1,321	Двигатель (обмотка статора)
0,64	0,715	0,312	0,982	1,055	0,555	Двигатель (механические дефекты)
0	0	0	1,414	1,414	1,414	Исправное состояние

Оценка технического состояния ЭГПА возможна с учетом разработанной шкалы оценивания по каждой из подсистем диагностирования с учетом выявленных состояний (кластеров) S_i для системы смазки, нагнетателя, двигателя (обмотка статора), механических дефектов, исправного состояния на основе выявленного общего количества возможного состояния дефектов с учетом НС Кохонена-2 и расчета расстояния K_d до центра ближайшего (p -го) кластера (прецедента).

Далее производилась оценка вероятности p_i наступления события с учетом выявленных состояний ЭГПА (неблагоприятных) и количества возможных состояний (выигрышных).

Оценка вероятности наступления события с учетом выявленных состояний ЭГПА включала в себя:

- определение количества возможных состояний (частоты выигрышей) по подсистемам (см. табл. 2);
- учет количества N неблагоприятных состояний при $d \geq 1$;

– нахождение вероятности наступления события с учетом возможных всех выявленных состояний ЭГПА и количества возможных состояний (выигрышных) n ;

– нахождение вероятности наступления события с учетом выявленных состояний ЭГПА и количества возможных состояний (выигрышных): p_i = количество возможных состояний (частоты выигрышей) по определенной подсистеме/общее число состояний (см. табл. 2, всего 25 состояний).

Были получены шкалы оценивания технического ЭГПА с учетом оценки вероятностей по подсистемам диагностирования, показанных на рис. 4–7, где цифрами обозначен допуск к эксплуатации ЭГПА: 1 – исправное; 2 – работоспособен с учетом проведения диагностики; 3 – функционирование с нарушениями, допускается при комплексной диагностике; 4 – не допускается к работе, вывод.

После оценки расстояния до центра ближайшего кластера, оценки вероятности отказа с учетом всех выявленных неисправных состояний для соответствующего класса (подсистемы диагностирования) ЭГПА и оценки вероятности отказа с учетом «выигрышных» состояний с помощью НС Кохонена-2, расчета нагрузки для ЭГПА принимается решение последующего допуска к эксплуатации (без ограничения, с ограничениями, остановка ЭГПА).

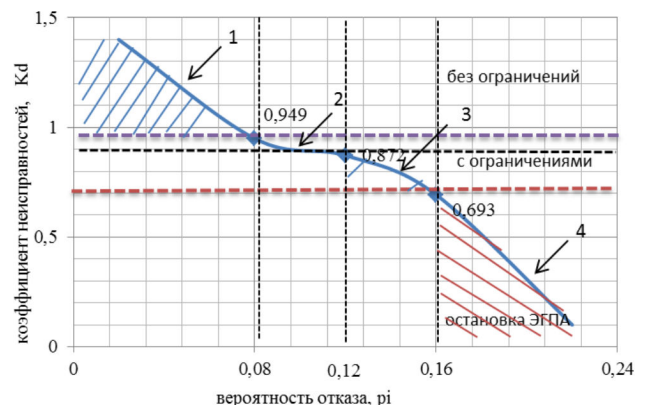


Рис. 4. Оценка ТС ЭГПА с учетом выявленных неисправностей в системе смазки

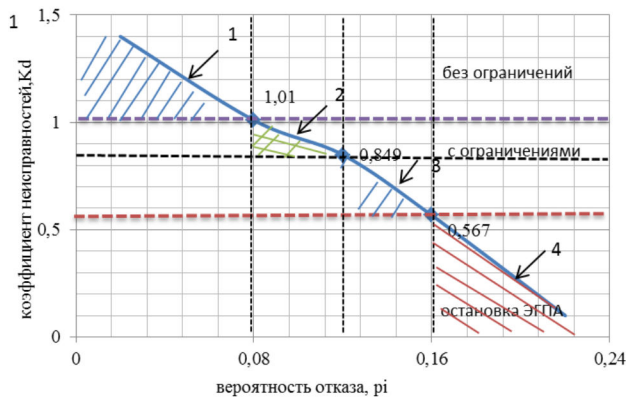


Рис. 5. Оценка ТС ЭГПА с учетом выявленных неисправностей в нагнетателе

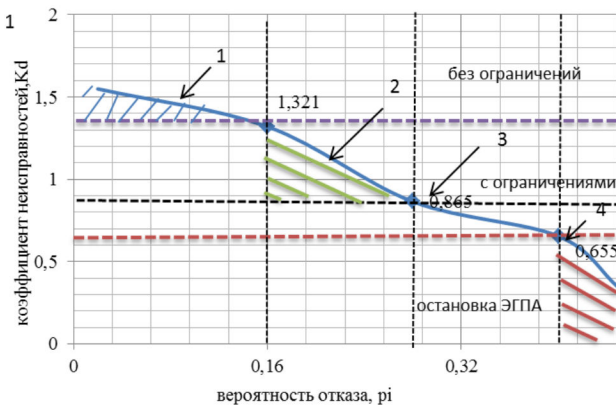


Рис. 6. Оценка ТС ЭГПА с учетом выявленных неисправностей в двигателе (обмотка статора)

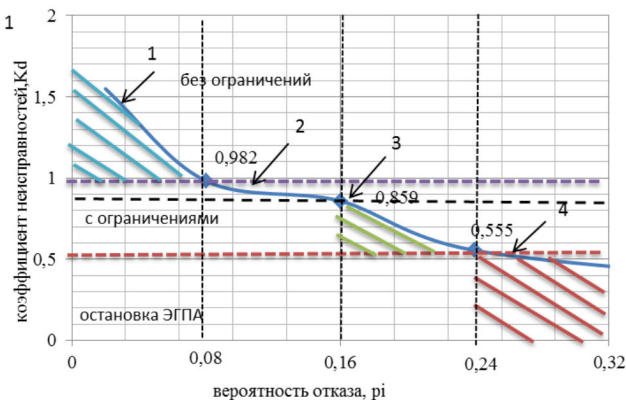


Рис. 7. Оценка ТС ЭГПА с учетом выявленных неисправностей в системе двигателя (механические дефекты)

Сигнал с блока 24 поступает в блок выбора режима диагностирования 25 (см. рис. 3), который формирует информацию о наиболее целесообразном режиме диагностирования определенной подсистемы ЭГПА, далее сигнал поступает в микропроцессор 8, тем самым, воздействуя на систему управления ЭГПА 9, устанавливая режим работы агрегата (без ограничения режима работы ЭГПА, с ограничениями режима работы ЭГПА, остановка ЭГПА) с учетом оценки технического состояния ЭГПА.

Оценка качества полученного кластеризатора производилась с учетом тестирования, то есть на вход сети подавались данные, не входящие в состав обучающей выборки.

Качество работы кластеризатора оценивалось с учетом функции оценки Q по формуле

$$Q = c \cdot d_i / d_o, \quad (2)$$

где c – количество кластеров; d_i – среднее внутрикластерное расстояние; d_o – среднее межкластерное расстояние.

Для получения наилучшего результата несколько раз выполнялся алгоритм кластеризации, после чего выбирался результат с наименьшим значением Q .

В исследовании значения качества полученного кластеризатора Q принимали значения от 0,25 до 0,06 в зависимости от настроек параметров сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение способа управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и оценки технического состояния ЭГПА повысило точность диагностики технического состояния путем применения ИНС Кохонена, позволяющих выявлять и прогнозировать неисправные состояния ЭГПА в динамике посредством выявления кластеров (подсистем диагностирования) и соответствующим им дефектам в текущий момент времени, а также системой управления, воздействующей на ЭГПА с учетом оценки технического состояния и дальнейшего изменения управления режимами ЭГПА на текущий момент времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ «Концепция федеральной системы мониторинга критически важных объектов и (или) потенциально опасных объектов инфраструктуры РФ и опасных грузов» (утв. 27 августа 2005 г. п 1314-р.). М., 2005.
2. ПП РФ «Об утверждении технического регламента о безопасности сетей газораспределения и газопотребления» от 29.10.2010 N 870 (ред. от 20.01.2017). М., 2017.
3. СТО Газпром 2-3.5-032-2005. Положение по организации и проведению контроля за соблюдением требований промышленной безопасности и обеспечением работоспособности объектов единой системы газоснабжения ОАО «Газпром» (утв. расп. 27 мая 2005 г. № 88). М., 2005.
4. СТО Газпром 18000.1-001-2014. Единая система управления охраной труда и промышленной безопасностью в ОАО «Газпром» (утв. пр. 28 июля 2014 г. № 358). М., 2005.
5. Распоряжение Правительства РФ «Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года» (утв. 13.11.2009 № 1715-р.). М., 2009.
6. Пужайло А. Ф. Диагностика оборудования компрессорных станций: монография. Н. Новгород: Исток, 2013. 299 с.
7. Крюков О.В., Серебряков А.В. Анализ результатов прогнозирования технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №1(30). С. 39–44. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-1\(30\)-39-44](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-1(30)-39-44)
8. Рубцова И.Е., Бабичев С.А. Управление и мониторинг электроприводов компрессорных станций в условиях стохастических возмущений // Актуальные вопросы автоматизированного электропривода. 2014. №3(2). С. 209–215.
9. Бабанова И.С. Применение искусственной нейронной сети для прогнозирования температуры на выходе из аппарата воздушного охлаждения газа для компрессорной станции магистрального газопровода // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №3(45). Ч. 2. С. 6–9. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.45.090>
10. Устинов Д.А., Бабанова И.С. Обоснование выбора ценовой категории оплаты за электроэнергию с учетом потребителей-регуляторов // Промышленная энергетика. М., 2016. №11. С. 9–16.
11. Абрамович Б.Н., Бабанова И.С. Система прогнозирования энергопотребления с применением искусственной нейронной сети // Горные науки и технологии. 2016. №2. С. 66–77.
12. Бабанова И.С., Устинов Д.А. Разработка модели искусственной нейронной сети с целью управления и прогнозирования режимов энергопотребления предприятий мине-

- рально-сырьевого комплекса // Электроэнергетика глазами молодежи – 2016: материалы VII Международной научно-технической конференции, 19–23 сентября 2016 г., Казань. В 3 т. Т. 2. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. С. 47–50.
13. Бабанова И.С. Применение искусственной нейронной сети для прогнозирования температуры на выходе из аппарата воздушного охлаждения газа для компрессорной станции магистрального газопровода // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №3(45). Ч. 2. С. 6–9. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.45.090>
 14. Бабанова И.С. Разработка перспективного планирования энергосистемы на основе сравнительного анализа различных методов прогнозирования электропотребления // Оперативное управление в электроэнергетике. 2017. Вып. 3. С. 48–57.
 15. Абрамович Б.Н., Бабанова И.С. Применение искусственных нейронных технологий в процессе преподавания дисциплин электротехнического цикла // Современные образовательные технологии в преподавании естественно-научных и гуманитарных дисциплин: сборник научных трудов II Международной научно-методической конференции, 09–10 апреля 2015 г. / «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Петербург, 2015. С. 229–234.
 16. A. Blinov, Y. Zhukovsky. Integrated system of safety and performance efficiency assessment of electromechanical equipment. Journal of Fundamental and Applied Sciences, 2016, 8(2S), 2185–2196.
 17. Y. Zhukovskiy and N. Koteleva. A method of definition of life-cycle resources of electromechanical equipment. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 124(2016) 012172.
 18. Козярук А.Е., Жуковский Ю.Л. Система обслуживания электромеханического оборудования машин и механизмов по фактическому состоянию // Горное оборудование и электромеханика. 2014. № 10. С. 8–14.
 19. Y. Zhukovskiy and N. Koteleva. Automated system for definition of life-cycle resources of electromechanical equipment IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 177(2017) 012014.
 20. Королев Н.А. Система диагностики электродвигателя переменного тока на основе комплексного параметрического анализа // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромышленного оборудования / Пермь: ПНИПУ, 2016. №1. С. 236–242.
 21. N.A. Korolev and S.V. Solovlev. AC motor diagnostics system based on complex parametric analysis IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; Tomsk, 2016, Vol. 177. conference 1. Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/177/1/012007>
 22. Зарицкий С.П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 598 с.
 23. Антропов П.Г., Долинина О.Н., Шварц А.Ю. Способ диагностики неисправностей газоперекачивающих агрегатов с использованием гибридных интеллектуальных систем // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2014. №5(47). С. 75–84.

Поступила в редакцию 13 июня 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHOD OF MODE CONTROL BASED ON THE NEURAL NETWORK FAULT DIAGNOSIS AND EVALUATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICALLY DRIVEN GAS PUMPING UNIT

Irina S. Babanova

Ph.D. student, Department of electrical power engineering and electromechanics, Saint-Petersburg mining University, Saint Petersburg, Russia.

Yuri L. Zhukovsky

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of electrical power engineering and electromechanics, Saint-Petersburg mining University, Saint Petersburg, Russia.

Nikolay A. Korolev

Postgraduate student, Department of electrical power engineering and electromechanics, Saint-Petersburg mining University, Saint Petersburg, Russia.

The article presents a method of mode control based on neural network fault diagnosis and evaluation of the technical condition of electrically driven gas pumping unit for subsystems for the diagnostic determination of the coefficient that takes into account the manifestation of the fault on the basis of the neural networks of the Kohonen type. The coefficients taking into account the manifestation of faults to specific subsystems allow us to identify and assess faults. The graphs of the results of the evaluation of the technical condition of electrically driven gas-pumping unit are provided with respect to the identified faults in sub-systems (lubrication system, supercharger, engine (stator winding), the motor (mechanical defects). The proposed system improves the accuracy and completeness of diagnosis for electrically driven gas-pumping unit by using neural networks of Kohonen type.

Keywords: Electrically driven gas pumping unit, control system modes, assessment of the technical condition, engine diagnostics, Kohonen neural network, factor existence of these faults.

REFERENCES

1. *Rasporyazhenie pravitelstva RF «Koncepciya federalnoj*

sistemy monitoringa kriticheski vaznykh obyektov i (ili) potencialno opasnykh obyektov infrastruktury RF i opasnykh gruzov» [Order of RF Government “The concept of the federal monitoring system of critical objects or hazardous facilities of the Russian Federation and dangerous cargo” (signed on August 27, 2005, no. 1314-p.)]. Moscow, 2005. (In Russian)

2. *PP RF «Ob utverzhdenii tekhnicheskogo reglamenta o bezopasnosti setej gazoraspredeleniya i gazopotrebleniya» ot 29.10.2010 N 870 (red. ot 20.01.2017)* [PP of RF «Adoption of technical regulations about the safety of gas distribution and gas consumption networks» authorized on 29.10.2010 N 870 (as in the force on 20.01.2017)]. Moscow, 2017. (In Russian)
3. *STO Gazprom 2-3.5-032-2005. Polozhenie po organizacii i provedeniyu kontrolya za soblyudeniem trebovanij promyshlennoj bezopasnosti i obespecheniem rabotosposobnosti obyektov edinoj sistemy gazosnabzheniya OAO «Gazprom»* [The company standard concerning the process of monitoring of meeting the industrial safety requirements and the performance of objects included into the unified gas supply system of the OJSC “Gazprom” (authorized on May 27, 2005, no. 88)]. Moscow,

2005. (In Russian)
4. *STO Gazprom 18000.1-001-2014. Edinaya sistema upravleniya ohranoj truda i promyshlennoj bezopasnostyu v OAO «Gazprom»* [United system of labor safety and industrial safety management at the OJSC “Gazprom” (authorized on July 28, 2014, no. 358)]. Moscow, 2005.
5. *Order of the government of the RF «Ob Energeticheskoy strategii Rossii na period do 2030 goda»* [Energy Strategy of Russia up to 2030 (signed on 13.11.2009, no. 1715-r)]. Moscow, 2009. (In Russian)
6. Puzhailo A.F. *Diagnostika oborudovaniya kompressornykh stancij* [Diagnostics of gas compressor station equipment]: monograph. N. Novgorod: Istok, 2013. 299 p. (In Russian)
7. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Analysis of forecasting results of the technical states of electrical gas compressor units. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes]. 2016, no. 1(30). pp. 39–44. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-1\(30\)-39-44](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-1(30)-39-44). (In Russian)
8. Rubcova I.E., Babichev S.A. Control and monitoring of electric drives of gas compressor units in terms of stochastic disturbances. *Aktualnye voprosy avto-matizirovannogo ehlektroprivoda* [Topical issues of automated electric drive]. 2014, no. 3(2), pp. 209–215. (In Russian)
9. Babanova I.S. Application of an artificial neural network to predict temperature at the exit of the air cooler unit of gas for a gas compressor station of the main gas pipeline. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* [International research journal]. 2016, no. 3(45), part 2, pp. 6–9. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.45.090>. (In Russian)
10. Ustinov D.A., Babanova I.S. Justification of the choice of the electricity tariff for consumers taking into account controlled load consumers. *Promyshlennaya ehnergetika* [Industrial energy]. Moscow, 2016, no. 11, pp. 9–16. (In Russian)
11. Abramovich B.N., Babanova I.S. Forecasting system of energy consumption using an artificial neural network. *Gornye nauki i tekhnologii* [Mining science and technology]. Moscow, MISIS, 2016, no. 2, pp. 66–77. (In Russian)
12. Babanova I.S., Ustinov D.A. Development of model of an artificial neural network to control and forecast the power consumption modes of mining enterprises. *Ehlektrounergetika glazami molodezhi – 2016: materialy VII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, 19–23 sentyabrya 2016, Kazan'* [Electrical engineering from the point of view of the youth – 2016: proceedings of the VII international scientific and technical conference, September 19–23, 2016, Kazan]. Kazan: Kazan state energy university, 2016, iss. 3, vol. 2, pp. 47–50. (In Russian)
13. Babanova I.S. Application of an artificial neural network to predict the temperature of exit temperature of the air-cooling gas unit for the gas compressor station of the main gas pipeline. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* [International research journal]. 2016, no. 3(45), part 2, pp. 6–9. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.45.090>. (In Russian)
14. Babanova I.S. Development of strategic planning of electrical power system on the basis of comparative analysis of different forecasting methods of electrical energy consumption. *Operativnoe upravlenie v ehlektroehnergetike* [Operational management in power industry]. 2017, vol. 3, pp. 48–57. (In Russian)
15. Abramovich B.N., Babanova I.S. Application of artificial neural networks in the teaching process of electrical engineering courses. *Sovremennye obrazovatelnye tekhnologii v prepodavanii estestvenno-nauchnykh i gumanitarnykh disciplin: sbornik nauchnykh trudov II Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii, 09–10 aprelya 2015* [Modern educational technologies in teaching of natural Sciences and the Humanities: collection of scientific papers of the II international scientific conference, April 09–10, 2015]. Sankt-Petersburg, 2015, pp. 229–234. (In Russian)
16. A. Blinov, Y. Zhukovsky. Integrated system of safety and performance efficiency assessment of electromechanical equipment. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 2016, 8(2S), 2185–2196.
17. Y. Zhukovskiy and N. Koteleva. A method of definition of life-cycle resources of electromechanical equipment. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 124(2016) 012172.
18. Kozyaruk A.E., Zhukovskiy Yu.L. Maintenance system of electromechanical equipment and machines by the actual state. *Gornoe oborudovanie i ehlektromekhanika* [Mining equipment and electrical engineering]. 2014, no. 10, pp. 8–14. (In Russian)
19. Y. Zhukovskiy and N. Koteleva. Automated system for definition of life-cycle resources of electromechanical equipment IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 177(2017)012014.
20. Korolev N.A. Diagnostics system of an AC electric motor based on the complex parameter analysis. *Aktual'nye problemy povysheniya ehffektivnosti i bezopasnosti ehkspluatatsii gornoshahtnogo i neftepromyslovogo oborudovaniya* [Urgent problems of improving the efficiency and safe operation of oil mining equipment]. 2016, no. 1, pp. 236–242. (In Russian)
21. N.A. Korolev and S.V. Solov'ev. AC motor diagnostics system based on complex parametric analysis IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; Tomsk; 2016; Vol. 177. conference 1. Available at: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/177/1/012007>.
22. Zarickij S.P. *Diagnostika gazoperekachivayushchih agregatov* [Diagnostics of gas compressor units]. Moscow, Gulibkin University of oil and gas, 2003. 598 p.
23. Antropov P.G., Dolina O.N., Shvarc A.Yu. A method of fault diagnostics of gas compressor units using hybrid intelligent systems. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aehrokosmicheskogo universiteta* [Vestnik of Samara state air-space university]. 2014, no. 5(47), pp. 75–84. (In Russian)

Бабанова И.С., Жуковский Ю.Л., Королев Н.А. Способ управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и оценки технического состояния электроприводного газоперекачивающего агрегата // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 3(36). С. 47–54. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-47-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-47-54)

Babanova I.S., Zhukovsky Yu.L., Korolev N.A. Method Of Mode Control Based On The Neural Network Fault Diagnosis And Evaluation Of The Technical Condition Of Electrically Driven Gas Pumping Unit. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 47–54. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-47-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-47-54)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В работе рассмотрена статистика отказов лимитирующего оборудования двух цехов дочернего предприятия ОАО «ММК» – ООО «Механоремонтный комплекс» (г. Магнитогорск) – ЦРМО-2 и ОМЦ. Предоставленные данные содержат отказы за 2012–2013 гг., позволяющие определить причину отказа и содержат сведения о времени простоя оборудования. Отказы электрооборудования включают в себя множество отказов, различающихся по объекту и причине отказа. Рассмотрев показатели времени, затрачиваемого на локализацию неисправности и ее устранение, стало возможным найти недостатки существующей системы технического обслуживания и ремонта электрооборудования. Целью данной работы является определение ограничивающих факторов в работе системы технического обслуживания и ремонта, выработка рекомендаций по повышению производственных показателей. На базе статистики были рассмотрены основные причины отказов оборудования и разработана методика диагностирования неисправностей сложных электротехнических систем – многоосевых металлорежущих станков с числовым программным управлением. Металлорежущие станки представляют собой конгломерат различных подсистем, тесно связанных между собой. Данные отказов были распределены по категориям, определены самые трудоемкие и трудновыводимые типы отказов, группы оборудования повышенного риска. Был сделан вывод о целесообразности создания методических указаний по обслуживанию и ремонту электрооборудования. Подобные методические указания позволят повысить уровень подготовки персонала, упростить структуру ремонтно-восстановительных работ. Ожидается снижение времени, затрачиваемого на локализацию и устранение неисправности. Указания были выполнены в виде блок-схем, позволяющих определить тип неисправности и меры по восстановлению работоспособности. В дальнейшем результаты исследования были использованы для создания методического материала, предназначенного персоналу ООО «МПК» для ознакомления и изучения.

Ключевые слова: электропривод, отказ, простой, электроавтоматика, электрооборудование, управляющая электроника, ЧПУ, методика, ТОиР.

ВВЕДЕНИЕ

ООО «Механоремонтный комплекс» является одним из крупнейших металлообрабатывающих предприятий на территории Российской Федерации, деятельность которого направлена на производство сменного оборудования и запасных частей для нужд металлургического и горно-обогатительного производств, изготовление новых агрегатов и деталей, разработку конструкций и их модернизацию. Поставленные перед предприятием задачи требуют наличия значительной технологической базы в виде металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением. Перед техническим персоналом стоит задача поддержания данных станков в исправном состоянии и принятия мер по снижению незапланированных простоев оборудования.

СТАТИСТИКА ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В ходе анализа эксплуатационных данных и систематизации отказов оборудования, наблюдающихся на производственных площадках цехов ООО «МПК», а именно основного механического цеха (ОМЦ) и цеха ремонта металлургического оборудования №2 (ЦРМО-2), общее количество отказов оборудования было сгруппировано по категориям, а также была выведена общая статистика отказов электрооборудования с 2012–2013 гг., которая приведена в **таблице**, а также на **рис. 1**.

Временно-количественные показатели простоев оборудования по электрической части

Год	Количество простоев в год	
	ч-мин	ед.
2012	1772 ч 45 мин	26
2013	1062 ч 20 мин	59

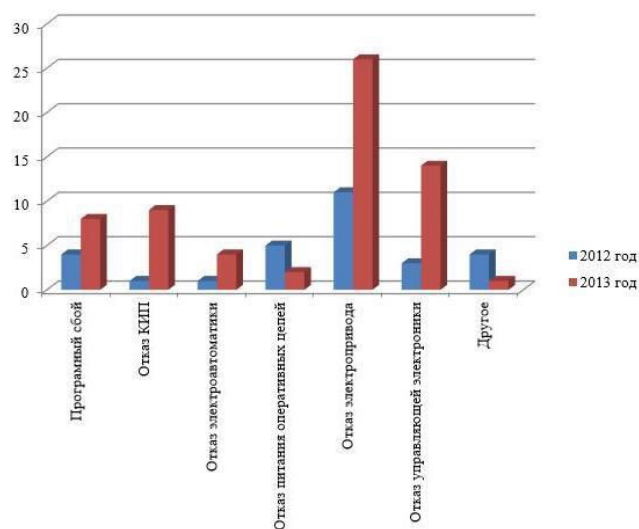


Рис. 1. Диаграмма распределения отказов за 2012–2013 гг.

Из данной диаграммы можно выяснить, что наиболее часто встречающимся видом отказов является отказ электроприводных устройств.

- Значительное число отказов электроприводных устройств случается вследствие вышедших из строя компонентов электроники. Данные отказы могут быть объяснены низкой износоустойчивостью данных компонентов, несоответствии заданных нагрузок номинальным, а также, в ряде случаев, низкой эксплуатационной надежностью примененных схемных решений.

- Среди подгруппы отказов управляющей электроники наибольшее число неисправностей заключается в выходе из строя компонентов управляющих плат, а отказы других типов (программируемых логических контроллеров и другого оборудования) встречаются сравнительно редко.

- Коренной причиной отказов управляющих плат является агрессивная внешняя среда из взвеси воздуха с частицами токопроводящей пыли (металл, графит, и т.д.).

- Отказы контрольно-измерительных приборов и электроавтоматики происходят из-за механических деформаций, возникающих в процессе эксплуатации.

- Программные сбои происходят по причине ошибок, допущенных на этапе проектирования и пусконаладочных работ, а также из-за локального перегрева, вследствие недостаточного кондиционирования и оседания пыли внутри шкафов электрооборудования АСУ ТП.

- Наиболее часто встречающиеся типы отказов силовых устройств – выходы из строя блока питания и трансформатора. Данные отказы возникают по причине несбалансированности электрических сетей, а также, касательно блоков питания, по причине потери электролитическими конденсаторами своих свойств в результате старения.

Стоит отметить, что многие из возникающих неисправностей являются типовыми для данного оборудования и могут быть диагностированы на ранней стадии ремонтно-восстановительных работ. Но существуют определенные особенности, состоящие в сложности и комплексности взаимодействия подсистем современных станков с числовым программным управлением.

Далее был сделан вывод о средней продолжительности ремонтов и рассчитано среднее значение времени на локализацию и поиск конкретной неисправности.

Среднемесячное значение времени, затраченного на устранение неисправностей по электрочасти, составляет 118 ч. Из них непосредственно на диагностику неисправности уходит, в среднем, 34% от общего времени, затраченного на ремонтно-восстановительные работы.

В результате была сформирована методика диагностирования неисправностей станков с ЧПУ. Использование данной методики будет способствовать снижению времени, затраченного на локализацию неисправностей и, следовательно, ускорит ремонтно-восстановительные работы. Как следствие, стоит ожидать снижение издержек предприятия. Помимо этого, целью методического пособия является обучение персонала, занятого на работах по техническому обслуживанию и ремонтах, основным принципам безопасной работы с оборудованием, принципам работы подотчетного оборудования, а также повышение культуры производства.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ДИАГНОСТИКЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ СТАНКОВ ЧПУ

Методические указания представляют собой дидактический материал в виде рекомендаций и набор блок-схем для более наглядного восприятия информации. Данный материал будет распространяться в печатном и электронном виде для персонала ТООИР. В дальнейшем планируется создание электронного ассистента для мобильных устройств.

Для диагностики и ремонта станков с ЧПУ необходимо представлять, что подобные системы из себя представляют. Станки с ЧПУ – это конгломерат различных подсистем, таких как электроприводные системы постоянного и/или переменного тока, программируемые логические контроллеры, аппараты визуализации, компоненты электроавтоматики, устройства ввода/вывода, автоматизированные системы управления и интерполяторы (или модули числового программного управления), которые берут на себя всю аналитическую часть расчетов по совместной одно-временной работе всех подсистем.

Предлагаемая концепция развивает идею работы с подотчетным оборудованием, «от простого к сложному», от основополагающего к частному. Для реализации методического пособия необходимо обеспечение персонала ТООИР всей справочной информацией и инструментами диагностики. Все работы выполняются в порядке текущей эксплуатации по заявке от службы Заказчика или по заданию непосредственного руководителя.

Приступая к диагностическим операциям, персоналу надлежит придерживаться определенных обязательных правил:

- Приступая к диагностике, необходимо провести опрос технологического персонала (выяснить, что конкретно неисправно, в чем это выражается, при каких обстоятельствах возник данный отказ).

- Обязательно перед началом работ вывесить плакат «Ремонт», либо «Наладка», либо «Не включать, работают люди».

- Без включения станка необходимо подвергнуть тщательному внешнему осмотру шкаф автоматики и «подозрительные» узлы станка.

- Диагностику аппаратной части станка принято начинать с проверки цепей питания (выбило ли автоматы, не сгорели ли предохранители, работают ли блоки питания, соответствует ли уровень напряжения требуемому).

- Включать «вводной» автомат можно, только убедившись, что это безопасно.

- Если загрузка ЧПУ проходит штатно и полностью, необходимо указать оператору на демонстрацию того, в чем именно выражается проблема.

- Всегда при каждом новом действии следует отдавать себе отчет в том, что это будет безопасно. В случае сомнений необходимо обратиться к руководителю.

- В работе не стоит полагаться на указатели напряжения, дающие лишь поверхностную информацию о наличии напряжения в цепи, необходимо пользоваться мультиметром.

- Проверку электродвигателей необходимо выполнять с применением мегаомметра.

- При ошибках осей необходимо учитывать, что системы измерения местоположения рабочих органов станка зачастую включают в себя не один активный датчик на ось, а несколько.

- Необходимо разделить возможные программные ошибки и аппаратные. Программные ошибки могут возникать на низком уровне, т.е. в микросхемах с базовыми данными, загрузочных микросхемах памяти, микросхемах, в которых прописана оболочка системы, т.е. то, что нельзя исправить имеющимися в комплекте с ЧПУ средствами. Также программные ошибки могут появляться в программах электроавтоматики, в параметрах осей, файлах корректоров, машинных данных. Наконец, ошибки программного характера могут возникать в управляющих программах, которые записываются технологическим персоналом. Аппаратные ошибки связаны с загрязненностью и перегревом, плохим контактом, выходом из строя активных компонентов электроники, конденсаторов, диодов, диодных сборок, сборок Дарлингтона и т.д.

Методические указания представлены преимущественно в виде блок-схем, пример которых указан на рис. 2.

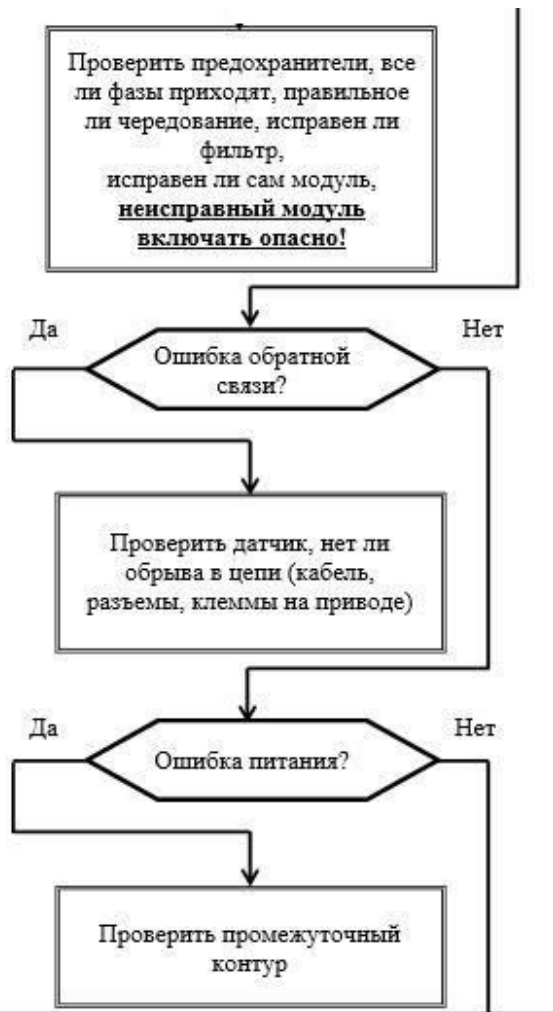


Рис. 2. Фрагмент блок-схемы методики диагностирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была составлена статистика отказов электрооборудования, отказы были отсортированы по типам, указаны ключевые причины отказов. Было подтверждено наличие ограничивающих факторов в виде существенных затрат времени на локализацию неисправностей. В результате анализа показателей отказов электрооборудования была выявлена возможность улучшения показателей путем создания методических указаний для персонала ТООиР. Следование алгоритму действий, приведенному в методических материалах,

позволит сократить время простоя оборудования в условиях дефицита квалифицированных технических специалистов, за счет сокращения времени, затрачиваемого на локализацию конкретной неисправности, что, в конечном итоге, приведет к улучшению экономических показателей и эффективности работы системы ТООиР на предприятии. Также изучение методических материалов позволит повысить уровень подготовки рабочего персонала, снизить количество ошибок при ремонтно-восстановительных работах. Ожидаемое сокращение времени на поиск и локализацию неисправности составит до 6% в каждом конкретном случае. Дальнейшее снижение времени маловероятно по причине сложности включения в методические материалы детализированной информации по каждому типу оборудования. Это ограничение возможно обойти, перейдя на электронную версию методических материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Купцов В.В., Петушков М.Ю., Сарваров А.С. Современные методы диагностирования асинхронных двигателей и их развитие: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. 247 с.
2. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / Лукьянов С.И., Карандаев С.А., Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Храмышев В.Р. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 129–136.
3. Белоусов О.С., Кузнецов Е.В., Петушков М.Ю., Комплексная цифровая диагностика промышленного оборудования в режиме реального времени // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2013. Т. 2. №71. С. 30–32.
4. Белоусов О.С., Петушков М.Ю., Щербина Д.В. Проблемы эксплуатации компонентов электроники станков с числовым программным управлением // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2014. Т.2. С. 124–127.
5. Соломенцев Ю.М., Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Построение персональных систем ЧПУ (PCNC) по принципу открытых систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 1997. №3. С. 68–75.
6. Технические средства диагностирования: справочник / Клюев В.В., Пархоменко П.П., Абрамчук В.Е. и др.; под общ. ред. Клюева В.В. М.: Машиностроение, 1989. 672 с.
7. Костюков А.В., Костюков В.Н. Повышение операционной эффективности предприятий на основе мониторинга в реальном времени. М.: Машиностроение, 2009. 192 с.

Поступила в редакцию 16 июня 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DIAGNOSIS METHODOLOGY FOR ELECTRICAL COMPONENTS OF CNC MACHINES

Oleg S. Belousov

Postgraduate Student, Power Engineering And Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk Russia.

Mikhail Y. Petushkov

D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of electronics and microelectronics department, Power Engineering And Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk Russia.

Dmitriy V. Shcherbina

Postgraduate Student, Power Engineering And Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk Russia.

This article considers statistics of failures for limiting equipment. The examined equipment is stationed in two workshops (“CRMO-1” and “ОМС”) of LLC “Mekhanoremontniy complex” – a subsidiary company of OJSC “Magnitogorsk Iron & Steel Works”. The represented data covers failures of electrical equipment during 2012-2013 and allows us to establish causes of failures and contains data of maintenance and repair time. Failures of electrical equipment consist of multiple failures, which differ from each other by type and cause. After analyzing the time spent for localizing and eliminating failures, it became possible to determine disadvantages of the current system of maintenance and repair. The main purposes of this article are to determine bottlenecks in the current system of maintenance and repair, to provide recommendations to improve performance. The main causes of electrical failures were defined based on that statistics. As a result, it became possible to develop a diagnosis methodology for identifying failures within complex electrotechnical systems – such as multi-axis metal-cutting CNC machines. Metal-cutting CNC machines represent a conglomerate of different subsystems united between themselves. Failures were categorized in types, most difficult and time-consuming, which types of equipment were most vulnerable. It was proposed to create a guidance books about maintenance and repair of such equipment. Such guidance would improve the level of training for personnel and streamline the structure of repairs. It is expected that idle time would decrease. Aforementioned guidances were created in the form of flowcharts, which help to determine type of failure and front of repairs. The result of this research would be used to create a guidance book for the personnel of LLC “Mekhanoremontniy complex” for review and training.

Keywords: Electrical drive, failure, idle time, electrics, electrical equipment, control electronics, CNC, methodology, maintenance and repairs.

REFERENCES

1. Kuptsov V.V., Petushkov M.Y., Sarvarov A.S. *Sovremennye metody diagnostirovaniya asynkhronnykh drigatelei i ih razvitiye* [Modern methods of diagnosis for asynchronous drives and their development]. Magnitogorsk, NMSTU, 2010, 247 p. (In Russian)
2. Lukianov S.I., Karandaev S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Y., Khrumshin V.R. Developing and implementing of intellectual diagnostic system for technical condition of electrical equipment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1, pp. 129–136 (In Russian)
3. Belousov O.S., Kuznyakov E.V., Petushkov M.Y. Complex real-time diagnostics of industrial equipment. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Actual problems of modern science, technology and education]. 2013, part 2, no. 71, pp. 30–32 (In Russian)
4. Belousov O.S., Petushkov M.U., Shcherbina D.V. Operational problems of electronics in CNC machines. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Actual problems of modern science, technology and education]. 2014, part 2, pp. 124–127 (In Russian)
5. Solomentsev U.M., Sosonkin V.L., Martinov G.M. Development of PCNC based on open systems. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitelnye sistemy* [Information technology and computer systems] 1997, no. 3, pp. 68–75 (In Russian)
6. Kluev V.V., Parhomenko P.P., Abramchuk V.E. *Tekhnicheskiye sredstva diagnostirovaniya* [Technical methods of diagnostics]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1982, 672 p. (in Russian)
7. Kostukov A.V., Kostukov V.N. *Povisheniye operatsionnoy effektivnosti predpriyatiy na osnove monitoringa v realnom vremeni* [Increasing of operational effectiveness for enterprises based on real-time monitoring]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2009, 192 p. (In Russian)

Белузов О.С., Петушков М.Ю., Щербина Д.В. Разработка методики диагностики электрической части станков с числовым программным управлением // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 3(36). С. 55–58. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-55-58](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-55-58)

Belousov O.S., Petushkov M.Y., Shcherbina D.V. Diagnosis Methodology For Electrical Components Of Cnc Machines. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 55–58. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-55-58](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-55-58)

ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.771.066:004.9

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-59-65](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-59-65)Логунова О.С.¹, Кухта Ю.Б.¹, Кожушков Е.Ю.², Хакимуллин К.³¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова² ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»³ Hosokawa kolb GMBH (Германия)ПРОГРАММНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗНОСА БОЧКИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Целью исследования является развитие теории математического моделирования для описания процессов, протекающих при обработке металлов давлением и разработка программного обеспечения для проведения экспериментальных исследований с целью определения особенностей износа бочки опорного вала прокатных станов; определение зависимости для описания формы образующей бочки вала с учетом его износа; уточнение математической модели Мельцера-Салганика с учетом износа бочки опорного вала. Авторами предложено векторное уравнение для описания образующей бочки вала с учетом его износа. При исследовании применялись методы системного анализа для изучения неравномерного износа бочки опорного вала, методы статистического анализа для выявления причинно-следственных взаимосвязей, методы построения детерминированных моделей для описания профиля полосы, объектно-ориентированного программирования для разработки основных модулей и интерфейса программного обеспечения. На основе алгоритмических решений разработаны программные продукты для выполнения вычислительного эксперимента при определении характера износа бочки валков. Результаты вычислительного эксперимента показали расхождение с производственными измерениями не более 3% и позволили выработать рекомендации по изменению значений технологических параметров, которые компенсировали негативное влияние износа опорных валков при производстве горячекатаного проката.

Ключевые слова: математическое моделирование, программное обеспечение, алгоритмы определения профиля, программная реализация, форма образующей опорного прокатного вала, математическая модель износа, моделирование деформаций и нагрузок валковой системы кварто

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире математические модели являются одним из мощнейших инструментов изучения процессов и явлений. Не являются исключением и процессы металлургического производства. Условия протекания металлургических процессов не позволяют выполнить прямые измерения изучаемых параметров, поэтому активно развиваются математические модели [1–3] и средства их реализации в виде программных продуктов для проведения вычислительных экспериментов [4–7]. Наличие развитого математического аппарата позволяет использовать результаты моделирования в системах интеллектуальной поддержки принятия решения при управлении процессами [8–10].

В работе представлены математическая модель и результаты моделирования износа бочки опорных прокатных валков, которые используются в процессе обработки металлов давлением. Востребованность продукции прокатного производства высока и важна для экономики Российской Федерации. В качестве основных примеров востребованности можно указать «Южный поток» – проект транснационального газопровода, который разрабатывается в целях диверсификации маршрутов поставок природного газа европейским потребителям и предполагает доставку голубого топлива через акваторию Черного моря в страны Южной и Центральной Европы; «Скверный поток» – экспортный газопровод из России в Европу через Балтийское море.

В настоящее время известно множество работ российских и зарубежных авторов, которые рассматривают:

– модели нагрузок и деформаций валкового узла, с учетом усилия прокатки, ширины полосы, диаметра

вала авторов А.И. Целикова, П.И. Грудева, С.С. Чепуркина и др. [11–13];

– матрично-векторную математическую модель нагрузок и деформаций валковых систем «кварто» Мельцера-Салганика [14–16], в которой все геометрические и силовые величины представлены дискретно;

– стохастические модели прогнозирования износа бочки прокатных валков А. Будаквы, Э. Н. Шебаниц, Л.И. Боровиком и др. [17–20].

Представляемая модель включает:

– математическую модель износа поверхностей бочек опорных валков чистовой группы клеток широкополосного стана горячей прокатки, отличающуюся от ранее известных наличием параметров, описывающих динамику изменения формы активной образующей опорных валков с учетом симметричной схемы нагружения валковой системы и возможностью получения информации о текущей форме активной образующей;

– математическую модель нагрузок деформаций валковой системы, которая дополнена описанием износа поверхности бочек опорных валков и определением формы поперечного профиля полосы и ее плоскостности с учетом износа на основе косвенных измерений.

Для проведения вычислительного эксперимента по изучению износа бочки опорного вала разработан алгоритм и программное обеспечение, позволяющие использовать сведения о предшествующих графиках произведенного металлопроката для моделирования формы активных образующих опорных валков, прогнозировать образование возможных дефектов геометрии полосы до начала процесса производства.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗНОСА ПОВЕРХНОСТИ
БОЧКИ ОПОРНОГО ПРОКАТНОГО ВАЛКА

Для построения математической модели износа поверхности бочки опорного прокатного вала введем определение.

Df 1. Профиль прокатного вала – это образующая цилиндрической поверхности бочки рабочего вала. [20]

Идеальной с точки зрения точности технологического процесса является прямоугольная форма поперечного сечения (рис. 1, а). Однако практический опыт показывает, что необходима небольшая выпуклость, составляющая 1–2% номинальной толщины полосы (рис. 1, б). Идеальный поперечный профиль горячекатаного подката является двояковыпуклым и симметричным относительно продольной оси. На практике имеют место всевозможные отклонения формы профиля от идеальной. Например, «клиновидность» (разность толщин правой и левой кромок, рис. 1, в) или «вогнутость» (толщина кромок листа больше середины, рис. 1, г).

Основной показатель для оценки плоскостности полосы определяется как:

$$A = \max_{i=1,n} \{A_i\} \text{ при } A_i = |y_{1i} - y_{2i}|, \quad (1)$$

где A – показатель плоскостности полосы, мм; A_i – показатель плоскостности в i -ой точке поверхности полосы, мм; i – номер точки в разбиении поверхности полосы на равные интервалы; n – количество точек в разбиении поверхности полосы на равные интервалы; y_1, y_2 – координаты i -ых точек поверхности полосы и бочки вала (рис. 2).

Df 2. Профиль полосы – средняя величина зазора между поверхностью полосы и бочки вала, характеризующая расстояние между поверхностью полосы и поверхностью бочки вала.

Одна из методик описания профиля полосы использует формулу.

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i. \quad (2)$$

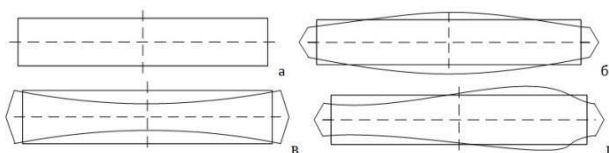


Рис. 1. Профили прокатного вала:
а – идеальный поперечный; б – выпуклый;
в – клиновидный; г – вогнутый

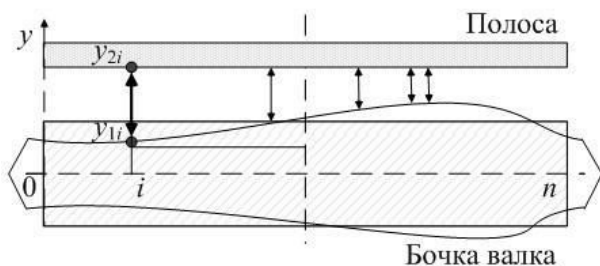


Рис. 2. Схема расчета показателя плоскостности полосы

В производственных условиях оценку профиля полосы производят по замерам ее толщины в нескольких точках, относящихся к середине полосы и участкам кромок. Допускаются незначительные отклонения поперечного профиля полосы, которые регламентируются нормативными документами предприятия, а также требованиями государственных стандартов [21].

Согласно проведенным исследованиям методика прогнозирования истирания поверхности бочки опорного вала базируется на следующих допущениях:

- 1) допускается использование симметричной схемы при прогнозировании износа опорного вала относительно вертикальной оси;
- 2) при построении уравнения для описания профиля полосы достаточно учесть неравномерный характер распределения износа по длине бочки опорного вала.

По результатам проведенного эмпирического исследования предложено уравнение для описания образующей бочки вала с учетом его износа:

$$\vec{Z}_w = Q \cdot \left[\vec{K}_w - \vec{K}_w \cdot \left(1 - \frac{12 \cdot \vec{x}^2}{b^2 \cdot K_{ld}^2} \right) \right]; \quad (3)$$

$$\vec{x} = \frac{1}{n} \left(0, 1, 2, \dots, \frac{b}{l}, \dots, 2b \right), i = \overline{0, n},$$

где $\vec{Z}_w$ – функция для описания формы поверхности вала; x_i – абсциссы точки узлов при разбиении поверхности вала на равные отрезки (см. рис. 2); Q – длина прокатываемой полосы, м; b – половина ширины прокатываемой полосы, м; l – половина длины бочки опорного вала, м; K_{ld} – половина длины межвалкового контакта (протяженность области соприкосновения рабочего и опорного вала), м; $\vec{K}_w$ – вектор коэффициентов интенсивности износа бочки вала, м/км; $\vec{x}$ – вектор столбец, содержащий значения абсцисс точек разбиения.

В формуле (3) полагается, что коэффициент интенсивности износа изменяет значение по длине образующей бочки вала. Наибольшее значение коэффициента интенсивности износа достигается в центре при $x=b/l$, а наименьшее – на концах отрезка образующей. На остальных участках образующей принимаются усредненные значения коэффициента интенсивности износа бочки вала.

Величина коэффициента интенсивности износа бочки вала определяется в зависимости от количества произведенного проката за кампанию валков. Числовое значение определяется программно по результатам обработки экспериментальных данных о сортаменте проката каждой кампании валков.

Отличительными особенностями математической модели для описания образующей бочки вала с учетом износа (3) от ранее известных являются:

- использование квадратичной параболы для описания образующей бочки вала, что с высокой точностью подтверждено экспериментальными исследованиями;
- определение величины износа в каждой равноудаленной точки x_i , расположенной вдоль поверхности

бочки вала, по аналитической зависимости;

– введение эмпирического коэффициента интенсивности износа бочки вала.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРУЗОК И ДЕФОРМАЦИЙ ВАЛКОВОЙ СИСТЕМЫ КВАРТО

Известна и активно применяется для описания нагрузок, деформаций и анализа профиля полос модель Мельцера-Салганика [14, 15]. Модель предполагает, что в качестве исходных данных используется профиль вала, который остается постоянным на протяжении всего периода работы в течение 10–14 дней. Такое допущение снижает точность прогнозирования профиля готовой полосы. Модель Мельцера-Салганика [22] дополнена динамическими параметрами износа бочки вала.

Искомый вектор для профиля выходящей из клетки полосы определяется по соотношению:

$$\delta \vec{h} = \left[1 - \frac{K_e}{K_c} \right] \cdot E \cdot (\vec{y}_{w1} + \vec{y}_{w2} - \vec{z}_{w1} - \vec{z}_{w2}) + \frac{K_e}{K_c} \cdot E \cdot \delta \vec{H}, \quad (4)$$

где исходные данные определяются по следующим выражениям:

$$\vec{y}_{w1} = \vec{y}'_{w1} + M_{A1} \cdot (\vec{z}_{w1} + \vec{Z}_w + \vec{y}_{w1} + \vec{y}_{s1}) + M_B \cdot (\vec{y}_{w1} + \vec{y}_{w2} - \vec{z}_{w1} - \vec{z}_{w2} - \delta \vec{H}), \quad (5)$$

$$\vec{y}_{w2} = \vec{y}'_{w2} + M_{A2} \cdot (\vec{z}_{w2} + \vec{Z}_w + \vec{y}_{w2} + \vec{y}_{s2}) + M_B \cdot (\vec{y}_{w1} + \vec{y}_{w2} - \vec{z}_{w1} - \vec{z}_{w2} - \delta \vec{H}), \quad (6)$$

$$\vec{y}_{s1} = \vec{y}'_{s1} + M_1 \cdot (\vec{z}_{w1} + \vec{Z}_w + \vec{y}_{w1} + \vec{y}_{s1}), \quad (7)$$

$$\vec{y}_{s2} = \vec{y}'_{s2} + M_2 \cdot (\vec{z}_{w2} + \vec{Z}_w + \vec{y}_{w2} + \vec{y}_{s2}), \quad (8)$$

$$\vec{p} = P \cdot \vec{l} / l - B \cdot (\vec{y}_{w1} + \vec{y}_{w2} - \vec{z}_{w1} - \vec{z}_{w2} - \delta \vec{H}), \quad (9)$$

$$\vec{q}_1 = \frac{(P+F)}{l} \vec{l} + A_1 \cdot (\vec{z}_{w1} + \vec{Z}_w + \vec{y}_{w1} + \vec{y}_{s1}), \quad (10)$$

$$\vec{q}_2 = \frac{(P+F)}{l} \vec{l} + A_2 \cdot (\vec{z}_{w2} + \vec{Z}_w + \vec{y}_{w2} + \vec{y}_{s2}), \quad (11)$$

где P – половина усилия прокатки, Н; F – регулирующая сила (усилие противоизгиба), Н; R – реакция нажимного винта (опорная реакция), Н; K_c – коэффициент упругой податливости рабочих валков, кН/мм², K_e – эффективный коэффициент податливости, кН/мм²; $\vec{y}_{s1}$, $\vec{y}_{s2}$ – векторы прогибов опорных валков (верхнего и нижнего соответственно); $\vec{y}_{w1}$, $\vec{y}_{w2}$ – векторы прогибов рабочих валков (верхнего и нижнего соответственно); $\vec{z}_{w1}$, $\vec{z}_{w2}$ – векторы, зада-

ющие форму образующей рабочего вала; $\vec{q}_1$, $\vec{q}_2$ – векторы межвалкового давления; $\vec{p}$ – вектор погонного давления; $\delta \vec{H}$ – вектор профиля входящей в клетку полосы; $\delta \vec{h}$ – вектор профиля выходящей из клетки полосы; E – единичная матрица; $\vec{y}'_{w1}$, $\vec{y}'_{w2}$ – составляющие прогибов верхнего и нижнего рабочих валков; $\vec{y}'_{s1}$, $\vec{y}'_{s2}$ – составляющие прогибов верхнего и нижнего опорных валков; A_1 , A_2 , B – матричные множители, которые представлены в виде единичных матриц разных порядков с размерностью, определяемой полушириной полосы и полудлиной межвалкового контакта и, например, матрица податливости вала изгибающему моменту B является трехдиагональной и имеет вид:

$$B = \frac{l}{n \cdot 6 \cdot E_s \cdot J_s} + \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 2 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где n – число разбиений длины бочки вала; l – половина длины бочки вала; E_s – модуль Юнга I рода; J_s – осевой момент инерции; M_{A1} , M_{A2} , M_B , M_1 , M_2 – матричные множители, которые входят в выражения для определения прогибов рабочих и опорных валков соответственно.

Уравнения (5)–(8) описывают деформации валков во взаимосвязи с основными геометрическими характеристиками: текущие профилировки валков; поперечная разнотолщинность прокатываемой полосы на входе и выходе из клетки. Уравнение прогиба каждого вала показывает зависимость в явном виде от прогибов соседних валков, с которыми он находится в непосредственном контакте или взаимодействует через полосу. Уравнения системы (9)–(11) характеризуют распределения сплошных нагрузок, действующих на валки. Эти распределения зависят от деформаций и текущих профилей валков, а также от профиля прокатываемой полосы.

Таким образом, получена уточненная математическая модель (3)–(11) для прямой задачи, которая используется для получения вектора, характеризующего профиль поперечного сечения полосы на выходе из клетки (4) с учетом динамической деформацией валков и распределенной нагрузки (3).

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Для реализации математической модели и проведения вычислительного эксперимента разработаны программные продукты [23–25], в основе которых лежат новые алгоритмические решения. На рис. 3 представлена обобщенная схема работы программных модулей, которые включают прогнозирование профиля опорных валков согласно математической модели (3)–(11).

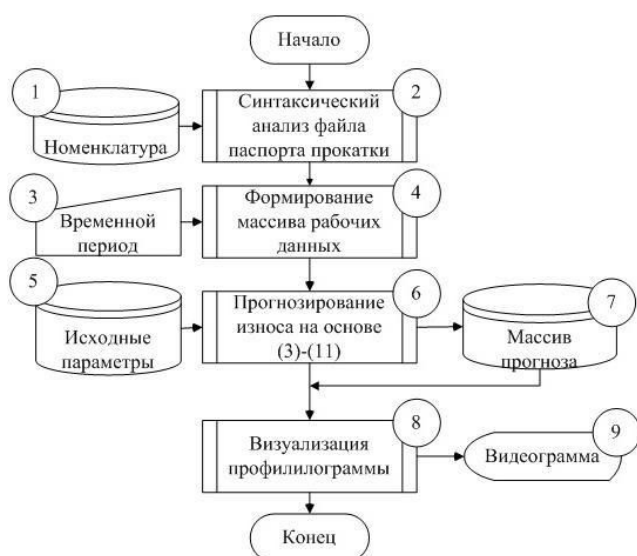


Рис. 3. Обобщенная схема работы программных моделей для прогнозирования профиля валков

На рис. 3 введены блоки:

- блок 1: носитель информации в корпоративной сети ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», хранящий сортамент выпущенной продукции;
- блок 2: программный модуль для синтаксического разбора паспорта прокатки, загружаемого из корпоративного Хранилища в формате HTML;
- блок 3: интерактивное определение периода времени, за которое необходимо обработать данные о готовой продукции;
- блок 4: структурирование и обработка информации о параметрах и количестве произведенного проката;
- блок 5: инициализация основных переменных и их значений для последующих расчетов;
- блок 6: реализация основных функций, основанных на методике определения текущей формы образующих опорных валков клетки «кварто»;
- блок 7: процедура сохранения расчетных значений в базу данных для дальнейшего использования;
- блок 8: построение диаграмм, отображающих текущий профиль валков (профилилограммы);
- блок 9: определение и визуализация текущего профиля и плоскостности полосы с учетом текущего износа опорных валков.

Алгоритм анализа данных следующий:

- 1) рассчитать общий километраж прокатанных полос за каждую кампанию;
- 2) вычислить среднюю величину износа по (2), обобщив замеренные данные по всем валкам;
- 3) для прогнозирования износа опорных валков определить значение коэффициента K_w для каждой зоны валка с характерной степенью интенсивности износа, сформировав вектор значений;
- 4) оценить уровень износа опорного прокатного валка в соответствии с моделью (3)–(9);
- 5) сформировать рекомендации по компенсации негативного влияния искажения формы активной образующей на качество трубного проката с использованием программного продукта [24] (рис. 4).

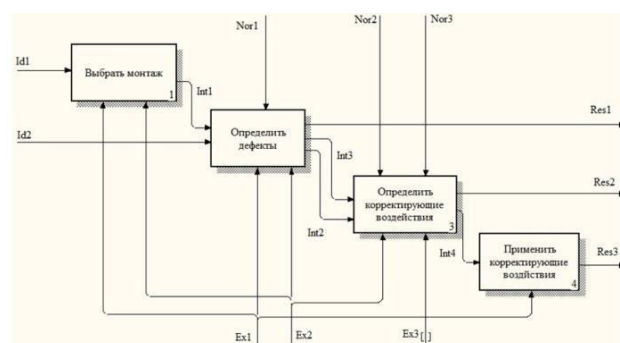


Рис. 4. Схема декомпозиции работы модуля «Профиль проката»

Номенклатура обозначений на рис. 4 приведена в таблице.

Номенклатура обозначений

№	Обозначение	Полное наименование
1	Id1	Информация о плане выпуска продукции (монтаж)
2	Id2	Информация о количестве партий в монтаже
3	Ex1	Оператор чистой группы клеток
4	Ex2	Технолог научно-технического центра
5	Ex3	Программное обеспечение
6	Res1	Информация о количестве дефектов
7	Res2	Перечень изменяемых технологических параметров
8	Res3	Перечень партий, которые готовы к обработке
9	Nor1	Математическая модель для описания нагрузок, деформаций и профиля полосы
10	Nor2	ГОСТ 19903. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент
11	Nor3	Технологическая инструкция 101-Я-378-2004 «Производство проката из стали марок 17ГС 17Г1С, 17Г1С-У на станах 2000,2500 горячей прокатки»
12	Int1	Перечень партий монтажа
13	Int2	Параметры дефектов
14	Int3	Перечень партий с дефектами
15	Int4	Новые значения технологических параметров

Результатом работы алгоритмов является вектор, характеризующий профиль рабочих валков, который позволяет компенсировать текущий износ опорных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ИЗНОСА БОЧКИ ПРОКАТНОГО ВАЛКА

Для выработки рекомендаций по изменению значений технологических параметров производства горячекатаного листового металлопроката проведен многочисленный вычислительный эксперимент. На рис. 5–7 представлены виды рабочих окон программного продукта при выполнении моделирования на основе (3)–(11).

ОО	Время проката	Партия	Плоская	Марка	Контр.	ГОСТ	Р.г.м.	Посад			Прокат			Цех	Налик	Рас. кол.		
								Профиль	Рис.	шт	Вес	Профиль	Длина				шт	
11.04.2.4	46106	223585	Обс			ГОСТ 9045-93		250x1260x100	12.63	2	25.26	400 x 1300	0.6	2	34.62	ЛПЦ-4	8	1.0239
11.04.2.4	46107	236030	Обс	5		ГОСТ 16523-97		250x1250x300	12.75	5	63.79	300 x 1230	2.11	5	62.23	ЛПЦ-4	8	1.0249
11.04.2.4	46108	236030	Обс	5		ГОСТ 16523-97		250x1250x300	12.75	10	127.58	300 x 1230	4.23	10	124.47	ЛПЦ-4	8	1.0249
11.04.2.4	46109	125236	М			СТО ММК 202-2005		250x280x100	12.63	2	25.26	500 x 1300	0.47	2	34.19	ЛПЦ-4	8	1.0239
11.04.2.4	46110	232639	Обс			ГОСТ 9045-93		250x1250x300	12.72	5	63.6	700 x 1270	0.89	5	61.99	ЛПЦ-8	8	1.0239

Рис. 5. Вид рабочего окна с исходными данными после синтаксического анализа паспорта партии

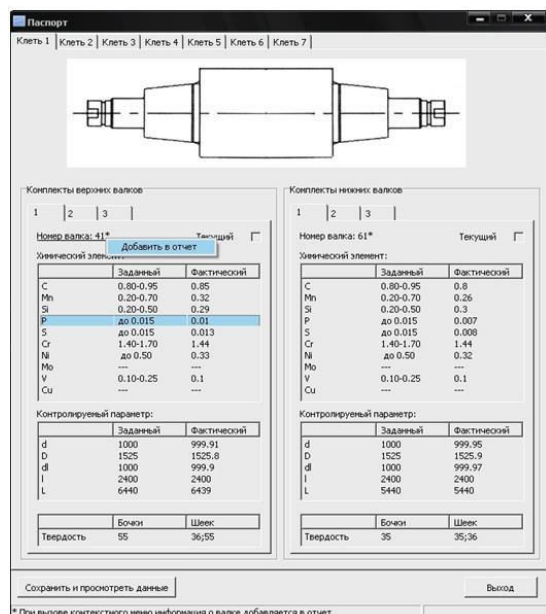


Рис. 6. Вид рабочего окна программного модуля для отображения и коррекции данных по паспорту вала прокатного стана

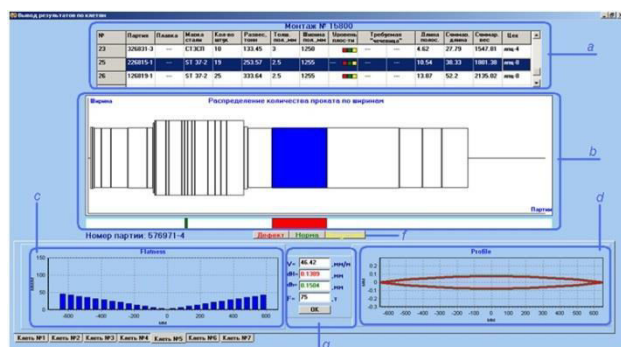


Рис. 7. Вид рабочего окна программного модуля для отображения результатов моделирования: а – перечень плановых партий полос; б – графическое отображение ширины полос в кампании; с – диаграмма плоскостности полосы; d – диаграмма поперечного профиля полосы; g – значения рекомендуемых технологических параметров; f – сигнальная информация

На рис. 8 представлены результаты математического моделирования формы образующей верхнего опорного вала в девятой клетке широкополосного стана горячей прокатки 2500 ПАО «ММК».

Расхождение результатов математического моделирования и экспериментального исследования профилей валков составили в среднем не более 10%. Практическое использование методики прогнозирования изменения профиля опорных валков показало, что точность расчетов является достаточной для определения корректирующих воздействий, позволяющих устранить негативное влияние изменения профиля опорных валков при производстве листового проката и повысить качество готовой продукции.

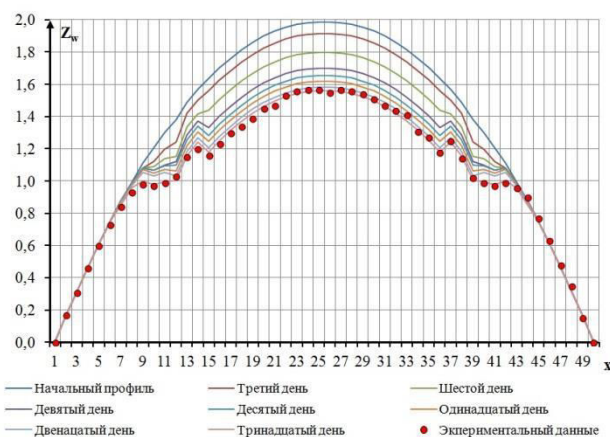


Рис. 8. Результаты математического моделирования формы образующей верхнего опорного вала в девятой клетке (профилограмма)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты анализа существующих разработок показали наличие множества математических моделей для прогнозирования профиля рабочих валков прокатных станов. Однако ни одна из существующих моделей не рассматривала значение коэффициента износа валков как вектор значений по длине объекта.

2. Для модели Мельцера-Салганика [22] введено дополнение в виде динамических параметров износа бочки вала по его длине.

3. На основе алгоритмических решений разработаны программные продукты для выполнения вычислительного эксперимента износа бочки валков. Результаты вычислительного эксперимента показали расхождение с производственными измерениями не более 3% и позволили выработать рекомендации по изменению значений технологических параметров в реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Christian Brecher, Denis Özdemir. Mathematical modeling of rolling production technology. Springer, 2016, p. 1104.
- R. Fabik, J. Kliber, I. Mamuzić, T. Kubina, S.A. Aksenov. Mathematical modelling of flat and long hot rolling based on finite element methods (fem). METABK 51. 2012, no. 3, pp. 341–344.
- Abeyrathna B, Rolfe B, Hodgson P, Weiss M. An extension of the flower pattern diagram for roll forming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015, pp. 1–13.
- Бродский Ю.И., Мягков А.Н. Декларативное и императивное программирование в имитационном моделировании сложных многокомпонентных систем // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. Т. 2. № 2. С. 33.
- Lindgren M. An improved model for the longitudinal peak strain in the flange of a rollformed U-channel developed by FE-analyses. Steel Research International, 2007, no. 78 (1), pp. 82–87.
- Bin Su, Qingxian Ma and, Zhiqiang Han. Modeling of Austenite Decomposition during Continuous Cooling Process in Heat Treatment of Hypoeutectoid Steel with Cellular Automaton Method. ISIJ International, 2014, no. 54 (2), pp. 422–429.
- Ed. Erika Ábrahám, Klaus Havelund. Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems - 20th International Conference, TACAS 2014, Held as Part of the European Joint Conferences on Theory and Practice of Software, ETAPS, 2014, no. 3, pp. 75–83.
- Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A., Luk'ynov S.I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet pro-

- duction control processes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, no. 74(9–12), pp. 1407–1418.
9. Safonov D.S., Logunova O.S., Chistiakov D.V. Optimization of nozzle layout in continuous casting machine. Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software, 2016, no. 9(1), pp. 114–122.
 10. Tutarova V.D., Logunova O.S. Surface temperature analysis of continuously cast ingot outside air/water cooling zone. Steel in Translation, 1998, no 28 (8), pp. 18–20.
 11. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. М.: Металлургиздат, 1958. 432 с.
 12. Грудев П.И.. Обработка металлов давлением. М.: Металлургиздат, 1953. 223 с.
 13. Чепуркин С.С. Производство и обработка стали: науч. тр. / ЖдМИ. М.: Металлургиздат, 1960. № 5. С. 346–371.
 14. Salganik V. Mathematical modeling of roll load and deformation in a four-high strip mill. Metal Forming, 2002, no. 2, pp. 103–107.
 15. Виер И.В., Салганик В.М., Полецков П.П. Математическое моделирование деформаций и нагрузок валковой системы кварто с учетом асимметричных случаев процесса прокатки // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: межрегион. сб. науч. трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2002. С. 78–86.
 16. Winkler W. DR-Ing. Dissertation der TH Aachen. 1941. 230 pp.
 17. Профилирование валков листовых станов / Будакова А.А., Коновалов Ю.В., Ткалич К.Н. и др. К.: Техника, 1986. 190 с.
 18. Износ опорных валков и изменение шлифовочного профиля рабочих валков дрессировочного стана / Шебаниц Э.Н., Савранский К.Н. и др. // Металлург. 1971. №11. С. 42–43.
 19. Боровик Л.И., Колпаков С.С. Расчет профилировки валков тонколистовых станов с учетом износа опорных валков // Сталь. 1987. №12. С. 44–47.
 20. Лякишев Н.П. Энциклопедический словарь по металлургии. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 412 с.
 21. ГОСТ 19903-74. Сталь листовая горячекатаная. Сортамент. М.: Стандартинформ, 2003. 31 с.
 22. Управление качеством горячекатаного проката по профилю и плоскостности на базе использования автоматизированной системы / Салганик В.М., Полецков П.П., Кухта Ю.Б., Егорова Л.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №1. С. 59–62.
 23. Свидетельство № 2015663617. Программа для определения деформации прокатных валков / Кухта Ю.Б., Егорова Л.Г. ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности», Федеральная служба по интеллектуальной собственности, Государственная регистрация программ для ЭВМ, № 2015660450 ; заявл. 02.11.2015 ; зарегистрир. 20.02.2016.
 24. Свидетельство № 2015663617. Программа определения режимов обжатий в клетях на широкополосном стане горячей прокатки / Кухта Ю.Б., Егорова Л.Г. ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности», Федеральная служба по интеллектуальной собственности, Государственная регистрация программ для ЭВМ, № 2015660448 ; заявл. 02.11.2015 ; зарегистрир. 20.02.2016.
 25. Свидетельство № 2014618081. Программа определения режимов обжатий в клетях на широкополосном стане горячей прокатки / Полецков П.П., Кухта Ю.Б. ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности», Федеральная служба по интеллектуальной собственности, Государственная регистрация программ для ЭВМ, № 2014615850; заявл. 17.06.2014; зарегистрир. 20.09.2014.

Поступила в редакцию 01 июня 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SOFTWARE AND MATH MODELING OF ROLL BARREL WEAR

Oksana S. Logunova

D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Informatics and Computer Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: logunova66@mail.ru

Iuliia B. Kukhta

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Informatics and Computer Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: perfectumyuka@mail.ru

Evgenii Y. Kozhushkov

Lead Engineer, Scientific and technical center, PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kozhushkov.ey@mmk.ru

Konstantin Khakimullin

Project Engineer, Hosokawa kolb GMBH, Bonn, Germany. E-mail: khakimullin@hosokawa-kolb.de

The aim of the research is to develop the theory of mathematical modeling for describing the processes occurring during the processing of metals by pressure and the development of software for conducting experimental studies to determine the wear characteristics of the roll barrel of rolling mills; determination of the dependence for describing the shape of the barrel forming roll, taking into account its wear; refinement of the mathematical model of Meltzer-Salganika taking into account the wear of the roll of the support roll. The authors proposed a vector equation for describing the barrel forming roller with regard to its wear. The research used methods of system analysis to study the uneven wear of the roll barrel, methods of statistical analysis

to identify cause-effect relationships, methods for constructing deterministic models for describing the profile of the strip, object-oriented programming for the development of basic modules and the software interface. On the basis of algorithmic solutions, software products have been developed to perform a computational experiment to determine the nature of the roll barrel wear. The results of the computational experiment showed a discrepancy with production measurements of no more than 3% and allowed the research group to work out recommendations on changing the values of technological parameters that compensated for the negative effect of wear of the back-up rolls in the production of hot-rolled steel.

Keywords: Mathematical modeling, software, profile definition algorithms, software implementation, the form of the forming roll, the mathematical model of wear, the modeling of deformations and loads of the four-high mill stand.

REFERENCES

1. Christian Brecher, Denis Özdemir. Mathematical modeling of rolling production technology. Springer, 2016, p. 1104.
2. Fabík, J. Kliber, I. Mamuzić, T. Kubina, S. A. Aksenov. Mathematical modelling of flat and long hot rolling based on finite element methods (fem). METABK 51, 2012, no. 3, pp. 341–344.
3. Abeyrathna B, Rolfe B, Hodgson P, Weiss M. An extension of the flower pattern diagram for roll forming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, pp. 1–13.
4. Brodsky Yu.I., Myagkov A.N. Declarative and imperative programming in the simulation of complex multicomponent systems. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 2 (2), pp. 33. (In Russian)
5. Lindgren M. An improved model for the longitudinal peak strain in the flange of a rollformed U-channel developed by FE-analyses. *Steel Research International*, 2007, no. 78 (1), pp. 82–87.
6. Bin Su, Qingxian Ma and, Zhiqiang Han. Modeling of Austenite Decomposition during Continuous Cooling Process in Heat Treatment of Hypoeutectoid Steel with Cellular Automaton Method. *ISIJ International*, 2014, no. 54 (2), pp. 422–429.
7. Ed. Erika Ábrahám, Klaus Havelund. Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems - 20th International Conference, TACAS 2014, Held as Part of the European Joint Conferences on Theory and Practice of Software, ETAPS, 2014, no. 3, pp. 75–83.
8. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A., Luk'ynov S.I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, no. 74 (9–12), pp. 1407–1418.
9. Safonov D.S., Logunova O.S., Chistiakov D.V. Optimization of nozzle layout in continuous casting machine. *Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2016, no. 9(1), pp. 114–122.
10. Tutarova V.D., Logunova O.S. Surface temperature analysis of continuously cast ingot outside air/water cooling zone. *Steel in Translation*, 1998, no 28(8), pp. 18–20.
11. Tselikov AI, Smirnov V.V. *Prokatnye stany* [Rolling mills]. Moscow. Metallurgizdat, 1958. 432 p. (In Russian)
12. Grudev P.I. *Obrabotka metallov davleniem* [Treatment of metals by pressure]. Moscow. Metallurgizdat, 1953. 223 p. (In Russian)
13. Chepurkin S.S. *Proizvodstvo i obrabotka stali* [Production and processing of steel]. Scientific works of ZhdMI, 1960, no. 5. pp. 346–371 (In Russian).
14. Salganik V. Mathematical modeling of roll load and deformation in a four-high strip mill. *Metal Forming*, 2002, no. 2, pp. 103–107.
15. Vier I.V., Salganik V.M., Poletskov P.P. *Matematicheskoe modelirovanie deformatsiy i nagruzok valkovoy sistemy kvarto s uchetom asimetrichnykh sluchaev protsessa prokatki* [Mathematical modeling of deformations and loads of the quarto roll system taking into account asymmetric cases of the rolling process. Modeling and development of metal forming processes]: inter-regional collection of scientific papers, Magnitogorsk, 2002, pp. 78–86. (In Russian)
16. Winkler W. DR-Ing. Dissertation der TH Aachen, 1941, 230 pp.
17. Budakva A.A., Kononov Yu.V., Tklich K.N. *Profilirovaniye valkov listovykh stanov* [Profiling of sheet mill rolls]. Kiev. Technique, 1986, 190 pp.
18. Shebanyts E.N., Savransky K.N. and etc. Wear of back-up rolls and change of the grinding profile of the work rolls of a skin pass mill. *Metallurgist*, 1971, no. 11. pp. 42–43. (In Russian)
19. Borovik L.I., Kolpakov S.S. Calculation of the profiling of thin-sheet mill rolls taking into account the wear of the supporting rolls. *Steel*, 1987, no. 12. pp. 44–47. (In Russian)
20. Lyakishev N.P. *Encyclopedic Dictionary of Metallurgy*. Moscow. Internet Engineering, 200, 412 pp.
21. State Standard R 19903-74. Hot-rolled sheet steel. Assortment. Moscow. IPK Publishing house of standards, 2009. 11 pp.
22. Salganik V.M., Poletskov P.P., Kukhta Yu.B., Egorova L.G. Quality management of hot rolled products in profile and flatness based on the use of an automated system. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 1, pp. 59–62. (In Russian)
23. Certificate no. 2015663617. Program for determining deformation of rolling rolls. Kukhta Yu.B., Egorova L.G. FGBU "Federal Institute of Industrial Property", Federal Service for Intellectual Property, State Registration of Computer Programs, no. 2015660450; Claimed. 02.11.2015; date of registration. 20.02.2016.
24. Certificate no. 2015663617. Program for determining compression regimes in stands of a wide strip hot rolling mill. Kukhta Yu.B., Egorova L.G. FGBU "Federal Institute of Industrial Property", Federal Service for Intellectual Property, State Registration of Computer Programs, no. 2015660448; Claimed. 02.11.2015; date of registration. 20.02.2016.
25. Certificate no. 2014618081. Program for determining the compression regimes in stands of a wide strip hot rolling mill. Poletskov PP, Kukhta Yu.B. FGBU "Federal Institute of Industrial Property", Federal Service for Intellectual Property, State Registration of Computer Programs, No. 2014615850; Claimed. 06/17/2014; date of registration. 20.09.2014.

Программное и математическое обеспечение для моделирования износа бочки прокатных валков / Логунова О.С., Кухта Ю.Б., Кожушков Е.Ю., Хакимуллин К. // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 3(36). С. 59–65. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-59-65](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-59-65)

Logunova O.S., Kukhta Yu.B., Kozhushkov E.Y., Khakimullin K. Software And Math Modeling Of Roll Barrel Wear. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 59–65. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-59-65](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-59-65)

Баранкова И.И., Михайлова У.В., Лукьянов Г.И.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ГРАФИКА ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Для подвижных объектов железнодорожного транспорта, располагающихся в пристанционных зонах и в пределах путевого хозяйства крупных промышленных предприятий, актуальной является задача определения местоположения подвижного состава с погрешностью не более 1 м. В данном проекте разработана схема планирования поездного положения и алгоритм расчета максимально допустимой скорости поездов, в котором реализован дифференциальный способ вычисления параметров местоположения объекта вблизи зоны его расположения или перемещения. В данном проекте предложено реализовать управление железнодорожными электропоездами на основе модульной сети ZigBee. Применение данного решения позволит сократить энергопотребление всей системы.

Ключевые слова: прогнозирование транспортного графика электропоездов, местоположение подвижного состава, аварийный коэффициент, максимальная скорость состава, модульная сеть ZigBee.

ВВЕДЕНИЕ

Первоочередной задачей организации и функционирования электротранспортного хозяйства на предприятиях считается своевременное и бесперебойное обслуживание производственных участков транспортными средствами по передвижению грузов.

Для предприятий со стабильными, устойчивыми грузопотоками при массовом производстве грузоперевозки осуществляются согласно графикам, по установленным маршрутам и с одинаковой интенсивностью. При нестабильных грузопотоках в условиях серийного или единичного производства транспортировка грузов возможна на основе единичных заданий или укрупненного сменного графика.

В развитых зарубежных странах важным направлением совершенствования работы железнодорожного транспорта является разработка научно обоснованных методов управления железнодорожной сетью [1].

Целью данного проекта является разработка и усовершенствование системы управления железнодорожным электротранспортом предприятия. Для решения поставленной задачи необходимо разработать алгоритм прогнозирования времени движения состава по заданному участку железнодорожной сети с учетом всех ограничивающих факторов. В качестве ограничивающих факторов будут использоваться следующие параметры: время аварийного простоя поезда и предельно допустимое количество поездов на участке.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТОМ

Для железных дорог США типовой информационно-управляющей системой является система, подготовленная Федеральной железнодорожной администрацией и компанией Миссури Пасифик. В качестве базовой принята система «TransportationControlSystem» (TCS). Ее отличительной чертой принято считать возможность отслежива-

ния перевозки на всем маршруте от пункта погрузки до пункта назначения. Во всех других имеющихся системах данные о погрузке поступают не с грузовой станции, а лишь по факту проследования груженого вагона первой или последней сортировочной станции [1–3].

Для железных дорог Германии в сфере грузовых перевозок важнейшей задачей является комплексное управление потоками вагонов. Основной целью которого является достижение большей эффективности использования подвижного состава. На протяженных участках управление осуществляется с помощью системы типа «участкового автодиспетчера». На сортировочных станциях управление осуществляется с помощью автономных подсистем, обеспечивающих расформирование и формирование составов [4].

Промышленные предприятия имеют сложную структуру путевого развития, с размером межпутевого расстояния около 4 м. Подвижные объекты железнодорожного транспорта располагаются в пристанционных зонах и в пределах путевого хозяйства крупных промышленных предприятий. Для указанных зон существуют повышенные требования к обеспечению безопасности и надежности процессов движения подвижного состава и диспетчерского управления им [5–7]. В связи с этим актуальной является задача определения местоположения подвижного состава с погрешностью не более 1 м.

При формировании системы прогнозирования и контроля движения транспорта нами предложено реализовать дифференциальный способ вычисления параметров местоположения объекта. Для этого вблизи зоны расположения или перемещения объекта следует разместить одну или две базовые станции, обеспечивающие вычисление дифференциальных поправок. Между стационарными элементами системы, такими как базовые станции и диспетчерские пункты, требуется наличие телекоммуникационной инфраструктуры на базе проводных каналов связи. Для информационного обмена с железнодорожными транспортными средствами организуется беспроводной доступ.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ

У грузового электровоза, по сравнению с пассажирским тяговым подвижным составом, имеется ряд особенностей. Данный прототип локомотивов можно использовать на предельной мощности, причем имеется возможность снижения скорости состава на некоторых участках маршрута, даже при наибольшем тяговом усилии. Число ходовых позиций контроллера незначительно: от пятнадцати на электровозах постоянного тока до тридцати шести на электровозах переменного тока. Электровозы постоянного тока имеют области на тяговой характеристике, для которых не имеется ходовых позиций контроллера. Вес состава влияет на перерывное время хода [7–9].

Частым является использование режима движения, который требует адаптации скорости передвижения к сигналам АЛСН (автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного типа). Предельно допустимые усилия в составе накладывают значительные ограничения на выбор режима управления локомотивом. В связи с этим ускорение поезда не превышает показания $0,1 \text{ м/с}^2$. Поскольку при ведении грузового состава следует решать и задачи управления пассажирского поезда, то система автоматического управления грузового поезда включает в свой состав и систему автоматического управления пассажирским электровозом. Автоматическое ведение грузового состава предполагает выполнение следующих задач:

- управлять тяговым электродвигателем локомотива с максимально возможным использованием его тяговых возможностей;
- в соответствии с планом и профилем пути формировать управляющие сигналы, которые позволяют обеспечивать допустимые продольно динамические силы в подвижном составе на установленном нормами уровне.

Применение микропроцессорной системы автоматического ведения для управления тяговым электродвигателем в зависимости от профиля и плана путей, показателей проскальзывания колесных пар и погодных условий обеспечит максимальное использование мощности тягового электродвигателя локомотива при установленном уровне надежности тягового оборудования, минимизировав расход электроэнергии [9–13].

При создании системы автоматического управления грузового электровоза необходимо планирование поездного положения. При этом следует учитывать такие аспекты, как поток поездов, норматив времени следования, норматив времени стоянок, объем грузовых работ, наличие вагонов. Схема планирования поездного положения показана на рис. 1.

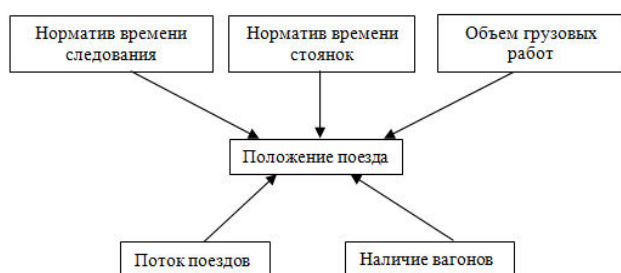


Рис. 1. Схема зависимости положения поезда от ограничивающих факторов

При решении задачи прогнозирования положения поезда в качестве критерия предлагается использовать минимум переработки вагонов. Технология переработки вагонов включает все операции, связанные с расформированием прибывающих поездов, накоплением новых составов, подготовкой их к отправлению и непосредственно отправлению вновь сформированных поездов со станции. Для определения переработки поезда необходимо рассмотреть величину вагонопотоков N_{ij} , где i – номер пункта отправления, j – номер пункта прибытия. Так же устанавливаются кратчайшие маршруты s_{ij} . Для каждого участка заданы приведенные затраты на накопление cm_{ij} . По начальным станциям I вагонопотока задается $T_{экиj}$ – экономия от проследования одного вагона, проходящего по участку маршрута s_{ij} через станцию I без переработки. Для каждой станции также присутствует ограничение по количеству путей n_i выделенных под накопление составов поездов сетевого плана. Если назначение ij не входит в план формирования, то его мощность $n_{ij}=0$, иначе n_{ij} , равняется сумме вагонопотоков, включаемых в это назначение:

$$n_{ij} = \sum_{l,m=1}^p N_{lm} \xi_{ij}^{lm}, \quad (1)$$

где $\xi_{ij}^{lm}=1$, если вагонопоток N_{lm} входит в назначение ij , иначе 0; m – величина состава; p – вершины (станции) транспортной сети; l – длина участка сети.

Приведенные затраты на переработку вагонов на станции i вычисляются как

$$\sum_{j=1}^p (n_{ij} - N_{ij}) T_{экиj}.$$

Расчет плана формирования одnogруппных поездов в целом для сети выделенных станций приводит к решению задачи целочисленного линейного программирования при минимизации функции C :

$$C = \sum_{l,m=1}^p \{ (cm_{lm} \xi_{ij} + n_{ij} - N_{ij}) T_{экиj} \}. \quad (2)$$

Задача поиска оптимального плана формирования поездов решается методом улучшения плана. Каждому множеству выделенных назначений M_v для каждой станции по числу выделенных путей соответствует план формирования одnogруппных поездов с оптимальным прикреплением вагонопотоков N_{ij} к этим назначениям n_{ij} и соответствующим значением целевой функции приведенных затрат C . Минимальное значение C соответствует оптимальному варианту.

Для повышения точности вычислений необходимо добавить поправочный аварийный коэффициент $G_{ав}$, учитывающий увеличение времени загрузки и разгрузки, наличие аварий на пути следования, а также другие ограничивающих факторы:

$$C = \sum_{l,m=1}^p \{ (cm_{lm} \xi_{ij} + n_{ij} - N_{ij}) T_{экиj} G_{ав} \}. \quad (3)$$

Дополнительными ограничивающими факторами могут быть:

- минимизация затрат времени простоя на всех участках;
- количество поездов на участке должно быть меньше допустимого значения числа поездов;
- груз должен быть транспортирован в установленные сроки (пункт назначения, время хода поезда, время доставки).

Введение поправочного коэффициента позволит точнее спрогнозировать положение железнодорожного транспорта и оптимально составить план формирования поездов.

Для предотвращения столкновений и аварий на железнодорожных путях необходимо точное прогнозирование времени прохождения участков пути локомотивом. При расчете времени нужно брать в расчет количество локомотивов, проходящих через линию сети железных дорог, и время прохождения каждым локомотивом данной линии. Время прохождения складывается из времени разгона, времени движения на максимально допустимой скорости, времени торможения, времени аварийного простоя на линии.

$$\tau_{\text{прох}} = \tau_{\text{разг}} + \tau_{\text{макс}} + \tau_{\text{торм}} + \tau_{\text{авар}}. \quad (4)$$

Ниже представлена схема расчета максимально допустимой скорости на заданном участке (рис. 2). Время разгона, торможения при максимально допустимой скорости жестко связано с техническими характеристиками тягового электродвигателя локомотива, количества вагонов, а также их загруженностью. В зависимости от времени простоя предыдущего поезда в конечном пункте может быть произведен перерасчет максимальной скорости движения на участке для следующего локомотива. Данный расчет необходим и жестко связан с технологией производства.

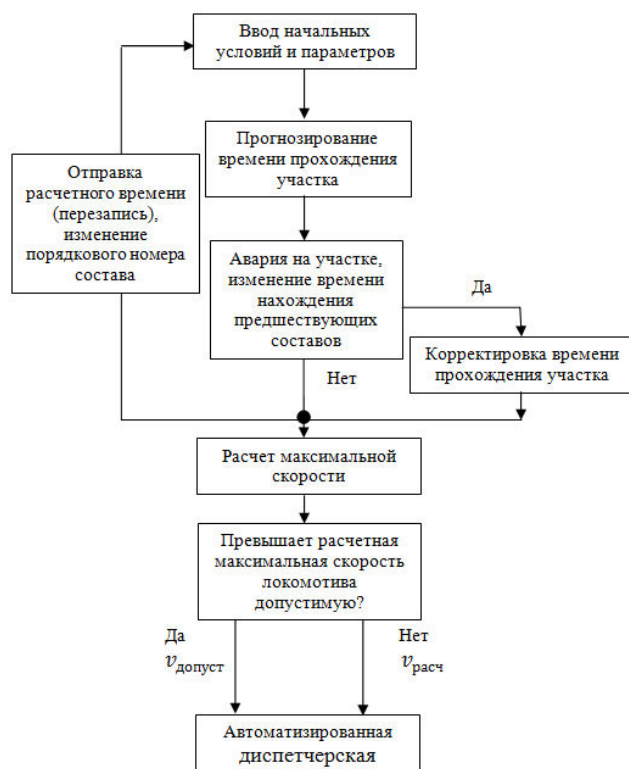


Рис. 2. Схема алгоритма расчета максимально допустимой скорости

Приведенный алгоритм позволяет постоянно производить перерасчет скорости движения транспорта. Эта особенность обеспечивает более точное прогнозирование времени движения и местоположения транспорта на всех участках пути, благодаря мгновенному учету поправок плана движения.

СЕТЬ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ЛИНИЯМИ

В зависимости от длины транспортного пути и сложности транспортной сети для управления транспортными линиями применяются комбинированные системы или моносистемы. Широкое применение нашли моносистемы, реализация которых основана на телекоммуникационной инфраструктуре с наличием различного количества телеметрических датчиков [4, 6, 8]. Применение комбинированной системы при закрытых транспортных путях ограничено наличием GPS-сигнала (GPS трекеры).

Для локальных железнодорожных путей межцехового назначения в данном проекте предлагается использовать модульные сети на основе протокола ZigBee. Протоколы ZigBee предоставляют возможность делать самоорганизующиеся и самовосстанавливающиеся сенсорные сети. Достоинствами использования сети на основе устройств ZigBee являются:

- способность при включении питания самостоятельно находить ближайшие сетевые модули и создавать сеть за счет встроенного программного обеспечения;
- формирование новых маршрутов для передачи данных в случае неисправности какого-либо из узлов сети.

В сеть ZigBee включены три типа логических устройств: координатор ZigBee, маршрутизатор ZigBee и оконечное устройство ZigBee. К основным функциям координатора ZigBee можно причислить сканирование частотных каналов для нахождения свободного канала и формирование сети, создание идентификатора сети (PAN ID), подключение новых сетевых устройств, маршрутизация и буферизация данных для спящих оконечных узлов. Причем в одной сети ZigBee находится лишь один координатор. Ретрансляция пакетов, маршрутизация и буферизация данных для спящих оконечных узлов являются основными функциями маршрутизатора ZigBee. Оконечные узлы ZigBee не выполняют ретрансляцию, а только осуществляют сбор информации и управляют удаленным объектом.

Протоколы ZigBee используются не только для реализации несложных соединений, таких как «точка-точка» и «звезда», но и для создания более сложных сетей с топологиями «дерево» и «ячеистая сеть». На дальность передачи сигнала от узлов ZigBee влияют такие параметры, как чувствительность приемника и мощность передатчика.

В сети ZigBee только оконечные узлы могут переходить в «спящий режим» (сон). Это позволяет сократить энергопотребление всей системы, а также влияет на экономический фактор выбора данной сети [2, 3, 4, 5].

В составе автоматизированных систем управления движением поездов (АСУДП) находятся технические, технологические и организационные средства, которые позволяют повысить уровень диспетчерского руководства движением на всех участках и направлениях железнодорожных путей. Их использование дает возможность придерживаться точного выполнения графика движения, повышения использования пропускной способности участков и направлений, перерабатывающей способности станций, увеличения производительности

труда диспетчеров, рабочих бригад локомотивов, дежурных по станциям. АСУДП включают в свой состав системы автоматического ведения поездов (САВП), интервального регулирования движения поездов (ИРДП), диспетчерского управления [7, 9].

Использование протоколов ZigBee при создании АСУ железнодорожным транспортом производства позволит достичь стабильности работы системы, благодаря самовосстановлению и самореорганизации. Также благодаря спящему режиму оконечных узлов сети ZigBee и возможности использования беспроводных технологий позволит увеличить экономических эффект данной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматизация транспортного потока железной дороги – сложный технологический процесс. Для точного прогнозирования и правильного установления транспортного графика необходимо учитывать все ограничивающие факторы.

В данном проекте:

- формирование улучшенной системы прогнозирования и контроля движения электротранспорта выполняется дифференциальным способом вычисления параметров местоположения объекта вблизи зоны его расположения или перемещения;
- в расчеты для учета аварийных ситуаций, приводящих к увеличению времени нахождения электропоезда, на участке введен коэффициент корректировки по аварийности;
- разработан алгоритм расчета максимально допустимой скорости электропоезда;
- использование беспроводных технологии уменьшит затраты на телекоммуникационные линии. Применение сетей ZigBee увеличит эффективность работы АСУ за счет использования спящего режима оконечных устройств и стабильность ее работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кужель А.Л., Шапкин И.Н., Вдовин А.Н. Информационно-аналитические технологии оперативной корректировки и контроля выполнения плана формирования поездов // Железнодорожный транспорт. 2011. № 7. С. 13–20.
2. Шапкин И.Н., Самойлова И.М. О переходе к технологии организации движения грузовых поездов по расписанию // Железнодорожный транспорт. 2012. № 3. С. 14–17.
3. Осьминин А.Т., Никифорова О.А. Определение эффективности организации маршрутов с мест погрузки в современных условиях // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2008. № 1. С. 91–100.
4. Верлан А.И. Совершенствование методов стимулирования отправительской маршрутизации на железнодорожном транспорте // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2014. № 1(49). С. 75–85.
5. Березовый Н.И. Перевозка металлургической продукции кольцевыми маршрутами по расписанию с использованием частных локомотивов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 2(3). С. 51–55.
6. Козаченко Д.Н., Верлан А.И., Германюк Ю.Н. Исследование эффективности организации перевозок металлургических грузов по расписанию // Вестник Белорусского Государственного университета транспорта. 2013. № 1(26). С. 52–54.
7. Баланов В.О. Анализ факторов, влияющих на обеспечение движения грузовых поездов по расписанию // Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Транспортні системи та технології перевезень. 2015. № 10. С. 5–9.
8. Jung J. U, Kim H. S. Strategies for Improving the Profitability of a Korean Unit Train Operator: A System Dynamics Approach. *Advances in Swarm and Computational Intelligence*. 2015. P. 275–283.
9. Kroon L.G., Dekker R., Vromans M.J. C. M. Cyclic Railway Timetabling: A Stochastic Optimization Approach. Springer Verlag, LNCS. 2007. Vol. 4359. P. 41–66.
10. Ślaskowski A., Cieśla M. Influence of a potential railway line connecting the Caspian Sea with the Black Sea on the development of Eurasian trade // *Our Sea*. 2015. Vol. 62. № 4. P. 264–271.
11. Kenkel P. An Economic Analysis of Unit-Train Facility Investment // Department of Agricultural Economics, Oklahoma State University. 2004. P. 3–14.
12. Landex A. Reliability of Railway Operation // *Proceedings of the Annual Transport Conference at Aalborg University*. 2013. P. 63–81.
13. Schittenhelm B. Planning with Timetable Supplements in Railway Timetables // *Processings of the Annual Transport Conference at Aalborg University*. 2011. P. 47–61.

Поступила в редакцию 23 мая 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SYSTEM FOR PREDICTING THE TRANSPORT SCHEDULE OF ELECTRIC TRAINS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

Inna I. Barankova

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the department of Computer Science and Information Safety Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Ulyana V. Mikhailova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the department of Computer Science and Information Safety Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

George I. Lukyanov

Teaching Assistant, Department of Computer Science and Information Safety Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

For the mobile objects of railway transport which are settling down in station zones and within traveling facilities of the large industrial enterprises, the problem of definition of location of the rolling stock with a margin error no more than 1 m is quite urgent. In this project, the research group has developed a planning scheme of train position and the algorithm for computing the maximum permissible train speed, in which a differential method for calculating the parameters of the location of an object near its location or displacement is used. In this project it is offered to carry out the management of railway electrical trains on the basis of the modular network ZigBee. The application of this solution will reduce the energy consumption of the entire system.

Keywords: Forecasting of transport schedule of electric trains, train location, emergency ratio, the maximum speed of trains, modular network of ZigBee

REFERENCES

1. Kuzhel A.L., Shapkin I.N., Vdovin A.N. Information and analytical technologies of expeditious adjustment and control of implementation of the plan of formation of trains. *Railway transport*. 2011, no. 7, pp. 13–20. (In Russian)
2. Shapkin I.N., Samoylova I.N. Transition to technology of organization of cargo train movement on the schedule. *Railway transport*, 2012, no. 3, pp. 14–17. (In Russian)
3. Osminin A.T., Nikiforova O.A. Determination of efficiency of the organization of routes from shipping places in modern conditions. *The Bulletin of Rostov state transport university*, 2008, no. 1, pp. 91–100. (In Russian)
4. Verlan A.I. Stimulation methods improvement of exit route on railway transport. Science and transport progress. *Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 1(49), pp. 75–85. (In Russian)
5. Berezovy M.I. Transportation of steel products by circular route on schedule with private locomotives. *East European Journal of advanced technologies*, 2014, no. 2(3), pp. 51–55.
6. Kozachenko D.N., Verlan A.I., Germanyuk Yu.N. Research of efficiency of organization of transportation of metallurgical cargoes on schedule. *Bulletin of the Belarusian State University of Transport*, 2013, no. 1(26), pp. 52–54. (In Russian)
7. Balanov V.O. Analysis of factors affecting the provision of freight Trains on timetable. *Collection of scientific works of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Transport systems and transport technologies*, 2015, no. 10, pp. 5–9.
8. Jung J.U., Kim H.S. *Strategies for Improving the Profitability of a Korean Unit Train Operator: A System Dynamics Approach* [Advances in Swarm and Computational Intelligence]. 2015, pp. 275–283.
9. Kroon L.G., Dekker R., Vromans M.J. C. M. *Cyclic Railway Timetabling: A Stochastic Optimization Approach*. Springer Verlag. LNCS. 2007, vol. 4359, pp. 41–66.
10. Ślaskowski A., Cieśla M. Influence of a potential railway line connecting the Caspian Sea with the Black Sea on the development of Eurasian trade. *Our Sea*. 2015, vol. 62, no. 4, pp. 264–271.
11. Kenkel P. An Economic Analysis of Unit-Train Facility Investment. *Department of Agricultural Economics, Oklahoma State University*. 2004, pp. 3–14.
12. Landex A. Reliability of Railway Operation. *Proceedings of the Annual Transport Conference at Aalborg University*. 2013, pp. 63–81.
13. Schittenhelm B. Planning with Timetable Supplements in Railway Timetables. *Proceedings of the Annual Transport Conference at Aalborg University*. 2011, pp. 47–61.

Баранкова И.И., Михайлова У.В., Лукьянов Г.И. Система прогнозирования транспортного графика электропоездов промышленного предприятия // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 3(36). С. 66–70. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-66-70](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-66-70)

Barankova I.I., Mikhailova U.V., Lukyanov G.I. System For Predicting The Transport Schedule Of Electric Trains Of Industrial Enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 66–70. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-66-70](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-66-70)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреев Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доц., зав. каф. автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: andreev.asc@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0735-6723>

Бабанова Ирина Сергеевна – аспирант, каф. электроэнергетики и электромеханики, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: irina_babanova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5925-8749>

Баранкова Инна Ильинична – д-р техн. наук, доц., зав. каф. информатики и информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: Inna_barankova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6077-6164>

Белоусов Олег Сергеевич – аспирант, каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Варганова Александра Владимировна – канд. техн. наук, доц. каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4675-7511>

Васильев Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доц., каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: vasiliev@magtu.ru

Власьевский Станислав Васильевич – д-р техн. наук, проф., каф. электротехника, электроника, электромеханика, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия. E-mail: vlas@festu.khv.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0681-8132>

Володин Евгений Вячеславович – магистрант, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет МЭИ», Москва, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9081-8660>

Даниленко Кристина Вячеславовна – инженер, АО «НПО «Андронидная техника», Россия. E-mail: danilenko@npo-at.com

Евсеев Алексей Михайлович – электроник, факультет автоматизации и информатики, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Липецк, Россия. E-mail: alexevs94@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0687-7383>

Жуковский Юрий Леонидович – канд. техн. наук, доц., каф. электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург,

Россия. E-mail: Spmi_energo@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0312-0019>

Климаш Владимир Степанович – д-р техн. наук, проф., каф. электротехника, электроника, электромеханика, ФГБОУ ВО Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: Klimash@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8150-5013>

Климаш Степан Владимирович – аспирант, ФГБОУ ВО Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: Klimash907@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8273-1370>

Кожушков Евгений Юрьевич – ведущий инженер, научно-технический центр, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия. E-mail: kozhushkov.ey@mmk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5573-9342>

Королёв Николай Александрович – аспирант, каф. электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: korolev_na_spmi@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0583-9695>

Крюкова Анастасия Андреевна – инженер, электротехнический отдел, ОАО «Магнитогорскгражданпроект», Магнитогорск, Россия.

Кухта Юлия Борисовна – канд. техн. наук, доц., каф. вычислительной техники программирования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: perfectumyuka@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9128-389>

Логунова Оксана Сергеевна – д-р техн. наук, проф., зав. каф. вычислительной техники и программирования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: logunova66@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

Лукьянов Георгий Игоревич – ассистент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: decorsi@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7010-2243>

Мещеряков Виктор Николаевич – д-р техн. наук, проф., зав. каф. электропривода, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Липецк, Россия. E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>

Михайлец Владимир Федорович – канд. техн. наук, доц., каф. механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: mvf-54@mail.ru

Михайлова Ульяна Владимировна – канд. техн. наук, доц. каф. информатики и информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: ulianapost@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2845-2995>

Осипов Олег Иванович – д-р техн. наук, проф., каф. автоматизированного электропривода ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет МЭИ», Москва, Россия.

Панова Евгения Александровна – канд. техн. наук, доц., каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: ea.panova@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/orcid.org/0000-0001-9392-3346>

Петушков Михаил Юрьевич – д-р техн. наук, доц., проф. каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск,

Россия. E-mail: m.petushkov@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5634-2523>

Сарваров Анвар Сабулханович – д-р техн. наук, проф. каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: anvar@magtu.ru

Хакимуллин Константин – инженер проектов, Проектный отдел, Hosokawa kolb GMBH, Бонн, Германия. E-mail: khakimullin@hosokawa-kolb.de

Хужина Залия Бузатовна – инженер-проектировщик, ООО «ЮГРАЭНЕРГО», Россия. E-mail: zaliya.huzhina92@mail.ru

Щербина Дмитрий Владиславович – аспирант, каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: shcherbinadmitry@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1736-9544>

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас опубликовать статьи в журнале «*Электротехнические системы и комплексы*».

Журнал «Электротехнические системы и комплексы» основан в 1996 году на базе международного сборника научных трудов, в котором публиковались статьи студентов, аспирантов и ученых, как из России, так и из-за рубежа. Начиная с 2014 года «Электротехнические системы и комплексы» выпускается как журнал с периодичностью четыре номера в год.

С 02.02.2016 журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по группам научных специальностей 05.09.00 – электротехника, 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление, 05.14.00 – энергетика.

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:

- теория и практика автоматизированного электропривода;
- электро- и теплоэнергетика;
- электроснабжение;
- энерго- и ресурсосбережение;
- промышленная электроника, автоматика и системы управления;
- электротехнологии в промышленности;
- информационное, математическое и программное обеспечение технических систем;
- мониторинг, контроль и диагностика электрооборудования.

Публикация статей является бесплатной.

Статьи, направленные в адрес журнала, проходят обязательное научное рецензирование и редактирование. Несоответствие материалов требованиям к статьям может служить поводом для отказа в публикации.

Статья должна быть набрана в шаблоне, который размещен на сайте журнала esik.magtu.ru в разделе «Руководство для авторов». Там же находится инструкция по его заполнению, в которой приведены требования к оформлению статей.

Авторы статьи должны гарантировать, что их работа публикуется впервые. Если элементы рукописи ранее были опубликованы в другой работе (статье, монографии, автореферате и т.д.), в том числе на другом языке, авторы обязаны сослаться на более раннюю работу. При этом они обязаны указать, в чем существенное отличие новой работы от предыдущей и, вместе с тем, выявить ее связь с результатами исследований и выводами, представленными в предыдущей работе. Дословное копирование собственных работ или ее элементов более чем на 30% и их перефразирование не приемлемы!

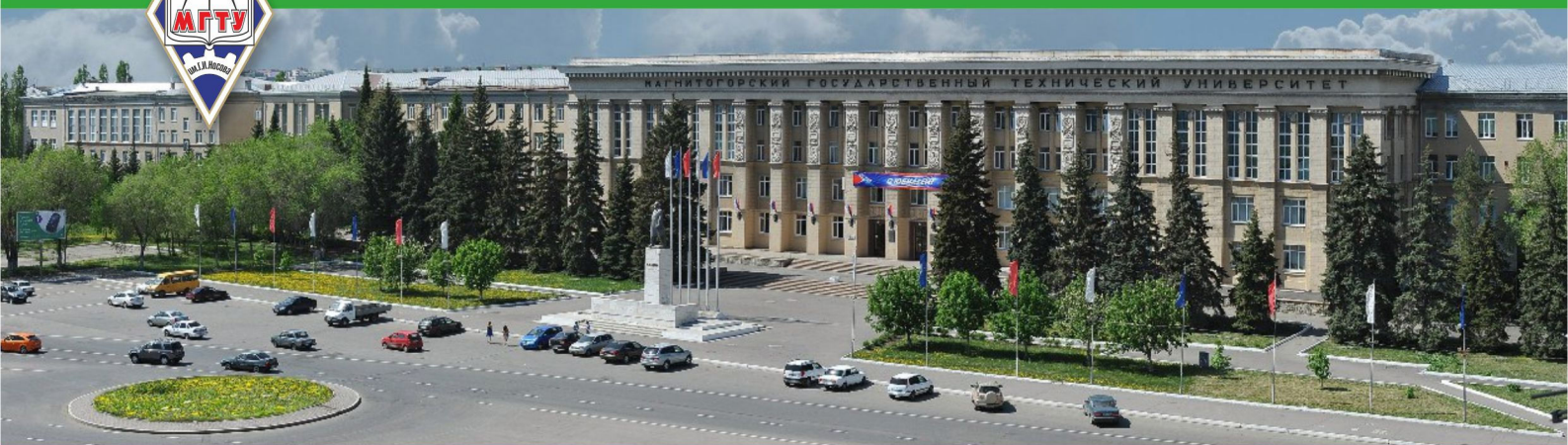
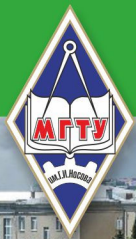
Пакет подаваемых документов:

- рукопись статьи;
- информация об авторах;
- экспертное заключение о возможности опубликования;
- лицензионный договор, заполненный на каждого автора в двух экземплярах (отсканированная копия отправляется в формате pdf, оригиналы – по почте вместе с остальными документами).

С уважением,

редакция журнала «Электротехнические системы и комплексы»

E-mail: ecis.red@gmail.com



Научно-образовательный центр «Шнейдер Электрик – МГТУ им. Г.И.Носова



Концептуальной основой НОЦ является интегрированная автоматизированная система управления (ИАСУ), позволяющая на технических и программных средствах SE изучать и проектировать как локальные объекты электроснабжения и электропривода, так и АСУ различных уровней. Такой подход при создании Центра дал возможность в процессе обучения не только изучать конкретное оборудование и программное обеспечение ИАСУ, но и разрабатывать собственные АСУ и системы автоматизации.

Наполнение центра современным оборудованием с возможностью включения его в АСУ различного уровня делает привлекательным прохождение теоретических и практических занятий как для разработчиков и проектировщиков, так и для служб эксплуатации и наладки промышленных предприятий.

Образовательный центр включает в себя компьютерный класс на 12 ПК и 24 посадочных места (разработка программно-технических комплексов с базовым программным обеспечением), мульти-медийный класс на 18 посадочных мест (проведение презентаций, докладов и теоретических занятий), 4 лабораторных стенда, моделирующих работу интегрированной распределенной АСУ участка, цеха.



Перечень направлений подготовки в рамках НОЦ для бакалавров и магистрантов:

- 27.03.04 и 27.04.04 «Управление в технических системах»;
- 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профили «Электропривод и автоматика» и «Электроснабжение»);
- 15.03.06 и 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» (профиль «Мехатронные системы в автоматизированном производстве»).

Совместно разработанные программы «Шнейдер Электрик– МГТУ им. Г.И.Носова:

- системы управления электроприводами на базе преобразователей частоты ATV32, ATV71 и ATV93 и библиотеки SoMove;
- примеры архитектур локальной автоматизации. Особенности конфигурирования контроллера Modicon M251и разработка приложений SoMachin;
- интеграция оборудования распределения электроэнергии и АСУТП в единую систему управления. Организация сетей CANOpen и Ethernet. Современные подходы к построению программно-технических комплексов.