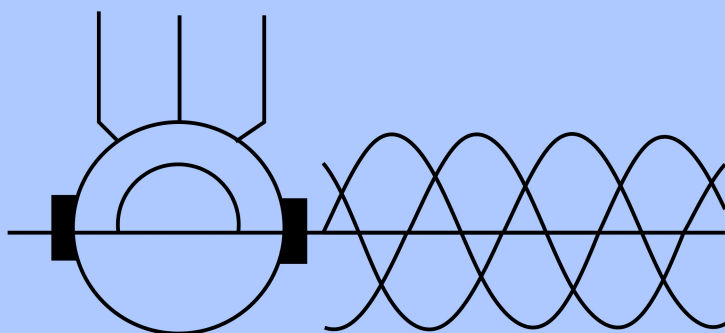
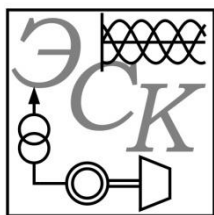


Электротехнические Системы и Комплексы





ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 1(38), МАРТ 2018

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 им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

Е.Б. Аганитов – 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
ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

Секции промышленной электроники, автоматики и систем управления; информационного, математического и программного обеспечения 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. Ишметьев – 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 уни-
верситет 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», 2018

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.

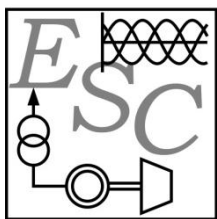
Адрес редакции:

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 26.03.2018. Заказ 101. Тираж 500 экз. Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 1(38) MAR., 2018

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 PJSC, 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, 2018

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: 26.03.2018. Order 101. Circulation: 500.

Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	4
<i>Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С.</i> Синхронизированный асинхронный электропривод с частотным управлением	
	4
<i>Сарваров А.С., Вечеркин М.В., Петрякова Е.С., Богачева И.Ю., Петушков М.Ю.</i> Особенности реализации гибридных реакторно-тиристорных пусковых устройств для двигателей переменного тока	
	9
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	14
<i>Шубин А.Г., Логинов Б.М., Гасияров В.Р., Маклакова Е.А.</i> Обоснование способов ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана	
	14
<i>Богданов Д.Ю., Кравченко О.А.</i> Математическая модель электромеханических стендов обезвешивания с учетом силовых взаимодействий в радиальной конструкции	
	26
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ	33
<i>Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г., Багметов А.А.</i> Критерии оптимизации места установки реклоузера в распределительной сети 6-10 кВ	
	33
<i>Газизова О.В., Соколов А.П., Малафеев А.В.</i> К вопросу учета насыщения в математической модели промышленного генератора для расчета переходных режимов в системе электрооборудования сложной конфигурации	
	40
МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ	48
<i>Николаев Ан.А., Храмшина Е.А., Николаев Ар.А.</i> Локализация неисправностей трансформатора средствами акустической локации частичных разрядов	
	48
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	55
<i>Ячиков И.М., Ларина Т.П., Вострокнутова О.Н.</i> Исследование поведения напряженности магнитного поля и положения тела во взвешенном состоянии в коническом индукторе с противовитком	
	55
ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	63
<i>Носова Т.Н., Калугина О.Б.</i> Использование алгоритма битовых шкал для увеличения эффективности поисковых запросов, обрабатывающих данные с низкой избирательностью	
	63
ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ	68
<i>Исмаилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф.</i> Обзор конструкций дисковых электромеханических преобразователей энергии для различных областей применения	
	68
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	80

CONTENT

THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE	4
<i>Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S.</i> Synchronized Asynchronous Electric Drive with Variable-Frequency Control	
	4
<i>Sarvarov A.S., Vecherkin M.V., Bogacheva I.Yu., Petryakova E.S., Petushkov M.Yu.</i> Peculiarities of Implementation of Hybrid Thyristor-Reactor AC Motor Starters	
	9
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS	14
<i>Shubin A.G., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A.</i> Feasibility of the Ways to Limit Dynamic Loads of Electromechanical Systems of a Rolling Stand	
	14
<i>Bogdanov D.Yu., Kravchenko O.A.</i> Mathematical Model of Electromechanical Weightlessness Simulators Taking Account of Force Interactions in Radial Construction	
	26
ELECTRIC POWER SUPPLY	33
<i>Sazykin V.G., Kudryakov A.G., Bagmetov A.A.</i> Criteria for Optimizing the Place of Reclouser Installation in the 6-10 kV Distribution Network	
	33
<i>Gazizova O.V., Sokolov A.P., Malafeyev A.V.</i> Saturation in the Mathematical Model Industrial Generator for Calculation of Transition Mode in the Power Complex Configuration	
	40
MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ELECTRIC EQUIPMENT	48
<i>Nikolaev An.A., Khrushina E.A., Nikolaev Ar.A.</i> Transformer Fault Location by Means of Partial Discharges Acoustic Radar	
	48
INDUSTRIAL ELECTRO TECHNOLOGY	55
<i>Yachikov I.M., Larina T.P., Vostroknutova O.N.</i> Research of Magnetic Field Intensity Behavior and Body Position in Suspended State in the Conical Inductor with the Reverse Coil	
	55
TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE AND SOFTWARE	63
<i>Nosova T.N., Kalugina O.B.</i> Making Use of Algorithm of Bitmap Indexes to Increase Efficiency of the Search Queries Processing Low Selectivity Data	
	63
REVIEW PAPERS	68
<i>Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Sayakhov I.F.</i> Overview of Disk Designs of Electromechanical Energy Converters for Various Applications	
	68
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	80

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.313.334

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-4-8](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-4-8)

Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С.

Липецкий государственный технический университет

СИНХРОНИЗИРОВАННЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В конце прошлого века среди регулируемых приводов переменного тока наибольшее распространение получили асинхронные двигатели с фазным ротором. Они устанавливались на конвейеры, транспортеры, краны. Это было обусловлено относительной простотой регулирования частоты вращения двигателя посредством воздействия на роторную цепь. Внедрение частотно-регулируемого привода в таких приводах в наше время осложняется тем, что большинство преобразователей частоты рассчитаны на применение в приводах, в составе которых установлен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Замыкание фазной обмотки накоротко приводит к значительному увеличению потерь в процессе разгона и регулирования скорости вращения двигателя. Если обмотку статора асинхронного двигателя с фазным ротором подключить к преобразователю частоты, а обмотку ротора к звену постоянного тока этого преобразователя, двигатель будет обладать свойствами синхронного. Электропривод получает возможность работы в широком диапазоне, а характеристики двигателя абсолютно жесткие. Реализация подобного способа управления представлена в данной статье. Работа системы управления исследована с помощью моделирования в программном пакете Matlab Simulink. Дана характеристика полученным результатам.

Ключевые слова: синхронизированный асинхронный привод, асинхронный двигатель с фазным ротором, регулируемый электропривод, двигатель, неуправляемый выпрямитель, автономный инвертор тока, система управления, устойчивость, релейный регулятор тока, математическая модель, Matlab Simulink.

ВВЕДЕНИЕ

Существует ряд производственных механизмов, которые требуют от систем управления получения абсолютно жестких рабочих характеристик и широкий диапазон регулирования скорости. В таких механизмах целесообразно использовать синхронизированный электропривод, выполненный на базе асинхронного двигателя с фазным ротором [1,2]. Асинхронный двигатель с фазным ротором переводится в синхронный режим подачи постоянного тока в обмотку ротора [3].

Поскольку по обмоткам ротора двигателя протекает постоянный ток и скорость вращения ротора двигателя не зависит от нагрузки на валу, что характерно для синхронной машины, асинхронный двигатель с фазным ротором, работающий в таком режиме, называют синхронизированным [3].

Одним из преимуществ синхронного режима двигателя перед асинхронным режимом заключается в способности двигателя изменять величину и знак реактивной мощности при регулировании величины тока возбуждения [4]. При прямом подключении обмотки статора к питающей сети в случае перевозбуждения двигателя реактивная мощность отдается в питающую сеть, а при недо возбуждении потребляется из сети, поэтому имеется принципиальная возможность воздействия на процесс обмена энергией между двигателем и системой электроснабжения путем регулирования тока возбуждения мощных синхронизированных асинхронных двигателей [5]. Целью работы является синтез системы управления синхронизированным асинхронным электроприводом.

МЕТОДЫ

Схема подключения синхронизированного двигателя представлена на **рис. 1**. Обмотка ротора подключается к источнику постоянного напряжения в соответствии со схемой, изображенной на рисунке. Диоды

в схеме используются для исключения возникновения свободных токов в замкнутом контуре, образованном двумя параллельно соединенными обмотками ротора. Двигатель после окончания электромеханического переходного процесса, связанного с пуском электропривода и втягиванием двигателя в синхронизм, продолжает работать в статическом режиме, обладая всеми свойствами синхронного неявнополюсного двигателя классического типа.

Асинхронный двигатель с фазным ротором, работающий в синхронном режиме, для обеспечения устойчивой работы в режиме пуска, осуществляемого с помощью задатчика интенсивности, требует точного задания темпа разгона с его коррекцией при изменении момента инерции механизма. Поэтому в системе автоматического управления синхронизированным электроприводом, построенным на базе инвертора тока, для повышения устойчивости введен дополнительный внутренний контур регулирования тока статора, подключенный контуру регулирования скорости двигателя. Внутренние контуры регулирования фазных токов статора построены на базе релейного регулятора тока.

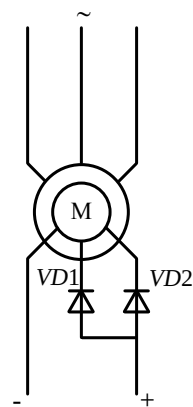


Рис. 1. Схема подключения синхронизированного асинхронного двигателя

Структурная схема частотного синхронизированного асинхронного электропривода приведена на рис. 2. В системе частотно-регулируемого синхронизированного асинхронного электропривода используется стандартный преобразователь, который питает обмотку статора. Он содержит неуправляемый выпрямитель, выход которого соединён с входом управляемого автономного инвертора. Электромагнитное поле, создаваемое обмоткой статора, определяется выходными параметрами частотного преобразователя: током I_1 и частотой f_1 . Устройство содержит выпрямитель 1 и инвертор 2, электродвигатель 3. Инвертор выполнен на полностью управляемых вентилях – IGBT-транзисторах. На валу двигателя установлен датчик скорости 5, с помощью датчиков 4 в систему управления 6 поступают сигналы напряжений и токов. Структурная схема блока управления, реализованная в программном пакете Matlab Simulink, представлена на рис. 3.

В режиме пуска частота тока статора формируется с помощью задатчика интенсивности [6]. В момент достижения заданной частоты тока статора система управления переходит в режим работы на требуемой скорости. Регулятор тока работает по принципу релейного управления. В результате сравнения на выходах сумматоров получаем разницу между заданным и действительным значениями тока в фазах [7]:

$$\begin{cases} \Delta i_{1A} = i_{1A}^* - i_{1A} \\ \Delta i_{1B} = i_{1B}^* - i_{1B} \\ \Delta i_{1C} = i_{1C}^* - i_{1C}, \end{cases} \quad (1)$$

где $i_{1A}^*, i_{1B}^*, i_{1C}^*$ – заданные значения фазных токов статора; i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} – действующие значения фазных токов.

Полученные сигналы поступают на входы блоков гистерезиса работающих по следующему алгоритму:

$$\begin{cases} \text{если } \Delta i_1 \leq \tau / 2, \text{ то на выходе (0);} \\ \text{если } \Delta i_1 > \tau / 2, \text{ то на выходе (1),} \end{cases} \quad (2)$$

где τ – модуль гистерезиса, задаваемый из условия точности поддержания тока статора и устойчивости работы системы регулирования.

Обычно выбирается

$$\tau = \frac{\sqrt{2} I_{1H}}{100}, \quad (3)$$

где I_{1H} – действующее значение номинального тока статора.

Далее сигнал с выхода блоков гистерезиса поступает на выход управления транзисторами соответствующей фазы. Частота переключений силовых транзисторов может составлять 10 кГц.

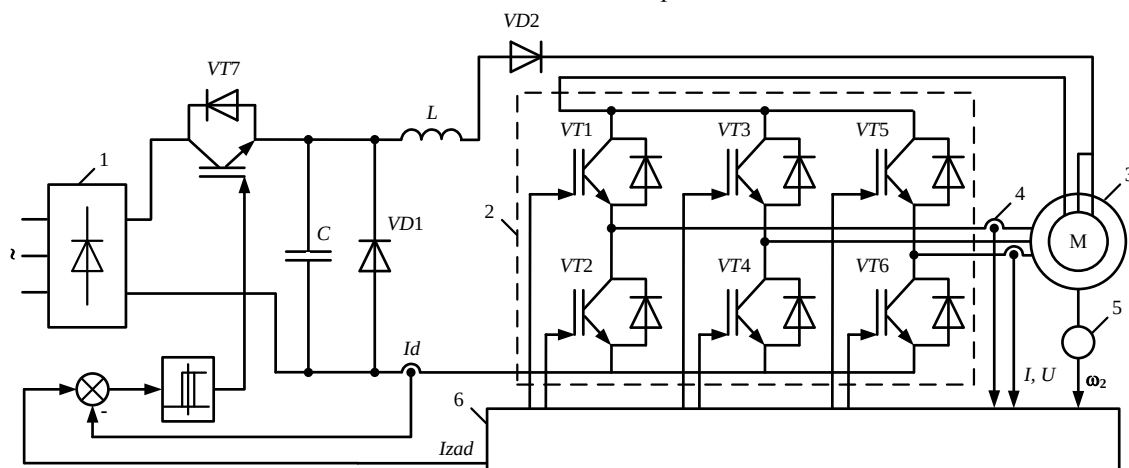


Рис. 2. Схема подключения синхронизированного асинхронного двигателя

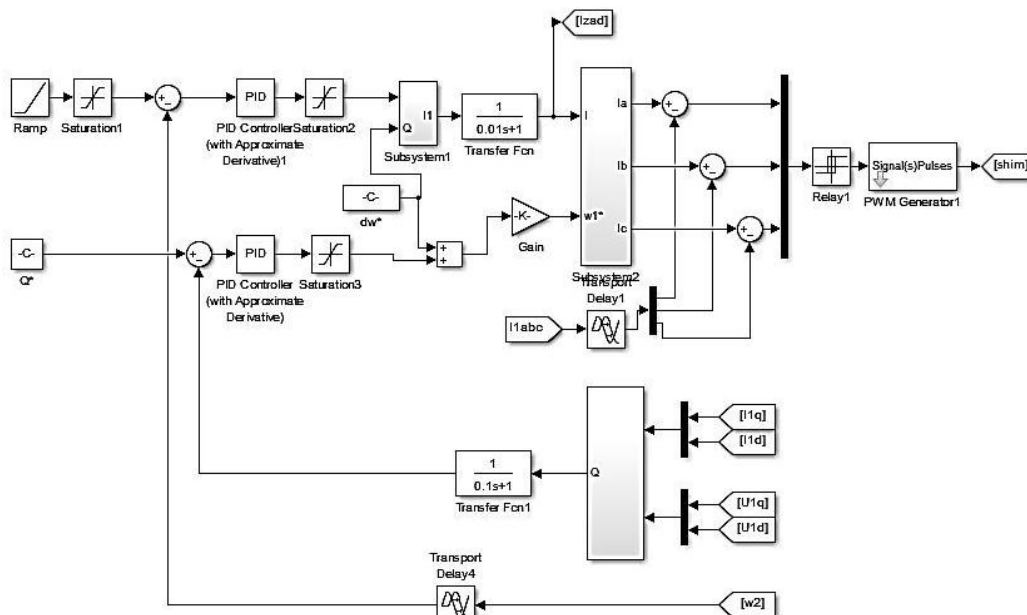


Рис. 3. Схема блока управления

Для синхронного режима асинхронного двигателя важным параметром является угол нагрузки [4].

$$\theta_{эл} = \int \omega_1 dt - \int \omega_{эл} dt, \quad (4)$$

где ω_1 – круговая частота напряжения статора; $\omega_{эл} = \omega p_n$; ω частота вращения ротора; p_n – число пар полюсов двигателя.

Для снижения колебаний ротора, возникающих в процессе пуска двигателя, в системе управления работает контур регулирования угла нагрузки θ , который производит коррекцию сигнала задания частоты тока статора.

Настройка контура регулирования угла нагрузки произведена с учетом следующих особенностей:

– амплитуда колебаний угла нагрузки зависит как от электрических, так и от механических параметров двигателя;

– статическая нагрузка на валу привода определяется средней за период свободных колебаний величины угла нагрузки;

– для гашения колебаний, возникающих в приводе, согласно классической механики, необходимо управляющее воздействие прикладывать в одной фазе с колебаниями системы.

Корректирующий коэффициент k выбран исходя из необходимости быстроты регулирования угла нагрузки. Для того чтобы система была устойчивой, коэффициент задается меньше единицы, но, увеличивая его, повышается быстродействие контура регулирования угла нагрузки. Исходя из этого, целесообразно определять k самостоятельно для каждого отдельного электропривода. Постоянная времени определяется частотой свободных колебаний системы электропривода, она не должна быть меньше этой частоты. Чрезмерное же увеличение ее приводит к ухудшению динамических

характеристик системы при изменении нагрузки на валу. Таким образом, постоянную времени рекомендуется выбирать в пределе

$$(1 \div 2)T_0, \quad (5)$$

где T_0 – период свободных колебаний разомкнутой системы электропривода.

Скорректированные сигналы задания тока, получаемые на выходе блока задания фазных токов, определяются по формулам:

$$\begin{aligned} I_a^* &= I_m \sin(\omega t + \varphi_0); \\ I_b^* &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ + \varphi_0); \\ I_c^* &= I_m \sin(\omega t + 240^\circ + \varphi_0), \end{aligned} \quad (4)$$

где φ_0 – сигнал коррекции.

В режиме пуска темп изменения сигнала задания частоты задается задатчиком интенсивности, настроенным исходя из величины суммарного момента инерции электропривода и требуемого ускорения. Если выбранный темп разгона несколько завышен и ротор двигателя не успевает изменять свою скорость с заданным темпом, сигнал φ_0 корректирует темп разгона и частоту тока статора.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложенная система управления была смоделирована в программной среде Matlab Simulink [8-10] (рис. 4).

Результаты моделирования представлены на рис. 5. На нем изображены угловая скорость (а), момент (б), угол нагрузки (в), ток статора (г), а также механическая характеристика асинхронного двигателя в процессе пуска и наброса нагрузки (д).

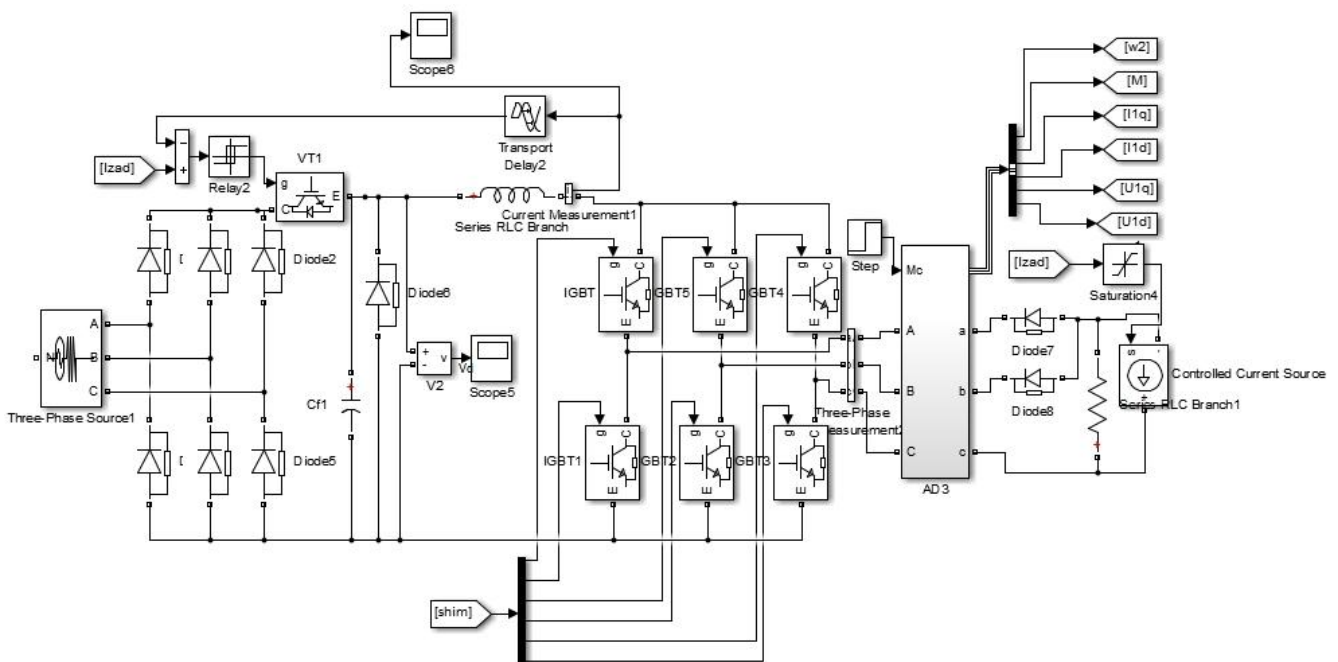


Рис. 4. Модель синхронизированного асинхронного электропривода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработана и смоделирована система управления синхронизированным асинхронным электроприводом. Поскольку на устойчивость рассматриваемого электропривода большое влияние оказывает величина угла нагрузки, в системе управления была осуществлена коррекция мгновенного задания на скорость с целью поддержания в пусковом режиме постоянной величины этого угла. Введенная в скалярную систему управления векторная коррекция переменных позволяет в любой момент времени ориентировать вектор тока статора относительно вектора потокосцепления ротора. Таким образом, в системе управления синхронизированного частотного электропривода обеспечена стабилизация пускового момента. Это позволяет использовать данный ЭП на механизмах с циклическим режимом работы.

Статья написана при поддержке гранта РФФИ №17-48-480492 «Анализ, математическое моделирование и оптимизация управления электромеханическими системами с электроприводами переменного тока мехатронных устройств, манипуляторов и грузоподъемных механизмов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мещеряков В.Н. Системы регулируемого асинхронного электропривода для подъемно-транспортных механизмов: монография. Липецк: ЛГТУ, 2005. 112 с.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. М.: Академия, 2006. 272 с.
3. Мещеряков В.Н., Соломатин П.Н. Синхронизированный асинхронный электропривод с частотным управлением // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. № 2. С. 51-57.
4. Белов М.П., Новиков А.Д., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Академия, 2007. 576 с.
5. Мещеряков В.Н., Башлыков А.М., Мещерякова О.В. Система скалярного частотного управления синхронизированной асинхронной машиной с питанием обмоток статора и ротора от автономного инвертора тока // Современные сложные системы управления X HTCS'2012: материалы Международной научно-технической конференции. Старый Оскол: ТНТ, 2012. С. 50-52.
6. Мещеряков В.Н., Карантаев В.Г. Применение беспонисковой адаптивной системы для управления ЭП с вентильным двигателем // Электротехнические комплексы и системы. 2006. №2. С. 38-40.
7. Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С. Частотный асинхронный электропривод с коррекцией фазового сдвига между моментобразующими векторами // Системы управления и информационные технологии. 2017. №2 (68). С. 48-57.
8. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. СПб.: Питер, 2008. 288 с.
9. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА, 2008. 368 с.
10. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. М.: МИ, 2015. 373 с.

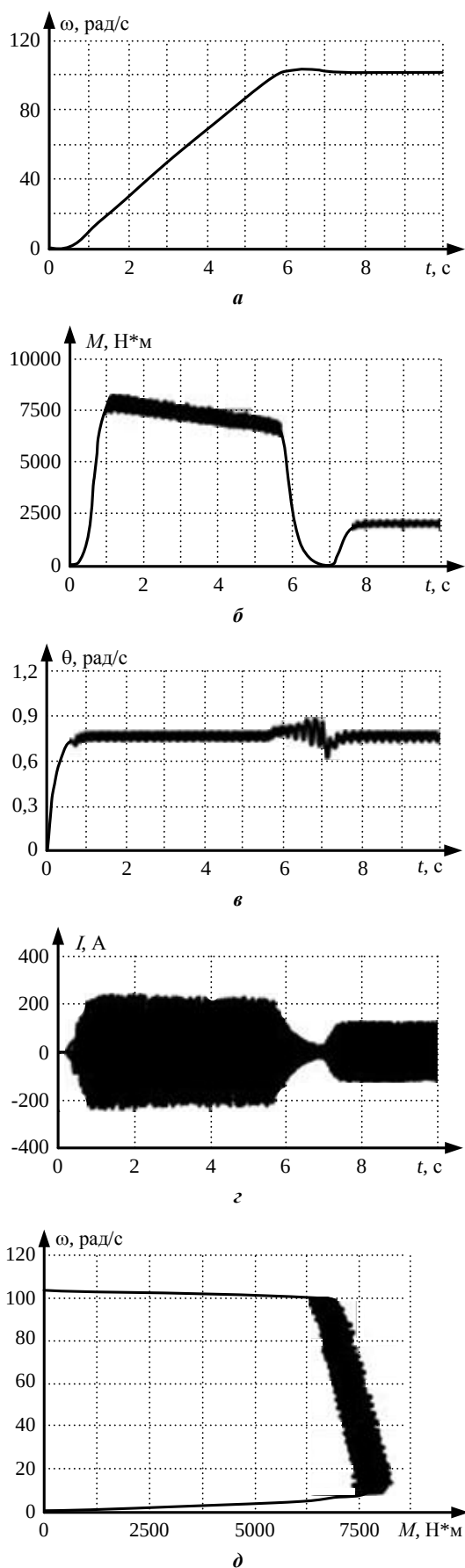


Рис. 5. Результаты моделирования синхронизированного асинхронного электропривода

Поступила в редакцию 01 декабря 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SYNCHRONIZED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH VARIABLE-FREQUENCY CONTROL

Victor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of electric drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Dmitriy S. Sibirtsev

Postgraduate Student, the Department of electric drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

At the end of the last century among alternating-current adjustable drives the greatest distribution was gained by induction motors with a phase rotor. They were established on conveyors and cranes. It was caused by the relative simplicity of regulation of a rotation frequency of the engine by means of impact on a rotor chain. Application of a certain way of regulation in such drives is complicated presently by the fact that the majority of frequency transformers are intended for application in drives as a part of which the induction motor with a short-circuited rotor is established. Short circuit of a phase winding leads briefly to the significant increase in losses in the course of dispersal and speed control of rotation of the engine. If you connect a winding of a casing of an induction motor with a phase rotor to a frequency transformer, and a rotor winding to a link of a direct current of this converter, the engine will have properties of synchronous one. The electric drive gets an opportunity to be used widely, and characteristics of the engine are absolutely constant. Realization of a similar way of management is considered in this article. The work of the control system is investigated by means of model operation in a software package of Matlab Simulink. The characteristic is given to the received results.

Keywords: Synchronized asynchronous electric drive, slipping induction motor, variable-speed drive, motor, uncontrolled rectifier, self-excited current inverter, control system, control stability, relay current regulator, mathematical model, Matlab Simulink

REFERENCES

1. Meshcheryakov V.N. *Sistemy reguliruemogo asinkhronnogo elektroprivoda dlya pod'emno-transportnykh mekhanizmov* [Systems of the adjustable asynchronous electric drive for hoisting-and-transport mechanisms]. Lipetsk: LGTU Publ., 2005. 112 p. (In Russian)
2. Sokolovskiy G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym upravleniem* [Alternating-current electric drives with variable-frequency control]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 272 p. (In Russian)
3. Meshcheryakov V.N., Solomatin P.N. Synchronized induction electric drive with variable-frequency control. *Izvestiya*

- vuzov. Elektromekhanika*. [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2009, no. 2, pp. 51-57. (In Russian)
4. Belov M.P., Novikov A.D., Rassudov L.N. *Avtomatizirovannyi elektroprivod tipovykh proizvodstvennykh mekhanizmov i tekhnologicheskikh kompleksov* [Automated electric drive of standard production mechanisms and technological complexes]. Moscow, Akademiya Publ., 2007, 576 p. (In Russian)
5. Meshcheryakov V.N., Bashlykov A.M., Meshcheryakova O.V. The system of scalar frequencies control of the synchronized asynchronous motor with a power supply of windings of a casing and a rotor from the independent inverter of current. *Sovremennye slozhnye sistemy upravleniya X HTCS'2012: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. [Modern complex control systems X HTCS'2012: materials of the International scientific and technical conference]. Staryy Oskol, 2012, pp. 50-52. (In Russian)
6. Meshcheryakov V.N., Karantaev V.G. Application of a searchless adaptive system for control of the drive with the barrier-layer engine. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2006, no. 2, pp. 38-40. (In Russian)
7. Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S. The frequency-controlled electric drive with correction of phase shift between torque-producing vectors. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. [Control systems and information technology]. 2017, no. 2 (68), pp. 48-57. (In Russian)
8. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Model operation of electrotechnical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. St. Petersburg, Piter Publ., 2008, 288 p. (In Russian)
9. German-Galkin S.G. *Matlab & Simulink Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PC* [Projection the mekhatronnykh of systems on the personal computer] St. Petersburg, KORONA Publ., 2008. 368 p. (In Russian)
10. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electric drives]. Moscow, MI Publ., 2015, 373 p. (In Russian)

Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С. Синхронизированный асинхронный электропривод с частотным управлением // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 4-8. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-4-8](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-4-8)

Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S. Synchronized Asynchronous Electric Drive with Variable-Frequency Control. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 4-8. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-4-8](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-4-8)

Сарваров А.С., Вечеркин М.В., Петрякова Е.С., Богачева И.Ю., Петушков М.Ю.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ГИБРИДНЫХ РЕАКТОРНО-ТИРИСТОРНЫХ ПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Обоснована актуальность создания простейших по конструкции, малозатратных и энергоэффективных пусковых устройств для высоковольтных двигателей переменного тока. Приведены расчетные осциллограммы электромагнитного переходного момента при прямом и реакторном пуске, а также осциллограммы при различных начальных условиях переключения двигателя на сетевое напряжение. Дана оценка влияния на колебательность электромагнитного переходного момента двигателя моментов времени переключения его на сеть на завершающем этапе реакторного пуска. Обоснована возможность реализации коммутационного процесса практически с полным устранением колебаний электромагнитного переходного момента. Рассмотрены варианты решения проблемы «мягкого» переключения на напряжение сети в современных реакторных устройствах плавного пуска. Рассмотрена идея и схема реализации гибридного реакторно-тиристорного пускового устройства. Обоснована роль высоковольтного тиристорного коммутатора как устройства кратковременного действия, обеспечивающего практическое устранение колебаний переходного момента при переключении двигателя на сеть. Приведены результаты моделирования системы «Реакторно-пусковое устройство – асинхронный двигатель», дающие обоснование реализуемости практически полного устранения колебаний переходного момента при переключении двигателя на сеть на любой стадии пускового процесса.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, реакторный пуск, переходный электромагнитный момент, колебательность, благоприятный момент включения, реакторно-тиристорное устройство.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня, когда на рынке электротехнической продукции представлен широкий ряд пусковых устройств, прямой пуск низковольтных двигателей мощностью свыше 100 кВт и высоковольтных мощностью свыше 800 кВт является признаком низкой технической культуры [1]. Для таких двигателей прямой пуск квалифицируется, как аварийно-опасный режим. Негативные процессы и последствия такого пуска общеизвестны.

В настоящее время на крупнейших металлургических предприятиях России нерегулируемые электроприводы мощностью свыше 250–300 кВт являются высоковольтными и не оснащены в своем большинстве устройствами плавного пуска. Следует отметить, что практически все мощные электроприводы переменного тока, введенные в эксплуатацию в эпоху индустриализации страны, были ориентированы при проектировании на пуск прямым подключением к сети. Эта традиция продолжилась затем и во второй половине XX-го века. В таблице приведены данные по количеству мощных двигателей переменного тока на Магнитогорском металлургическом комбинате [2, 3].

В целом по металлургической отрасли России эти данные могут быть представлены увеличенными на порядок и более, что подтверждает насколько актуальна проблема оснащения нерегулируемых электроприводов переменного тока в этой отрасли пусковыми устройствами.

Количество двигателей переменного тока по группам мощности

В ПАО «ММК» [2]					
Группа мощности, кВт	100-250	250-500	500-1000	1000-5000	Свыше 5000
Количество, шт.	2686	812	553	394	80
В ГОП ПАО «ММК» [3]					
Группа мощности, кВт	150-320		320-1000	Свыше 1000	
Количество, шт.	482		124	21	

В настоящее время для решения задач минимизации негативного влияния пусковых процессов на двигатель и питающую сеть наиболее эффективными являются преобразователи частоты (ПЧ) и пускатели на основе тиристорных регуляторов напряжения (ТРН). Однако стоимость таких устройств для высоковольтных АД продолжает оставаться высокой, что является серьезным препятствием для их широкого применения.

Реакторно-трансформаторные пускатели, ограничивая кратность пусковых токов и колебательную составляющую пускового момента, при затяжном пуске приводят к значительным тепловым потерям в двигателе. Для сокращения длительности пуска обычно производят раннее переключение двигателя на сеть, что приводит к заметным колебаниям переходного электромагнитного момента, кратность которых соизмерима с кратностью начального пускового момента.

В этой связи задачи, связанные с разработкой сравнительно недорогих способов и устройств пуска, основанных на применении реакторов, автотрансформаторов и других им подобных устройств токоограничения, не утратили свою актуальность.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

При пуске АД с ограничением питающего напряжения решаются две задачи: снижаются кратность размаха колебательной составляющей электромагнитного момента [4, 5] и пусковой ток статора. Однако, если пуск двигателя будет слишком затяжным, то пусковые потери могут вдвое и более превысить потери при прямом пуске [6]. На металлургических предприятиях питающие сети, как правило, являются мощными, что позволяет считать первостепенной задачей при пуске АД ограничение амплитуд ударных пусковых моментов (кратности размаха колебаний момента k_0).

Как известно, реакторный пуск высоковольтных АД является двухступенчатым. Если двигатель пускают при нулевых начальных условиях, то характер переходных процессов на первой ступени пуска определяется только характеристиками двигателя и реактора [7]. Типичные расчетные зависимости переходного электромагнитного

момента при прямом и реакторном пуске высоковольтного инерционного асинхронного электропривода представлены на **рис. 1**. Расчеты проведены для высоковольтного АД с $P_n = 800$ кВт, $U_n = 6$ кВ, $M_n = 5100$ Н·м [4].

При переходе к реакторному пуску кратность размаха колебаний начального пускового момента k_0 (**рис. 1, б**) снижается практически в 3 раза в сравнении с прямым пуском (**рис. 1, а**), что заметно снижает динамические нагрузки в механической части электропривода. Необходимо отметить, что в теории и практике применения реакторного пуска недостаточно исследованным остается вопрос о выборе времени переключения на сеть. Обычно рекомендуется осуществлять переключение на сеть при достижении ротором двигателя скорости, близкой к номинальному значению [4], что приводит к значительному увеличению длительности пуска и соответственно тепловых потерь в двигателе.

Переключение на сеть происходит при ненулевых условиях, которые в реакторном пуске не учитываются. На характер изменения переходного момента и соответственно тока статора, как известно [8], в значительной степени влияют условия (мгновенные значения тока и напряжения) в момент времени $t_{пер}$. На **рис. 2** приведены расчетные осциллограммы переходных электромагнитных моментов, полученные при различных начальных условиях переключения на напряжение питающей сети. Осциллограмма на **рис. 2, а** соответствует неблагоприятным начальным условиям переключения. В этом случае размах колебаний достигает 8-кратных значений. При благоприятных начальных условиях (**рис. 2, б**) размах колебаний переходного электромагнитного момента снижается до малозначимых величин. Интервал между указанными моментами времени переключения на сетевое напряжение на **рис. 2** составляет всего 0,011 с, т.е. практически половину периода питающего напряжения сети.

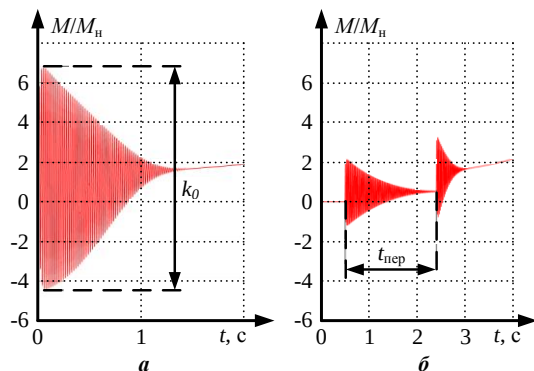


Рис. 1. Расчетные зависимости электромагнитного момента при прямом и реакторном пуске

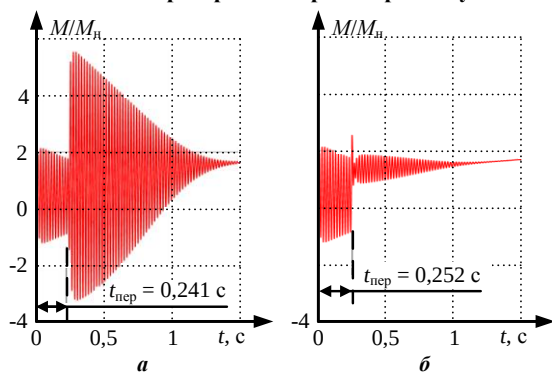


Рис. 2. Расчетные зависимости электромагнитного момента при различных начальных условиях переключения на напряжение сети

Задача правильного выбора момента переключения особенно важна, поскольку он является единственным управляемым параметром при реакторном пуске. Современные типовые промышленно-выпускаемые устройства реакторного пуска не обеспечивают техническую реализацию процесса переключения при благоприятных моментах времени $t_{пер}$. Время срабатывания высоковольтных выключателей обычно составляет 5-10 периодов питающего напряжения.

На пути совершенствования реакторных пусковых устройств в качестве главных задач следует выделить:

1. Обеспечение переключения АД при благоприятных условиях для переключения двигателя на сетевое напряжение с полным устранением колебательной составляющей переходного момента

2. Оптимизация длительности реакторного пуска АД по минимуму потерь в двигателе.

ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Сокращение длительности пуска не только способствует снижению потерь в двигателе, но и позволяет применить реактор с меньшими массогабаритными показателями. Часто габаритные размеры пускового реактора являются сдерживающим фактором для их внедрения [9]. Действительно, на практике реакторы достаточно включить на несколько секунд – до установления по условиям питающей сети допустимой кратности тока статора. В [9] предлагается шунтировать реактор при установлении номинального тока и ограничивать ток статора в пусковом режиме [10] на уровне 2,0-3,0 I_n . Длительность пуска при этом не превышает 10 с. За этот интервал времени можно допустить кратковременный перегрев обмотки реактора.

Группой «РУСЭЛТ» предложено реакторное устройство плавного пуска СПРИНТ-В-Р [11], в котором предусмотрена дополнительная обмотка подмагничивания с тиристорной группой управления. В начальный момент при пуске электродвигателя подмагничивание отсутствует и индуктивное сопротивление пускового тока на уровне 1,5-3 $I_{ном}$. В последующем, при снижении пускового тока электродвигателя происходит увеличение тока подмагничивания, которое обеспечивает удержание тока электродвигателя на том же уровне. После разгона двигателя (падение тока ниже 3 $I_{ном}$) ток подмагничивания достигает максимального значения, при этом индуктивное сопротивление реактора становится минимальным. Длительность пуска с применением данного устройства регламентируется пределами 50-110 с. Пуск завершается шунтированием реактора.

Благоприятный процесс перехода на сетевое напряжение обеспечивает, как показали исследования, трансформаторно-тиристорный пускатель [5, 12-14], основным недостатком его является значительный ток через тиристорный коммутатор во вторичной низковольтной обмотке. Однако при кратковременном регулировании этот недостаток является не столь значимым.

В данной статье предлагается к рассмотрению идея создания гибридного реакторно-тиристорного пускового устройства, принципиальная схема которого приведена на **рис. 3**.

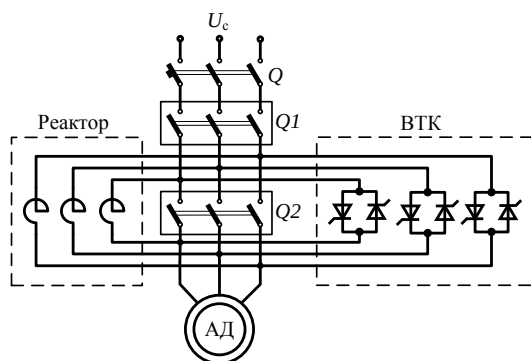


Рис. 3. Принципиальная схема гибридного реакторно-тиристорного пускового устройства

По окончании этапа реакторного пуска переход на сетевое напряжение осуществляется шунтированием реактора автоматическим выключателем Q_2 . Среднее время срабатывания высоковольтного (вакуумного или масляного) выключателя, как уже отмечалось, составляет в среднем 0,2-0,25 с. Естественный разброс длительности коммутации вакуумного выключателя не позволяет решить задачу подключения двигателя на полное напряжение в благоприятные моменты времени. По этой причине предлагается дополнительно применить высоковольтный тиристорный коммутатор (ВТК) как устройство кратковременного действия с длительностью рабочего времени менее 0,5 с. При этом требования к данному устройству и его стоимостные показатели могут заметно снижены в сравнении с традиционными полупроводниковыми устройствами пуска.

ВТК, синхронизированный с сетью, позволит на интервале времени срабатывания высоковольтного выключателя реализовать предварительное подключение двигателя к сети в благоприятный момент времени в течение времени срабатывания Q_2 . После его срабатывания реактор и тиристорный коммутатор шунтируются контактами выключателя Q_2 и естественным образом выводятся из работы. На рис. 4 приведены результаты моделирования данного процесса.

На рис. 4, а показан процесс при изменении угла управления тиристорами по закону $\alpha = 90 \exp(-0,5t)$, при этом наблюдаются колебания момента с кратностью размаха $0,6M_n$. При изменении угла управления по закону $\alpha = 150 \exp(-2t)$ на момент шунтирования реактора возникают более благоприятные начальные условия, о чем свидетельствует характер изменения переходного момента на рис. 4, б. Процесс шунтирования реактора начинается в момент времени $t_{пер}$, завершается без колебаний момента. Длительность работы ВТК при этом составляет не более половины периода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Гибридное пусковое устройство на основе реактора и высоковольтного тиристорного коммутатора позволяет осуществить переключение АД на сетевое напряжение на любом интервале процесса пуска с целью оптимизации длительности реакторного пуска АД по минимуму потерь в двигателе.

2. Исследования показали, что при кратковременном действии высоковольтного тиристорного коммутатора технически реализуется возможность обеспечения благоприятного момента времени переключения двигателя на сетевое напряжение с полным устранением колебательной составляющей переходного момента.

3. Время работы тиристорного коммутатора не превышает 0,5 с, что требует разработки новой концепции по созданию тиристорного пускового устройства кратковременного действия.

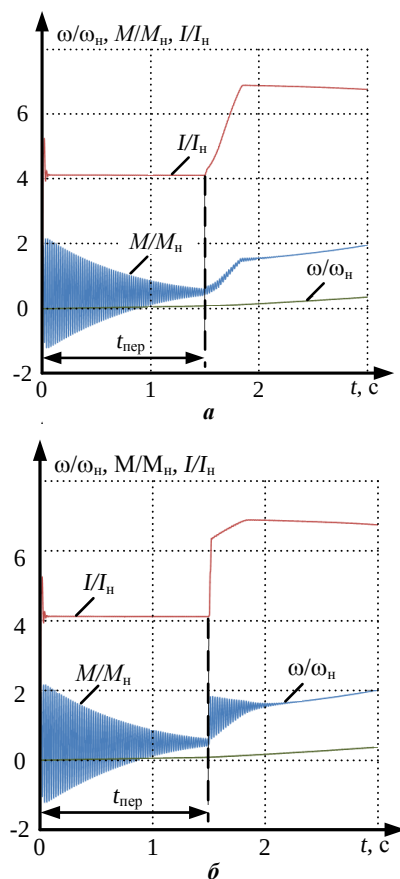


Рис. 4. Расчетные зависимости электромагнитного момента при реализации реакторного пуска с ВТК

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Значение автоматизированного электропривода для модернизации экономики // Труды VII Международной (VII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу. Иваново, 2012. С. 4-9.
- Осипов О.И., Славгородский В.Б. Состояние и перспективы модернизации автоматизированного электропривода прокатных станов в черной металлургии // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004, Магнитогорск, 14-17 сентября 2004 г.). Ч. 1. Магнитогорск, 2004. С. 16-23.
- Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Вечеркин М.В. Основы построения трансформаторно-тиристорных пусковых устройств для высоковольтных асинхронных электроприводов: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 105 с.
- Оценка колебательной составляющей переходного момента и выбор времени переключения на сеть при реакторном пуске высоковольтных асинхронных электроприводов / Вечеркин М.В., Сарваров А.С., Макаров А.В., Фахритдинова Г.М. // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». 2016. Т.16. №4. С. 84-88.
- Моделирование пусковых процессов асинхронных двигателей при использовании тиристорных регуляторов напряжения, реакторов, автотрансформаторов и трансформаторно-тиристорных пусковых устройств / Славгородская Е.В., Славгородский В.Б., Сарваров И.А., Вечеркин М.В. // Труды VII Международной (VII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2012. С. 350-355.

6. Энергосберегающий асинхронный электропривод / Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 256 с.
7. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / Соколов М.М., Петров Л.П., Масандилов Л.Б., Ладензон В.А. М.: Энергия, 1967. 201 с.
8. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей: М.: Энергоиздат, 1981. 184 с.
9. Пат. 2407139 Российская Федерация, МПК H02P1/28, H01F21/00, H01F29/04. Устройства плавного пуска электродвигателя переменного тока и реактор для указанного устройства / Барский В.А. Заявл. 10.03.2009; опубл. 20.12.2010.
10. Барский В.А., Быканов Р.К. Опыт разработки и применения серии устройств плавного пуска типа РУПП // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Вип. 3/2012 (19). С. 86-89.
11. www.ruselt.ru/catalogs/ruselt-catalog-ac-dc.pdf
12. Инновационные разработки ГОУ ВПО «МГТУ» в области создания высокочастотных и энергосберегающих электроприводов / Селиванов И.А., Лукьянов С.И., Карандаев А.С., Сарваров А.С. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2009. № 2. С. 42-48.
13. Пусковое устройство трехфазного высоковольтного электродвигателя переменного тока: Свидетельство РФ на полезную модель №82963 / Анисимов Д.М., Сарваров И.А., Петушков М.Ю., Сарваров А.С. Опубл. в БИМП. 2009. №3.
14. Вечеркин М.В., Петушков М.Ю., Сарваров А.С. Возможности трансформаторно-тиристорной структуры как пускового устройства высоковольтных асинхронных двигателей // *Вестник Ивановского государственного технического университета*. 2013. Вып. 1. С. 88-91.

Поступила в редакцию 07 декабря 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

PECULIARITIES OF IMPLEMENTATION OF HYBRID THYRISTER-REACTOR AC MOTOR STARTERS

Anwar S. Sarvarov

D.Sc. (Eng.), Professor, the Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Maksim V. Vecherkin

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

Irina Yu. Bogacheva

Assistant Professor, the Department of physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Ekaterina S. Petryakova

Undergraduate of the Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Mikhail Yu. Petushkov

D.Sc. (Eng.), Professor, the Department of Electronics and Microelectronics Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The paper rationalizes the relevance of the development of a high-voltage ac motor starter that is simple in construction, low cost and energy effective. It also presents the calculated oscillograms of the electromagnetic transient moment, when the reactor or across-the-line starting of a motor takes place, and the oscillograms at various initial conditions of switching the motor to the supply-line voltage. It is estimated how the timing of switching the engine to the supply-line voltage influences the oscillation of the electromagnetic transient moment at the final stage of the reactor start. The paper also verifies the possibility of the switch process implementation with an almost complete elimination of the oscillation of the electromagnetic transient moment and discusses the ways of solving the problem of the soft switching of a reactor device with a soft start to the line voltage. The idea and the scheme of the implementation of a hybrid thyristor-reactor of a motor starter is estimated and discussed. The role of the high voltage thyristor switch considered as a device of short time action that provides some practical elimination of the oscillation of the electromagnetic transient moment when switching to the supply-line voltage, is rationalized as well. The paper discusses the results of simulating the system "Reactor start device as an induction motor", verifying the possibility of complete elimination of the oscillation of the electromagnetic transient moment when switching the engine to the supply-line voltage at any stage of the starting process.

Keywords: Asynchronous motor, reactor start-up, transient electromagnetic moment, oscillation, favorable switching point, reactor-thyristor device

REFERENCES

1. Onishchenko G.B., Yunkov M.G. The importance of the automatic electric drive to the modernization of the economy. Proceedings of the 7th International (the 7th All-Russian) Scientific and Technical Conference on the automatic electric drive. Ivanovo, 2012, pp 4-9. (In Russian)
2. Osipov O.I., Slavgorodsky V.B. The current state and perspectives of modernization of the automatic electric drive for rolling mills in ferrous metallurgy. Proceedings of the 4th International (the 15th All-Russian) Conference on the automatic electric drive "The automatic electric drive in the 21st century: ways of development", part 1, Magnitogorsk, 2004, pp. 16-23. (In Russian)
3. Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu., Vecherkin M.V. *Osnovy postroeniya transformatorno-tiristornykh puskovykh ustroystv dlya vysokovol'tnykh asinkhronnykh elektroprivodov* [Fundamentals of the construction of transformer thyristor startup systems for high voltage asynchronous drives]. Magnitogorsk, 2013, 105 p. (In Russian)
4. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Makarov A.V., Fachretdinova G.M. The assessment of the oscillating term of the

- transient moment and the timing of switching to the supply-line voltage at reactor start of high voltage asynchronous electric drives. *Vestnik YuUrGU. Ser. «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Series "Power engineering"], 2016, vol. 16, no. 4, pp. 84-88. (In Russian)
5. Slavgorodskaya E.V., Slavgorogsky V.B., Sarvarov I.A., Vecherkin M.V. Modelling of the startup process of asynchronous engines when using thyristor voltage regulators, reactors, autotransformers and transformer thyristor startup systems. Proceedings of the 7th International (the 7th All-Russian) Scientific and Technical Conference on the automatic electric drive. Ivanovo, 2012, pp. 350-355. (In Russian)
 6. Braslavsky I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energoberegayushchiy asinkhronnyy elektropriwod* [Energy saving asynchronous electric drive]. Moscow, Academy, 2004. 256 p. (In Russian)
 7. Sokolov M.M., Petrov L.P., Masandilov L.B., Ladenson V.A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v asinkhronnom elektroprivode* [Electromagnetic transients in an asynchronous engine], Moscow, 1967, 201 p. (In Russian)
 8. Petrov L.P. *Upravlenie puskom i tormozheniem asinkhronnykh dvigateley* [Start-stop control of asynchronous engines]. Moscow, 1981, 184 p. (In Russian)
 9. Barsky V.A. *Ustroystva pлавного пуска elektrodvigatelya peremennogo toka i reaktor dlya ukazannogo ustroystva* [The reduced-current starter of an ac motor and its reactor]. Patent RF, no. 2407139, 2010.
 10. Barsky V.A., Bikanov R.K. Development and implementation of a series of reduced-current starters. *Elektromekhanichni I energozberigayuchi sistemi* [Electromechanical low power systems]. 2012, iss. 3(19).
 11. www.ruselt.ru/catalogs/ruselt-catalog-ac-dc.pdf
 12. Selivanov I.A., Lukyanov S.I., Karandaev A.S., Sarvarov A.S. Innovations Of NMSTU in the field of the development of highly dynamic energy efficient electric drives. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no. 2, pp. 42-48. (In Russian)
 13. Anisimov D.M., Sarvarov I.A., Petushkov M.Yu., Sarvarov A.S. *Puskovoe ustroystvo trekhfaznogo vysokovol'nogo elektrodvigatelya peremennogo toka* [The startup system of a three phase high-voltage ac motor]. The certificate on the utility model № 82963, 2009, no. 3.
 14. Vecherkin M.V., Petushkov M.Yu., Sarvarov A.S. Capacity of the transformer thyristor structure as a startup system of high voltage asynchronous drives. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Technical University], 2013, iss. 1, pp. 88-91. (In Russian)

Сарваров А.С., Вечеркин М.В., Петрякова Е.С., Богачева И.Ю., Петушков М.Ю. Особенности реализации гибридных реакторно-тиристорных пусковых устройств для двигателей переменного тока // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 9-13. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-9-13](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-9-13)

Sarvarov A.S., Vecherkin M.V., Bogacheva I.Yu., Petryakova E.S., Petushkov M.Yu. Peculiarities of Implementation of Hybrid Thyristor-Reactor AC Motor Starters. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 9-13. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-9-13](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-9-13)

Шубин А.Г.¹, Логинов Б.М.¹, Гасияров В.Р.^{2,3}, Маклакова Е.А.³¹ ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова³ Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ОГРАНИЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КЛЕТИ ПРОКАТНОГО СТАНА

Приведена характеристика реверсивной клетки «кварто» толстолистового стана 5000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК). В результате экспериментальных исследований, выполненных на стане, подтверждено значительное превышение динамических моментов электроприводов верхнего и нижнего валков при захвате металла над установившимися значениями. Определены основные причины неудовлетворительных переходных процессов, подтверждена целесообразность разработки способов управления электроприводами, обеспечивающих снижение нагрузок и ограничение колебаний момента при захвате. Предложен способ управления электроприводами, обеспечивающий снижение перерегулирования момента за счет предварительного выбора зазора в шпиндельных соединениях. Рассмотрен способ компенсации динамической ошибки регулирования скорости за счет дополнительного увеличения скорости перед захватом. В результате сравнительного анализа осциллограмм моментов и скоростей электроприводов подтверждено улучшение динамических показателей при реализации предложенных алгоритмов управления. Представлен способ управления электроприводами валков и гидравлическими нажимными устройствами, обеспечивающий улучшение условий захвата за счет предварительного увеличения межвалкового зазора. Приведены осциллограммы скоростей и моментов при различных вариантах задания на изменение положения нажимных устройств. Установлено, что добиться желаемого ограничения динамического момента удастся не во всех случаях. Отмечена необходимость проведения исследований методами математического моделирования. Даны рекомендации по промышленному внедрению разработанных технических решений.

Ключевые слова: толстолистовой прокатный стан, реверсивная клеть, электропривод, динамические нагрузки, ограничение, способы, системы управления, разработка, экспериментальные исследования, внедрение, рекомендации.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования выполнены на примере реверсивной клетки «кварто» стана 5000 ММК, которая является самой мощной прокатной клетью в Европе. Прокатка проводится в несколько проходов по продольно-поперечной схеме с разбивкой ширины [1]. Клеть оснащена двумя рабочими валками, передающими усилие и мощность электропривода (ЭП) непосредственно на металл. Привод каждого рабочего валка осуществляется собственным синхронным двигателем через универсальные шпиндели [2].

Структурная схема установленной системы задания и регулирования скоростей электроприводов валков показана на **рис. 1**. Траектория прохода формируется программой модели АСУ 2-го уровня по критериям производительности стана и получения нужного температурного режима. При формировании задания на скорость в автоматическом режиме из модели прокатки в контроллер уровня 1 поступает таблица из точек желаемой траектории движения. После интерполяции таблицы сигнал заданной линейной скорости проходит через задатчик интенсивности и преобразуется в задание угловой скорости каждого привода с учетом диаметров валков. Основной темп разгона-торможения формируется интерполятором при отработке заданной траектории. Задатчик интенсивности в схеме служит для аварийного ограничения темпа задания.

Характерным динамическим режимом электро-механических систем реверсивной клетки является удар-

ное приложение нагрузки, происходящее в момент захвата металла. Данный режим сопровождается значительным увеличением момента электродвигателей и упругого момента в валопроводах верхнего и нижнего валков. Это приводит к повреждениям и преждевременному износу электрического и механического оборудования, снижению устойчивости технологического процесса и другим негативным последствиям. Основными видами повреждений деталей в линиях главных ЭП толстолистовых станов, обусловленных динамическими нагрузками, являются поломки рабочих валков по шейкам, разрушение головок шпинделей по зеву, выход из строя подшипников и др. [3, 4].

В настоящее время коллективом Южно-Уральского государственного университета при участии авторов проводятся научные исследования по совершенствованию автоматизированных электроприводов и систем управления прокатных станов [5-9]. В рамках проводимых исследований ставится задача определения наиболее значимых факторов, негативно влияющих на динамические нагрузки в валопроводах и электро-механических системах универсальных клетей. При исследованиях применен комплексный подход, включающий математическое моделирование [10-12] и экспериментальные исследования на станах ПАО «ММК» [13-16]. Это позволило разработать способы и алгоритмы управления, которые могут быть эффективно реализованы в системе ограничения динамического момента [17-19]. Общая информация о разработках, выполненных для стана 5000, представлена в настоящей статье.

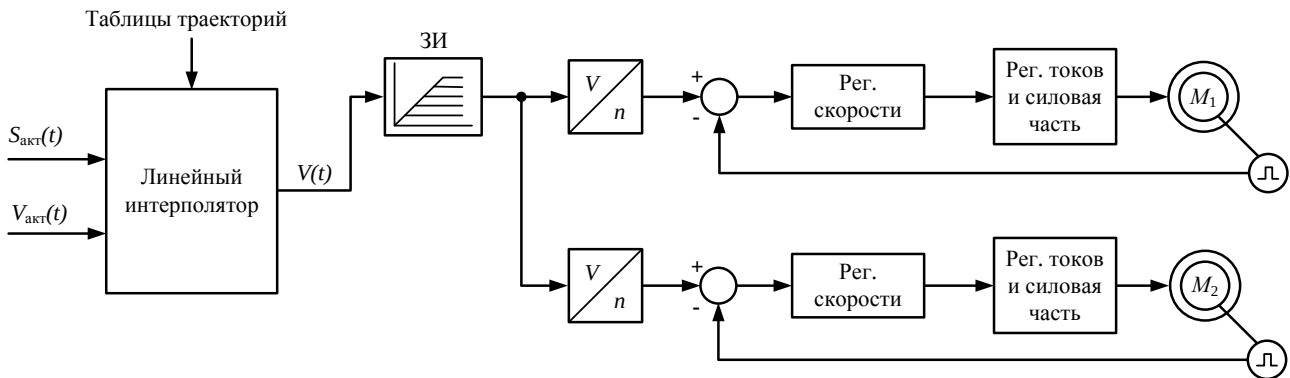


Рис. 1. Схема системы управления скоростью главных ЭП реверсивной клетки стана 5000

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ динамических режимов главных ЭП при захвате металла валками горизонтальной клетки

На рис. 2 представлены осциллограммы скоростей и моментов приводов верхнего (ВГП) и нижнего (НГП) валков в исследуемом динамическом режиме при работе существующей системы регулирования скорости. Перед захватом металла двигатели вращаются с заправочной скоростью, при этом их крутящий момент близок к нулю и может кратковременно изменять знак. Это приводит к раскрытию зазоров в механических передачах от двигателей к валкам, поэтому в момент захвата металла происходит выбор зазоров с ударом.

Анализ рис. 2 позволил сделать следующие выводы:

1. После захвата металла ЭП разгоняются до рабочей скорости с целью увеличения производительности.
2. Динамическое снижение (просадка) скорости НГП составляет около 18% (от 49 до 40 об/мин); аналогичная просадка скорости ВГП – 17%.
3. Перерегулирование момента составляет 41% (максимальное значение 240% при установившемся

170%). Здесь следует заметить, что значение 240% номинального является максимальным, при котором наступает режим отсечки. Прокатка при моментах, значительно превышающих номинальные (в данном случае 170%), для исследуемой клетки является допустимой.

4. В режиме холостого хода и непосредственно перед захватом возникает знакопеременный момент (происходят колебания около нуля). Это говорит о наличии люфтов в механической передаче. Данный вывод сделан при рассмотрении осциллограмм моментов в увеличенном масштабе.

5. В результате анализа аналогичных осциллограмм, полученных при прокатке листов различного профиля, подтверждено, что амплитуда ударного момента при захвате может превышать установившийся момент прокатки более чем в 2 раза. Также значительные динамические моменты возникают при выходе металла из валков. Это доказывает необходимость разработки способов снижения динамических моментов в валопроводах верхнего и нижнего валков горизонтальной клетки.

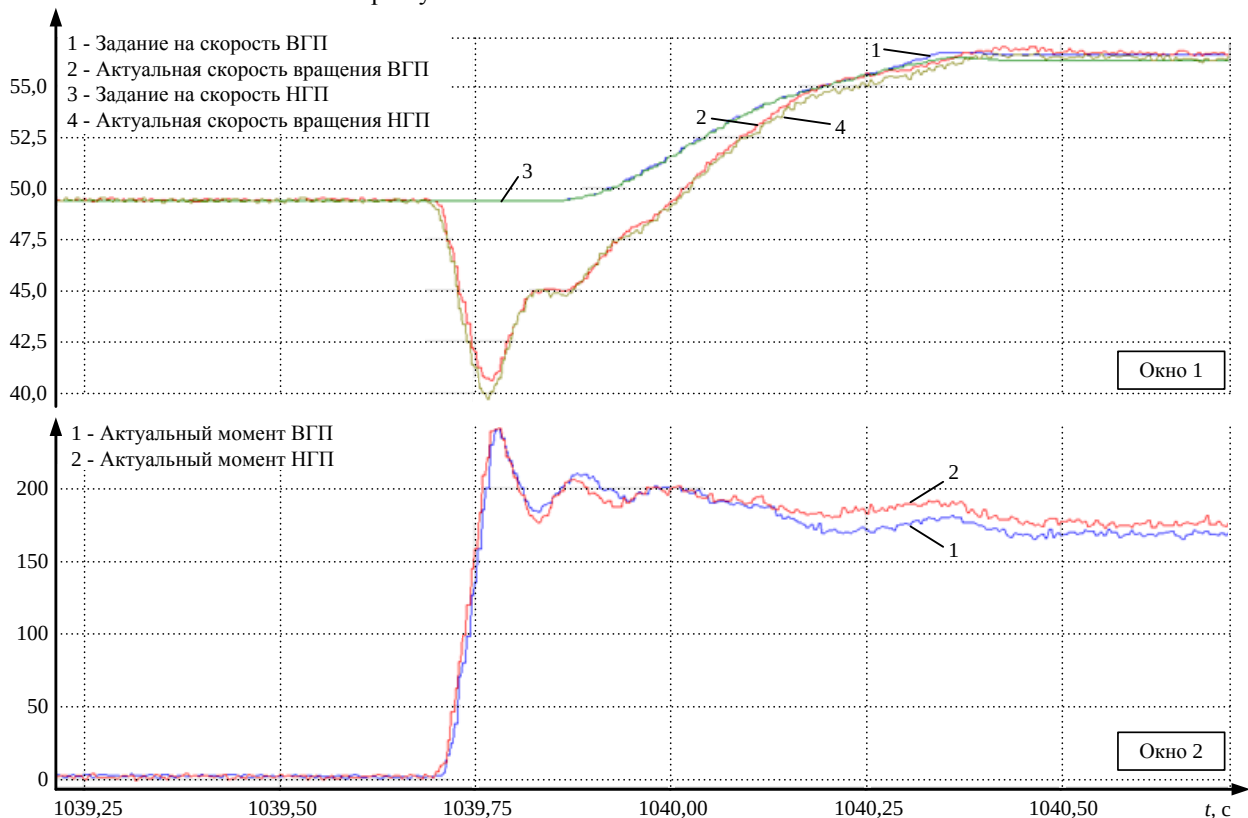


Рис. 2. Переходные процессы при захвате металла валками в существующей системе управления: окно 1 – скорости двигателей главных ЭП, об/мин; окно 2 – крутящие моменты двигателей, % номинальных

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Определение причин, вызывающих ударные нагрузки в валопроводах

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований выделены следующие причины неудовлетворительных динамических процессов:

1. Выбор зазоров в шпиндельных соединениях в момент захвата. При этом величины зазоров не могут контролироваться, но могут быть устранены средствами электропривода.

2. Неудовлетворительные условия захвата, связанные с тем, что зазор валков изначально устанавливается исходя из заданной толщины полосы после прохода. При этом условия захвата во внимание не принимаются.

3. Динамические процессы, вызванные настройкой пропорционально-интегрального регулятора скорости в двухконтурной астатической системе. Известно, что переходные процессы тока, скорости, а следовательно, момента электропривода при такой настройке имеют затухающий характер. Это приводит к возникновению упругих колебаний на валу, что вызывает негативные последствия.

4. Несогласованность скорости входа листа в клеть и линейной скорости вращения валков.

В связи с изложенным ставится задача разработки способов управления, которые обеспечат ограничение динамических моментов электромеханических систем горизонтальной клетки. В качестве основных направлений приняты:

1. Разработка способа управления, обеспечивающего предварительный выбор зазоров (люфтов) в шпиндельных соединениях перед захватом металла.

2. Разработка способа управления, обеспечивающего опережающее воздействие на скорость главного ЭП до захвата металла, с целью исключения перерегулирования момента. Это достигается за счет компенсации динамической ошибки регулирования скорости.

3. Разработка способа управления системой

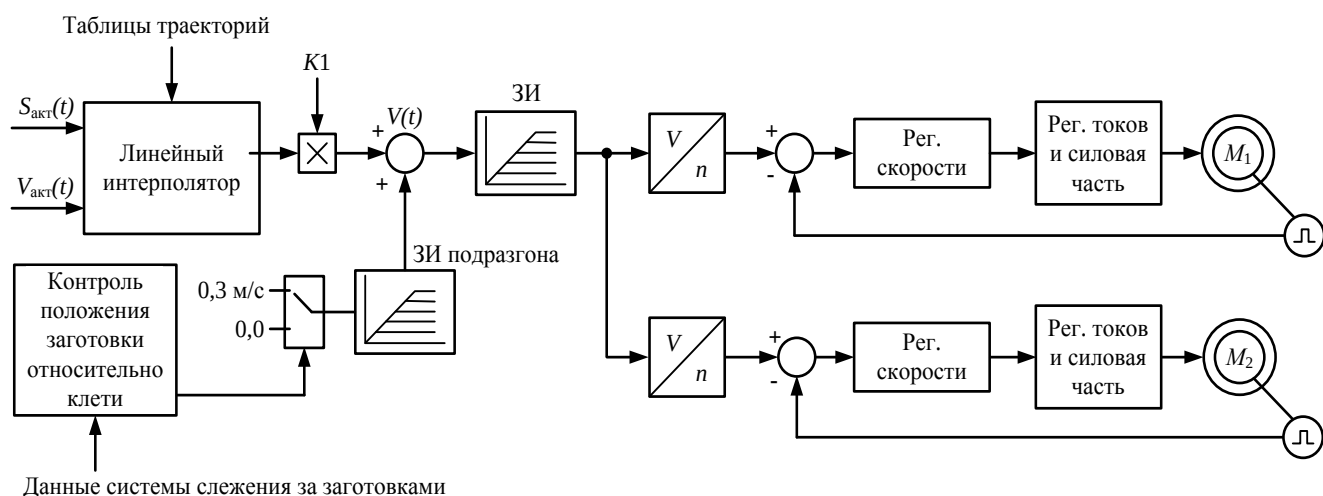


Рис. 3. Схема системы управления ЭП с предварительным ускорением валков

«электропривод горизонтальной клетки – гидравлический привод нажимных устройств», обеспечивающего увеличение межвалкового зазора перед прокаткой с возвращением валков в заданное положение после захвата.

Способ предварительного выбора люфтов в валопроводах электроприводов клетки

Упрощенная функциональная схема системы управления, реализующей предварительный выбор люфтов в механических передачах, показана на рис. 3. Способ осуществляется за счет захвата металла на участке плавного ускорения (подразгона) электропривода. Для определения момента начала подразгона используется информация из существующей системы слежения за металлом на рольгангах. Для формирования добавочной скорости применяется дополнительный задатчик интенсивности (ЗИ подразгона), выходной сигнал которого суммируется с сигналом с выхода интерполятора. Темп дополнительного ускорения установлен экспериментально и составляет $0,22 \text{ м/с}^2$. Схема реализована программным путем в управляющем контроллере клетки.

На рис. 4 показаны осциллограммы процессов при захвате металла с использованием алгоритма данной системы. До захвата задание скорости линейно нарастает, что создает дополнительный положительный динамический момент. Поэтому знакопеременный момент отсутствует, актуальный момент прокатки до захвата положительный, за счет этого обеспечивается выбор люфтов. Просадка скорости НГП происходит от 38,5 до 33 об/мин, что составляет около 14%.

По сравнению с показателем в существующей системе (см. рис. 2) просадка снизилась в 1,3 раза. Перерегулирование момента для НГП составляет 26,4%: максимальное значение 220%, установившееся – 170% номинального. По сравнению с осциллограммами на рис. 2 его величина снизилась в 1,5 раза. Аналогичное снижение динамического момента происходит для ВГП.

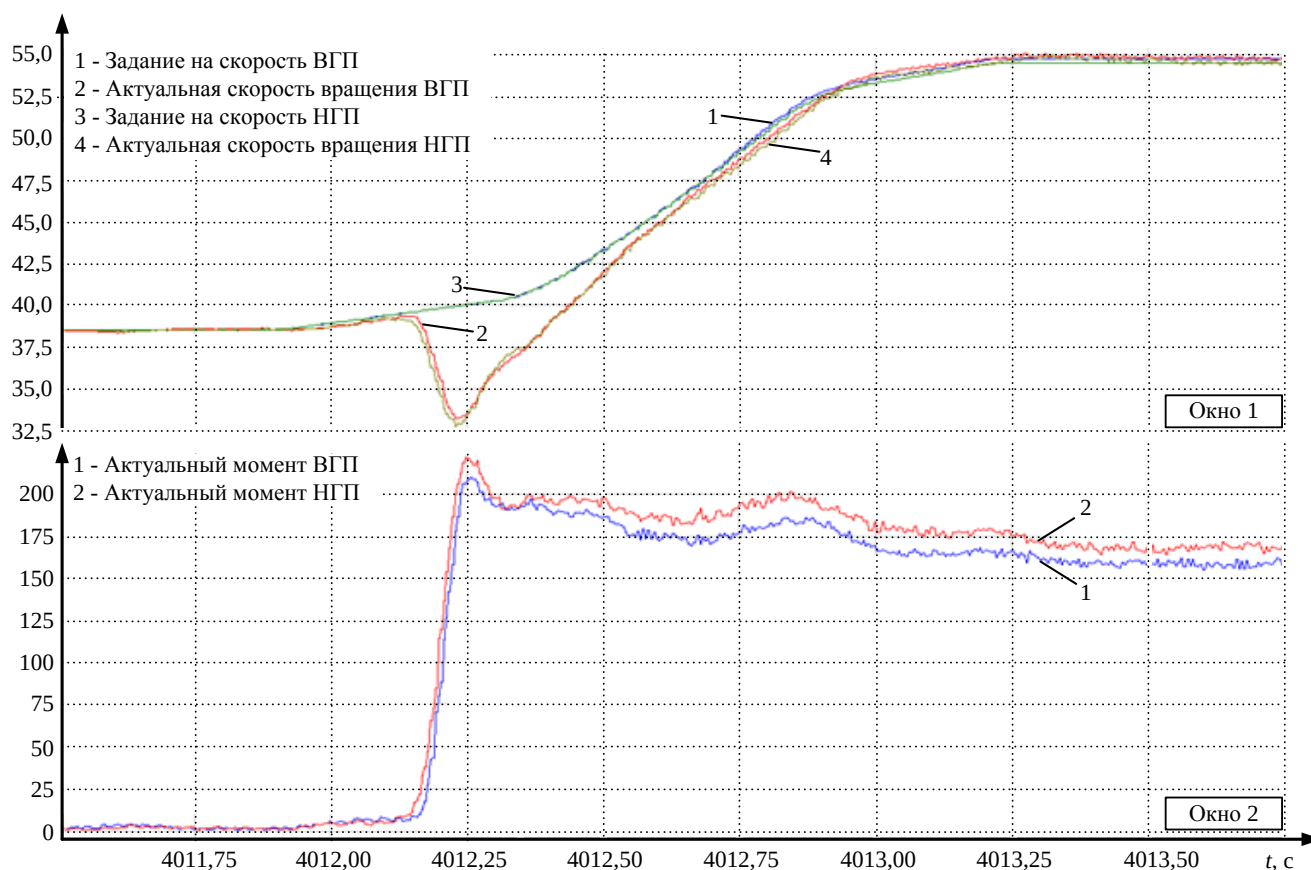


Рис. 4. Захват металла валками с предварительным выбором люфтов

Способ компенсации динамической просадки скорости за счет опережающего увеличения скорости

Отличительная особенность способа заключается в компенсации динамической ошибки регулирования скорости главного ЭП посредством упреждающего повышения скорости до захвата. На **рис. 5, а** показаны осциллограммы скоростей, моментов и усилий прокатки при захвате в существующей системе при прокатке листа «тяжелого» сортамента. Их анализ подтверждает, что в электромеханических системах возникают значительные колебания скорости и момента. Просадка скорости НГП составляет 27% (от 48 до 35 об/мин). Амплитуду динамического момента определить нельзя, т.к. момент превышает уровень насыщения 240%.

Согласно разработанному способу:

- с целью компенсации динамической просадки, скорость ЭП предварительно увеличивается за счет введения сигнала дополнительной коррекции;
- непосредственно после захвата сигнал коррекции снимается.

Схема системы управления, поясняющей реализацию способа, показана на **рис. 6**. Отличием является наличие блока расчета и управления компенсацией просадки скорости. Величина компенсации рассчитывается по ожидаемому моменту главного ЭП (рассчитывается моделью прокатки) и характеристикам системы регулирования скорости. Ожидаемый момент прокатки вычисляется в модели 2-го

уровня. Для определения сигнала компенсации была предварительно получена экспериментальная зависимость динамической просадки скорости от момента нагрузки. Коэффициент динамической жесткости определялся по наклону этой характеристики. В этом плане разработанный способ является развитием принципа упреждающей коррекции скоростей электроприводов клеток [20] и примера его практической реализации для ЭП постоянного тока, рассмотренного в [21, 22].

На **рис. 5, б** приведены осциллограммы, полученные при работе рассматриваемой системы. До захвата металла к основному заданию скорости прибавляется расчетная величина (на осциллограмме увеличение скорости не показано). Она компенсирует динамическую просадку при захвате. При появлении усилия прокатки после входа металла в клеть сигнал компенсации динамической просадки вычитается из основного задания скорости, затем происходит разгон до рабочей скорости.

Из осциллограмм следует, что амплитуда колебаний по сравнению с **рис. 5, а** уменьшилась, а их период увеличился. Кроме того, снизились максимальные величины моментов. Просадка скорости происходит от 52,5 до 44,5 об/мин (на 15%), т.е. снизилась по сравнению с **рис. 5, а** в 1,8 раза. Амплитуда момента составляет около 41% (240% – максимальное значение, 170% – установившееся). Это подтверждает эффективность практической реализации разработанного способа.

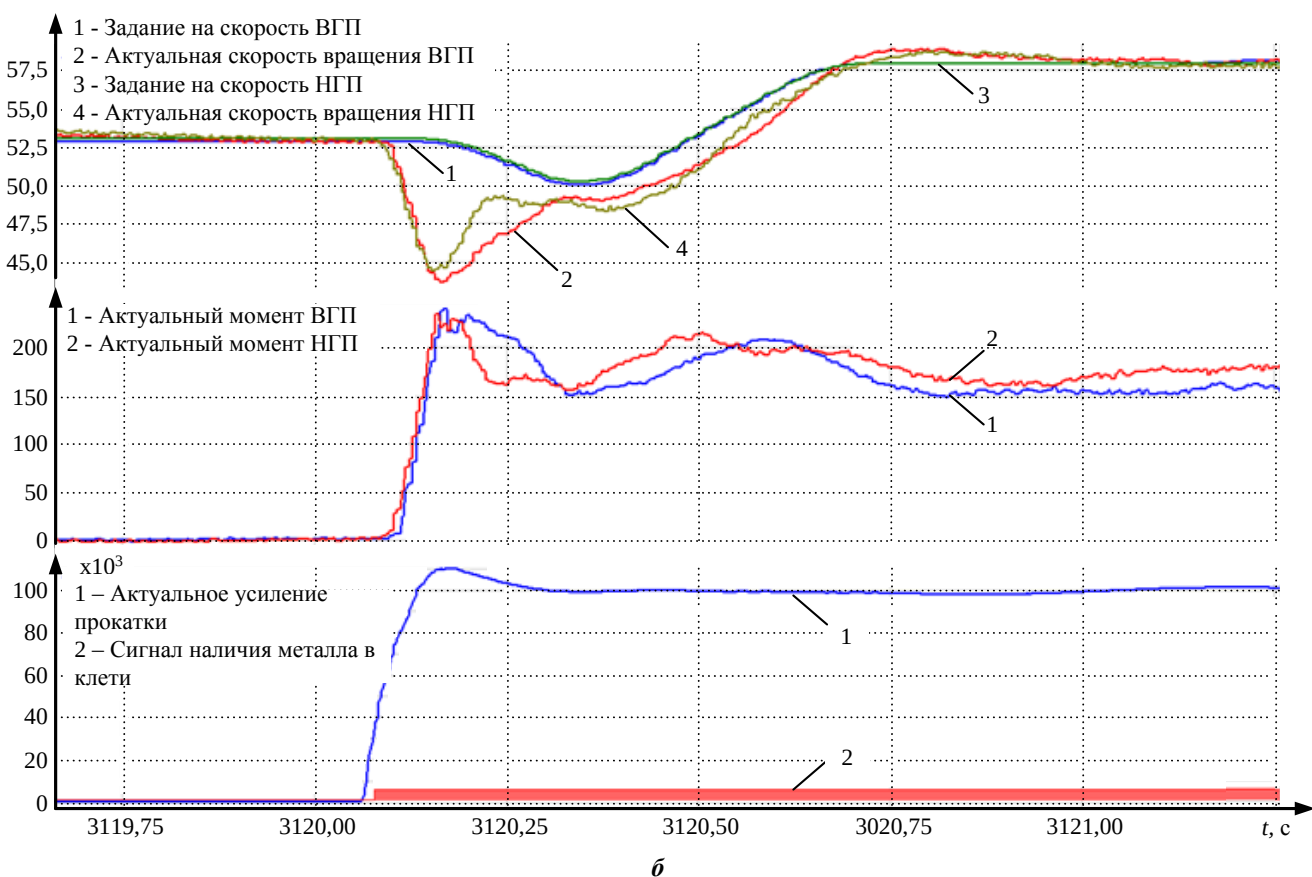
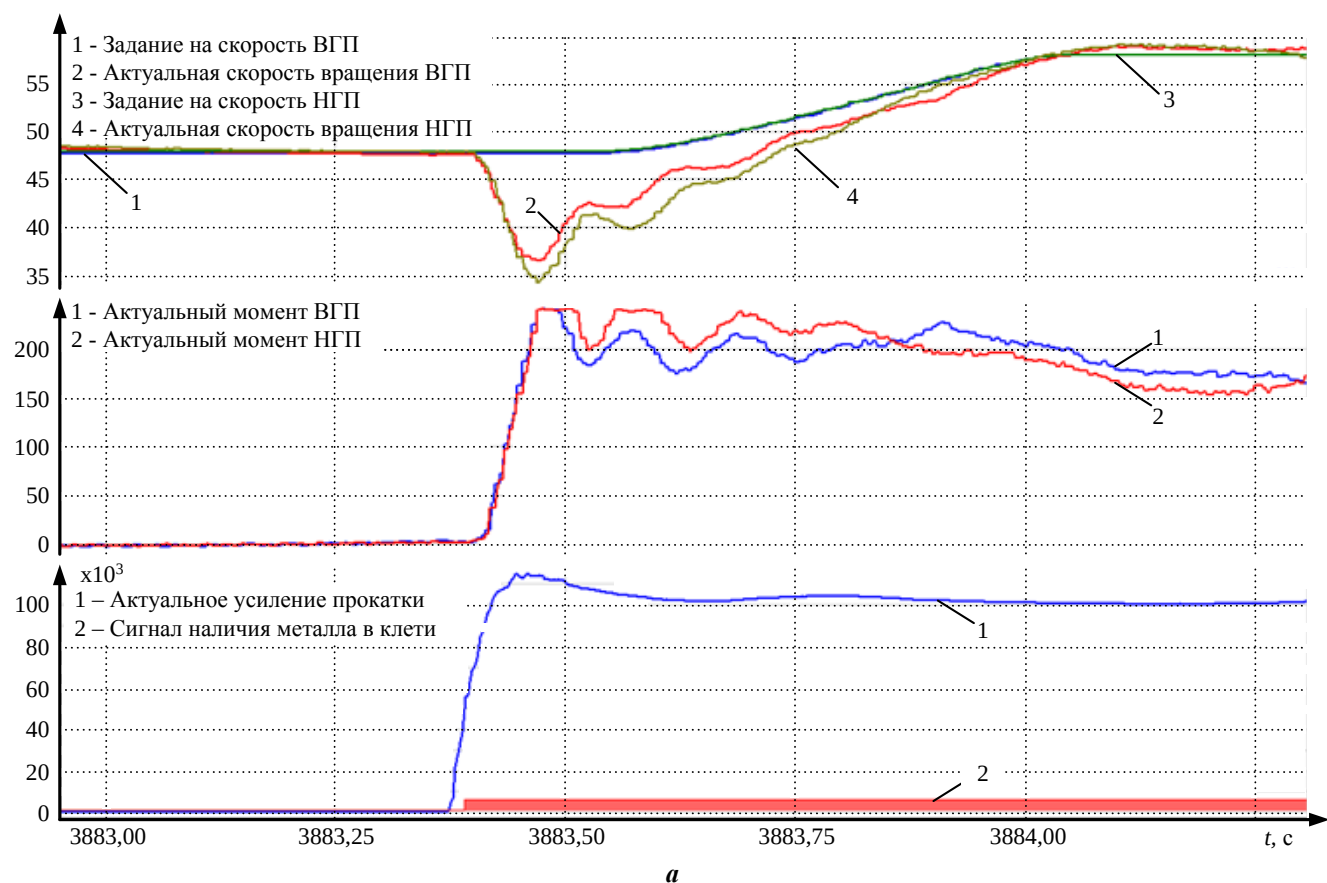


Рис. 5. Переходные процессы при захвате: в существующей системе (а) и в системе с предварительной компенсацией динамической просадки скорости (б)

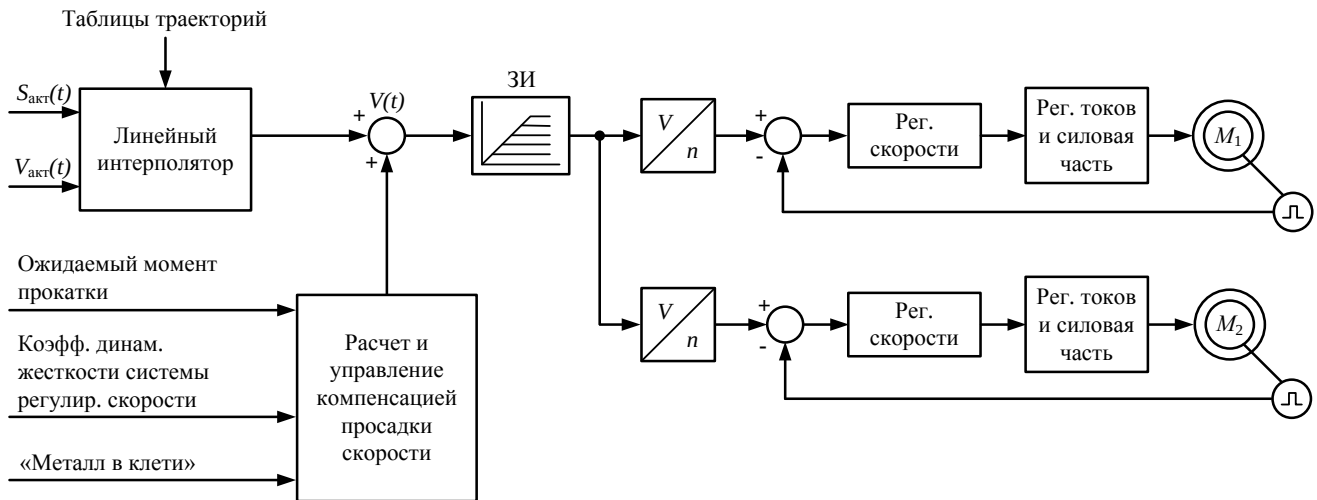


Рис. 6. Структурная схема, поясняющая способ компенсации динамической просадки скорости

Улучшение условий захвата за счет предварительного увеличения межвалкового зазора

Прежде чем перейти к рассмотрению разработанного способа, здесь приводятся краткие пояснения к формированию межвалкового зазора с помощью гидравлических и электромеханических нажимных устройств (соответственно ГНУ и ЭМНУ) реверсивной клетки. На **рис. 7, а** показаны осциллограммы, снятые для случая, когда зазор сразу настроен на требуемую толщину листа на выходе из клетки. Величина зазора при прокатке формируется путем двух независимых воздействий:

- за счет перемещения верхнего вала, осуществляемого путем предварительной установки ЭМНУ (воздействие сверху), например, на зазор 10 мм (на **рис. 7** не показан);

- за счет перемещения нижнего рабочего вала гидравлическими нажимными устройствами (НУ) – воздействие снизу, например, на зазор 4,4 мм на рассматриваемом рисунке.

Таким образом, межвалковый зазор до захвата составляет 14,4 мм, но на **рис. 7, а** показана только его изменяемая часть, которая формируется за счет перемещения гидравлических НУ. Поэтому применяются термины «Актуальный зазор ГНУ» и «Заданный зазор ГНУ». Поскольку регулирующее воздействие на электромеханические НУ в процессе прокатки не осуществляется, составляющая межвалкового зазора от ЭМНУ принимается постоянной.

Суть разработанного способа поясняется с помощью осциллограмм, представленных на **рис. 7, б**. Зазор при захвате устанавливается больше, чем требуется для

получения целевой толщины, а затем при входе головной части листа в клетку уменьшается до нужной величины. Перед входом «головы» в очаг деформации рабочие валки вращаются с линейной скоростью, горизонтальная составляющая которой равна скорости перемещения листа. При этом очаг деформации в вертикальном направлении установлен на толщину прокатываемого металла со стороны входа. Через установленное время после входа головной части очаг деформации замыкается на заданное значение, соответствующее толщине после прохода. Одновременно с этим окружная скорость рабочих валков повышается пропорционально скорости перемещения гидравлического НУ.

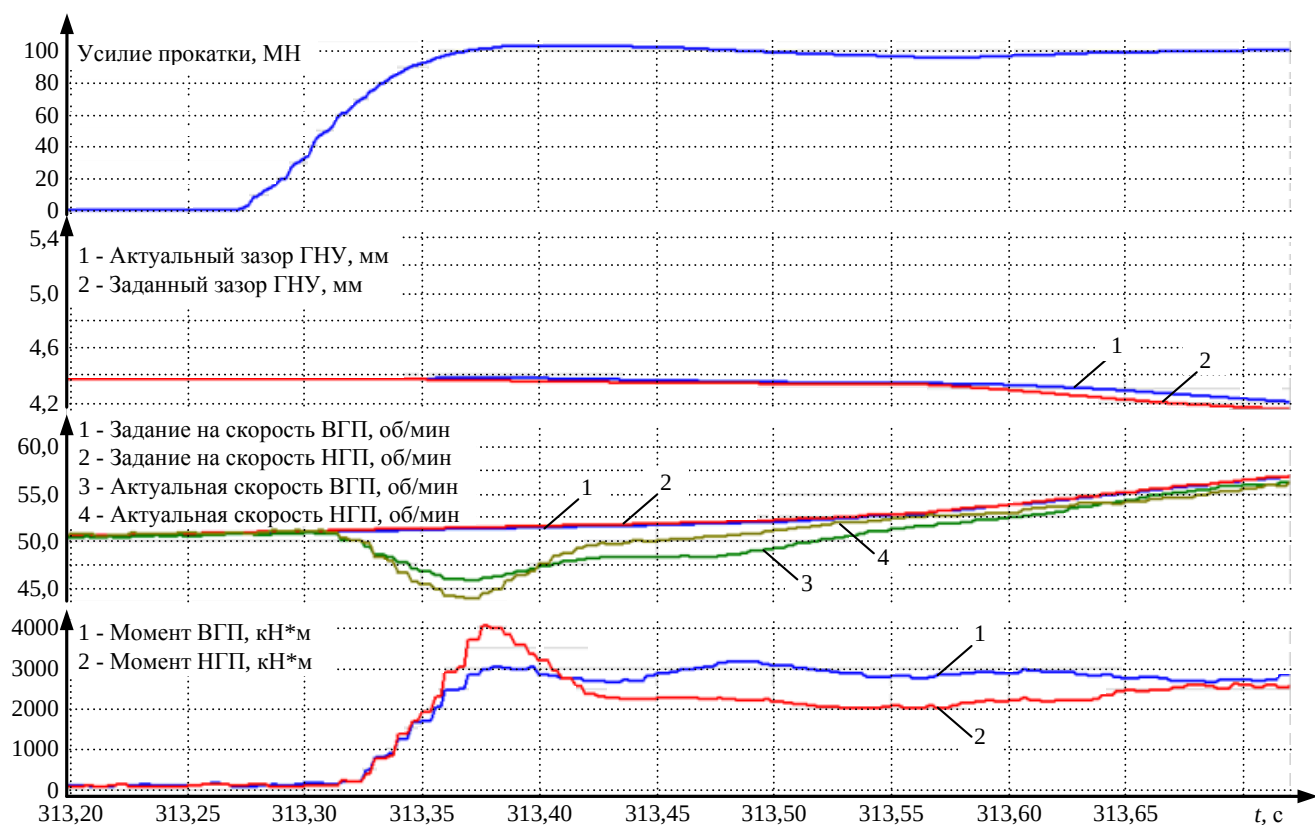
Данный способ является примером реализации принципа параметрического регулирования толщины головного участка полосы путем упреждающего увеличения зазора валков перед ее входом в клетку с последующим возвращением нажимных устройств в заданное положение [20, 23-25].

Для реализации рассмотренной последовательности действий разработана функциональная схема, показанная на **рис. 8**. На данной схеме логика управления запрещает работу регулятора толщины до момента, когда «голова» металла пройдет заданное расстояние в валках, и за счет этого отключает предварительную компенсацию растяжения клетки (т.е. увеличивает зазор на эту величину). Затем после пропуска «головы» происходят активация регулятора толщины и введение сигнала компенсации растяжения клетки.

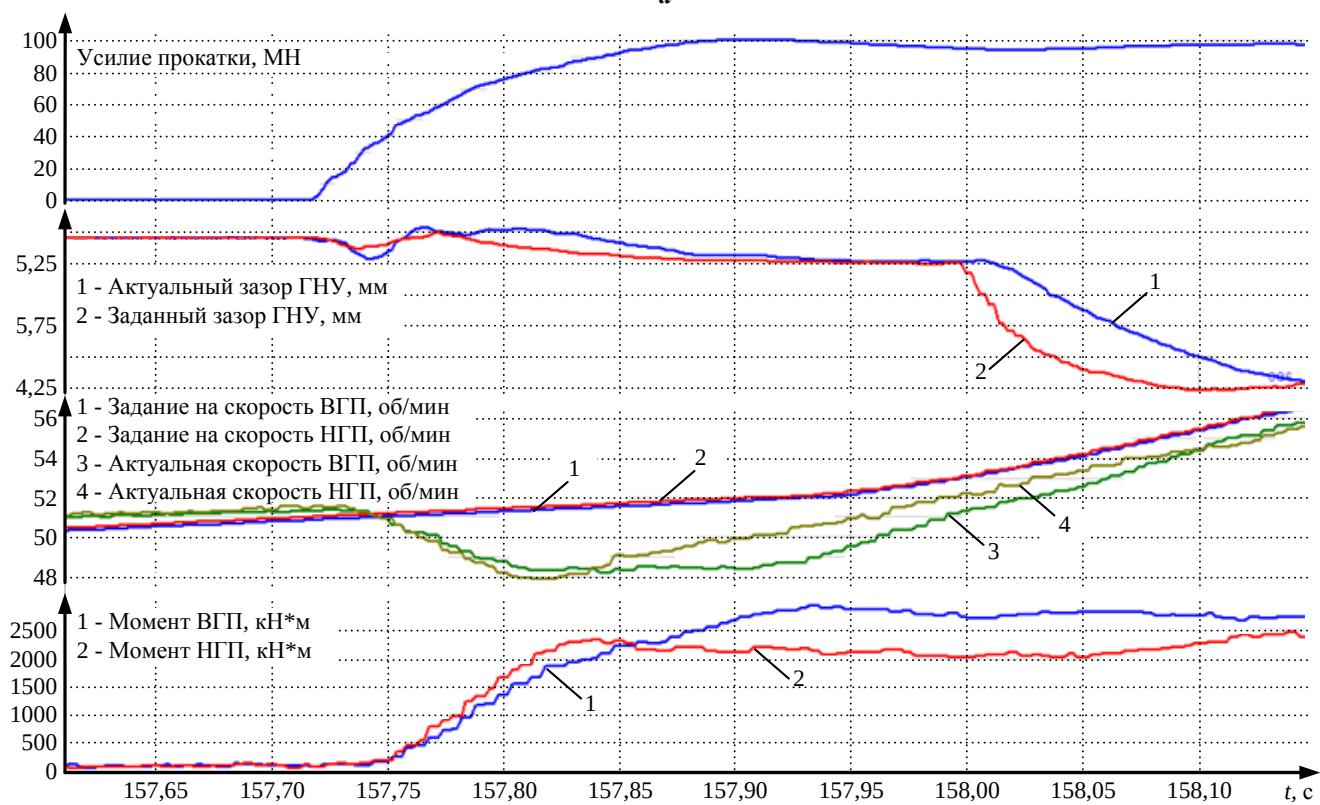
Результаты сравнения динамических показателей при захвате для рассматриваемых вариантов представлены в **таблице**.

Сопоставление динамических показателей при захвате металла

Номер рисунка	Толщина на выходе мм	Начальный зазор ГНУ мм	Изменение зазора мм	Просадка скорости			Перерегулирование момента		
				от	до	%	от	до	%
				об/мин	об/мин		кН·м	кН·м	
7, а	4,2	4,3	–	50,5	43	15	3000	4000	33
7, б	4,2	5,5	1,3	51	48	6	2350	2000	17,5
9	4,2	5,5	1,3	51	43	15,6	2500	4000	60



а



б

Рис. 7. Осциллограммы при захвате металла: с заранее установленным зазором (а); с изменением зазора согласно предложенному способу (б)

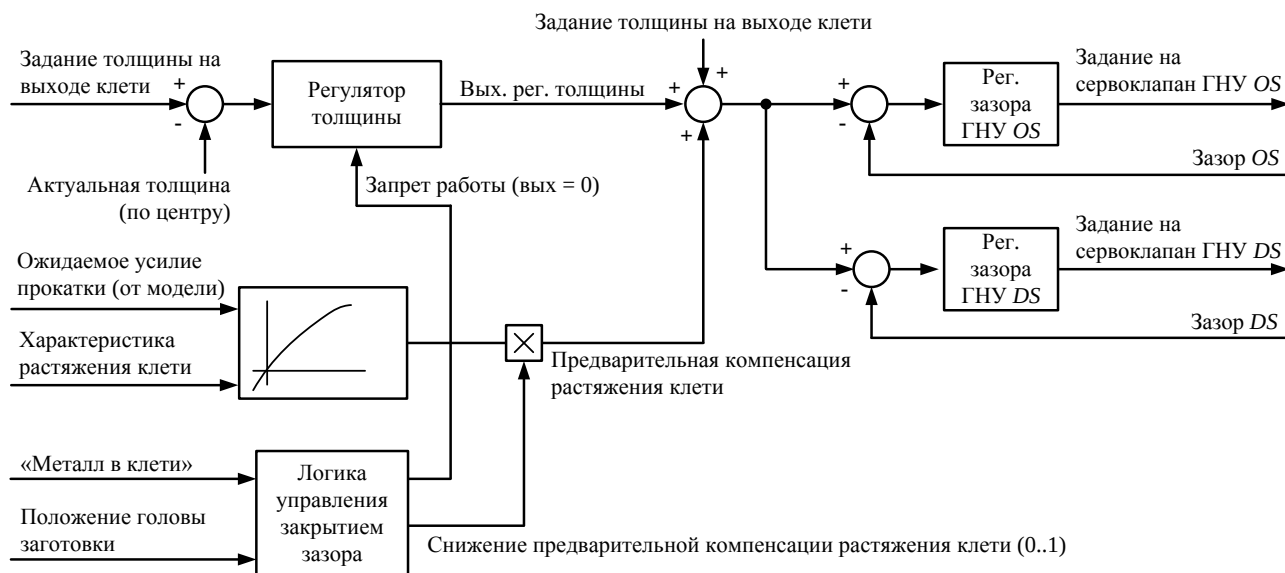


Рис. 8. Структурная схема, поясняющая способ компенсации динамической просадки скорости

Сопоставление параметров, представленных в первой и второй строках, позволяет сделать предварительный вывод, что поставленная выше цель достигнута: просадка скорости уменьшается от 15 до 6%, перерегулирование момента – от 33 до 17,5%. Однако такая ситуация наблюдается не во всех случаях, что подтверждают осциллограммы, приведенные на рис. 9. Они соответствуют случаю, когда зазор ГНУ закрывается в два этапа после захода металла в клети. Динамические показатели для этого случая показаны в третьей строке таблицы.

Сопоставление осциллограмм на рис. 9 и рис. 7, а (и данных в первой и третьей строках таблицы) показывает, что эффекта в снижении просадки скорости нет. Более того, перерегулирование момента увеличивается от 33 до 60%, хотя при этом снижаются колебания скорости и момента.

Анализ результатов длительных экспериментальных исследований позволил сделать следующие выводы:

1. При увеличении зазора на 60-80% относительно абсолютного обжатия показатели переходных процессов момента и скорости отличаются незначительно. Эффект от применения способа практически отсутствует.

2. Предложенный способ увеличения зазора валков перед захватом сложен в реализации и недостаточно эффективен для ограничения динамических нагрузок.

3. Перемещение нижнего валка (за счет действия ГНУ) после захвата негативно влияет на формирование заданного профиля головного участка при профилированной прокатке [1, 26]. В связи со сложностью этот вопрос требует дополнительных исследований.

Для объяснения ограниченного эффекта, достигаемого в рассмотренном случае, необходимы исследования методами математического моделирования. Очевидно, что возникшая ситуация объясняется тем, что на условия захвата, наряду с первоначальным зазором, влияет большое количество факторов. К ним относятся соотношение скорости перемещения металла на рольганге и окружной скорости валков, форма головного участка проката, температура и др. Также недостатком рассмотренного способа является его относительная

сложность, т.к. необходимо согласование скоростей главного ЭП и привода НУ, а также точное определение положения головной части листа по мере продвижения к валкам.

В связи с указанными недостатками внедрение данного способа ограничения динамических нагрузок на стане 5000 не рекомендуется. На первом этапе в качестве базового предложен комбинированный способ, объединяющий преимущества систем, представленных на рис. 3 и 6.

Внедрение алгоритмов, реализующих предложенные способы, обеспечит:

- повышение срока службы электрического и механического оборудования за счет ограничения ударных нагрузок при захвате металла валками;
- сокращение времени аварийных простоев стана, обусловленных износом оборудования линий главных электроприводов;
- сокращение затрат на устранение последствий аварий, замену и восстановление оборудования;
- снижение расходного коэффициента за счет сокращения брака, связанного с застреваниями при захвате, и количества концевой обреза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных экспериментальных исследований определены причины возникновения неудовлетворительных динамических нагрузок при захвате металла валками клети стана 5000. Основными причинами являются:

- выбор неконтролируемых зазоров в шпиндельных соединениях;
- определение первоначального зазора валков, исходя из заданной толщины полосы после прохода, при этом условия захвата во внимание не принимаются;
- наличие динамической ошибки регулирования скорости, вызванной настройкой пропорционально-интегрального регулятора скорости в двухконтурной астатической системе. Это приводит к тому, что переходные процессы момента электропривода имеют колебательный характер, что приводит к возникновению упругих колебаний момента на валу.

2. Разработаны способ и функциональная схема системы управления главными электроприводами, обеспечивающие выбор зазора в шпиндельных соединениях за счет захвата металла во время дополнительного ускорения валков.

3. Предложен способ управления электроприводами с компенсацией динамической просадки скорости, возникающей при захвате металла, за счет предварительного увеличения скорости электропривода на величину расчетной динамической ошибки регулирования скорости.

4. Представленные способы прошли промышленную апробацию на стане 5000. В результате дано подтверждение снижения перерегулирования и колебаний момента на валу двигателя.

5. Разработан способ управления электроприводами и гидравлическими НУ, согласно которому величина зазора валков до захвата устанавливается на уровне, близком к толщине головной части заготовки, а после захвата возвращается в требуемое положение, соответствующее заданной толщине листа после прохода. При этом осуществляется коррекция скоростей валков пропорционально скорости перемещения нажимного устройства.

6. С целью оценки эффективности данного способа необходимо проведение исследований методами математического моделирования. Для этого необходима разработка математической модели комплекса «электропривод клетки – гидравлический привод НУ», учитывающей упругие связи в механических соединениях и взаимосвязь приводов через металл.

7. В качестве базового варианта для промышленного внедрения предложен комбинированный способ ограничения динамических нагрузок за счет предварительного ускорения валков и компенсации динамической ошибки регулирования скорости. Он объединяет преимущества первых двух разработанных способов решения поставленной задачи.

Исследования проводились в рамках гранта МД-979.2017.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khramshin V.R., Khramshina E.A., Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Voronin S.S. Control Methods and Systems Providing Reduced Consumption Index at Rolled Product Manufacture at Plate Mill. Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRus). 2017. P. 1540-1544. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910865.
2. Karandaev A.S., Loginov B.M., Radionov A.A., Gasiyarov V.R. Setting Automated Roll Axial Shifting Control System of Plate Mill. Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 1753-1750. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.709
3. Анализ причин аварий оборудования листопркатных станов и меры по их предупреждению / А.Ф. Крисанов, В.Ф. Кузрман, Б.Н. Виноградов и др. // Обзор, информ. Ин-т «Черметинформация». М., 1985. С. 36.
4. Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клетей стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, И.Ю. Андрюшин, А.Н. Гостев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 69-77.
5. Gasyarov V.R., Radionov A.A., Loginov B.M., Voronin S.S., Khramshin V.R. Improvement of Work Roll Bending Control System Installed at Plate Mill Stand. Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017). Sydney, Australia. 2017. P. 269-273. DOI: 10.1145/3057039.3057105.
6. Shubin A.G., Loginov B.M., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Karandaev A.S. System of Automated Control of Hydraulic Screw-down Mechanisms of Plate Mill Stand. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015. 6 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414858.
7. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клетей прокатного стана / В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.Г. Шубин, Б.М. Логинов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. Т. 16. № 1. С. 47-55.
8. Gasyarov V.R., Radionov A.A., Loginov B.M., Voronin S.S., Khramshin V.R. Improvement of Work Roll Bending Control System Installed at Plate Mill Stand. Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017). Sydney, Australia. 2017. P. 269-273. DOI: 10.1145/3057039.3057105.
9. Шилиев П.В., Усатый Д.Ю., Радионов А.А. Автоматизация процесса прокатки толстого листа на стане 5000 // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. № 4. С. 15-18.
10. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклетевого промежутка широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.Ю. Андрюшин, В.В. Головин, П.В. Шилиев // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. № 1. С. 12-20.
11. Математическое моделирование тиристорного электропривода с переключающейся структурой / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.А. Лукин // Изв. вузов. Электромеханика. 2010. № 3. С. 47-53.
12. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана / В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрюшин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №1. С. 12-21.
13. Карандаев А.С. Совершенствование автоматизированных электроприводов агрегатов прокатного производства // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С. 3-15.
14. Согласование скоростных режимов электроприводов клетей непрерывной группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андрюшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 1. С. 98-103.
15. Алгоритм расчета скоростных и нагрузочных режимов электроприводов клетей прокатного стана при прокатке толстых полос / В.В. Галкин, А.С. Карандаев, В.В. Головин, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин, В.Р. Гасиаров, О.А. Залогин // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 2. С. 12-17.
16. Алгоритмы цифровой системы автоматического регулирования натяжения и петли широкополосного стана горячей прокатки / П.В. Шилиев, И.Ю. Андрюшин, В.В. Головин, А.А. Радионов, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин // Электротехника. 2013. № 10. С. 3-11.
17. Совершенствование алгоритма согласования скоростей электроприводов клетей черновой группы стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». Вып. 16. Челябинск: ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ», 2011. № 34 (251). С. 35-41.

18. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клетей черновой группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андрушин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу; ФГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет». Иваново, 2012. С. 652-657.
19. V.R. Khramshin, A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, I.Yu. Andryushin, A.G. Shubin, A.N. Gostev. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill. Metallurgist. Vol. 59. №3-4, July 2015. P. 315-323. DOI:10.1007/s11015-015-0103-8.
20. Храмшин В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дис. ... д-ра техн. наук / Храмшин Вадим Рифхатович. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 393 с.
21. Храмшин В.Р. Система автоматической коррекции скоростей электроприводов клетей широкополосного стана горячей прокатки // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». Вып. 18. Челябинск: ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ», 2012. № 37 (296). С. 60-67.
22. Храмшин В.Р. Способы компенсации статических отклонений скорости электроприводов клетей широкополосного стана горячей прокатки // Электротехника. 2013. №4. С. 48-55.
23. Автоматическая коррекция толщины головного участка полосы в гидро-САРТ широкополосного стана горячей прокатки / В.В. Галкин, С.А. Петряков, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. №4. С. 46-50.
24. Карандаев А.С., Храмшин В.Р., Петряков С.А. Следящая система автоматического регулирования толщины полосы стана горячей прокатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №3. С. 25-29.
25. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods [Исследование способа коррекции толщины головного участка полосы методом математического моделирования] / V.R. Hramshin, A.S. Karandaev, A.A. Radionov, R.R. Hramshin // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. Вып. 13. Челябинск: ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ», 2013. № 1. С. 144-151.
26. Басков С.Н., Карандаев А.С., Осипов О.И. Энергосиловые параметры приводов и система профилированной прокатки слэбов стана 2800 // Приводная техника. 1999. № 1-2. С. 21-24.

Поступила в редакцию 25 декабря 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

FEASIBILITY OF THE WAYS TO LIMIT DYNAMIC LOADS OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF A ROLLING STAND

Andrey G. Shubin

Head of the central electrotechnical laboratory, PJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works», Magnitogorsk, Russia.

Boris M. Loginov

Senior maintenance and test engineer, Central electrotechnical laboratory, PJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works», Magnitogorsk, Russia. E-mail: lb18@yandex.ru.

Vadim R. Gasiyarov

Ph.D. in Engineering, Head of the Department of Mechatronics and Automation, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: gasiyarovvr@gmail.com

Ekaterina A. Maklakova

Postgraduate Student, the Department of Mechatronics and Automation, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Characteristics of a reverse four-high rolling stand of the plate mill 5000 of the PJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works» («ММК») are given in the article. As a result of the experiments carried out at the rolling mill, the research group confirmed a significant excess of dynamic loads of electric drives of both upper and bottom rolls during metal feeding over the set values. The research group determined the main causes of the unsatisfactory transient processes and confirmed the appropriateness of developing the ways of electric drive control, which will make it possible to reduce the loads and limit the fluctuations of torque during metal feeding. A method of electric drive control was offered to provide the decrease of excessive correction of the torque by means of preliminary setting of the gap in spindle junctions. The researchers considered the way of compensating the dynamic deviation of speed control by means of increasing the speed before the metal feeding. The comparative analysis of oscillograph records of torques and speeds confirmed

the improvement of dynamic characteristics after implementation of the suggested control algorithms. The suggested method of control for electric drives of rolls and hydraulic screwdown structures provides the improvement of feeding conditions due to preliminary increase of the roll gap. The article shows oscillographs of speeds and torques for different variants of target values to change the position of screwdown structures. It was found that the target limiting of the dynamic torque cannot always be achieved. It was noted that it is necessary to carry out further investigations using mathematical modeling methods. The article offers recommendations aimed at commercial introduction of the developed technical solutions.

Keywords: Plate rolling mill, reverse stand, electric drive, dynamic load, limitation, methods, control systems, development, experimental studies, introduction, recommendations.

REFERENCES

1. Khramshin V.R., Khramshina E.A., Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Voronin S.S. Control Methods and Systems Providing Reduced Consumption Index at Rolled Product Manufacture at Plate Mill. Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EConRus). 2017, pp. 1540-1544. DOI: 10.1109/EConRus.2017.7910865.
2. Karandaev A.S., Loginov B.M., Radionov A.A., Gasiyarov V.R. Setting Automated Roll Axial Shifting Control System of Plate Mill. Procedia Engineering, 2017, vol. 206, pp. 1753-1750. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.709
3. Krisanov A.F., Kuzerman V.F., Vinogradov B.N. et.al. *Analiz prichin avariyn oborudovaniya listoprokatnykh stanov i mery po ikh preduprezhdeniyu* [Analysis of causes of equipment failures of rolling mill and measures preventing them]. Review, information. Institute "Chermetinformatsiya". Moscow, 1985. 36 p. (In Russian)
4. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. Reduction of dynamic loads of mechanical and electrical equipment of roughing train of a hot rolling mill. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Machine building: network electronic scientific journal]. 2013, no. 2, pp. 69-77. (In Russian)
5. Gasyarov V.R., Radionov A.A., Loginov B.M., Voronin S.S., Khramshin V.R. Improvement of Work Roll Bending Control System Installed at Plate Mill Stand. Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017). Sydney, Australia. 2017, pp. 269-273. DOI: 10.1145/3057039.3057105.
6. Shubin A.G., Loginov B.M., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Karandaev A.S. System of Automated Control of Hydraulic Screw-down Mechanisms of Plate Mill Stand. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015. 6 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414858.
7. Khramshin V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Shubin A.G., Loginov B.M. Mathematical modeling of interrelated electromechanical systems of continuous train of a rolling mill. *Vestnik Yuzhnouralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South-Ural state university. Series: Power engineering]. 2016, vol. 16, no. 1, pp. 47-55. (In Russian)
8. Gasyarov V.R., Radionov A.A., Loginov B.M., Voronin S.S., Khramshin V.R. Improvement of Work Roll Bending Control System Installed at Plate Mill Stand. Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017). Sydney, Australia. 2017, pp. 269-273. DOI: 10.1145/3057039.3057105.
9. Shilyaev P.V., Usaty D.Yu., Radionov A.A. Automation of the plate rolling process at the rolling mill 5000. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electromechanics]. 2011, no. 4, pp. 15-18. (In Russian)
10. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin A.Yu., Golovin V.V., Shilyaev P.V. Mathematical modeling of interrelated electromechanical systems of the roll gap of a wide strip hot rolling mill. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electromechanics]. 2009, no. 1, pp. 12-20.
11. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Galkin V.V., Lukin A.A. Mathematical modeling of a thyristor drive with the switching structure. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electromechanics]. 2010, no. 3, pp. 47-53.
12. Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Karandaev A.S. Mathematical modeling of interrelated electromechanical systems of the continuous train of a wide strip rolling mill. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Machine building: network electronic scientific journal]. 2013, no. 1, pp. 12-21. (In Russian)
13. Karandaev A.S. Improvement of automatic electric drives of rolling equipment. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Machine building: network electronic scientific journal]. 2014, no. 1, pp. 3-15. (In Russian)
14. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. Adjustment of speeds of stand electric drives of continuous train of a rolling mill. *Vestnik IGEU* [Bulletin of IGEU], 2013, iss. 1, pp. 98-103. (In Russian)
15. Galkin V.V., Karandaev A.S., Golovin V.V., Radionov A.A., Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Zalogin O.A. Calculation algorithm of speed and load modes of stand electric drives of a rolling mill in the process of plate rolling. *Izvestiya TulGU* [Proceedings of TulGU]. Engineering. Issue 3: in 5 parts. Tula: Publishing center of TulGU, 2010, part 2, pp. 12-17. (In Russian)
16. Shilyaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Algorithms of the digital system of automatic tension and loop control of a wide strip hot rolling mill. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2013, no. 10, pp. 3-11. (In Russian)
17. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Galkin V.V., Gostev A.N. Improvement of the speed adjustment algorithm of roughing train stand electric drives of a hot rolling mill. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Energetika"* [Bulletin of YuUrGU. Series "Power engineering"]. Iss. 16. Chelyabinsk: FGBOU VPO "YuUrGU", 2011, no. 34 (251), pp. 35-41. (In Russian)
18. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. Speed adjustment of interrelated electric drives of roughing train stands of a rolling mill. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XVIII Vserossiyskoy) nauchno-tehnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu: FGOU VPO "Ivanovskiy gosudarstvennyi energeticheskiy universitet"* [Proceedings of VII International (XVIII All-Russian) scientific and technical conference on automatic electric drive: FGOU VPO "Ivanovo state power university"]. Ivanovo, 2012, pp. 652-657. (In Russian)
19. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Andryushin I.Yu., Shubin A.G., Gostev A.N. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill. *Metallurgist*, vol. 59, no. 3-4, July 2015, pp. 315-323. DOI:10.1007/s11015-015-0103-8.
20. Khramshin V.R. Razrabotka elektrotekhnicheskikh system nepreryvnoy gruppy stana goryachey prokatki pri rasshirenii sortamenta polos [Development of electrotechnical systems of the continuous train of a hot rolling mill during expansion of strip range. Ph.D. Diss.]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. 393 p. (In Russian)
21. Khramshin V.R. System of an automated correction of stand electric drive speed for a wide strip hot rolling mill. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Energetika"* [Bulletin of YuUrGU. Series "Powerengineering"]. 2012, iss. 18, no. 37(296), pp. 60-67. (In Russian)
22. Khramshin V.R. Methods of adjusting the static deflection of electric drive speed at stands of a wide strip hot rolling mill. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2013, no. 4, pp. 48-55. (In Russian)
23. Galkin V.V., Petryakov S.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Automatic adjustment of strip head thickness in hydro-SART of a wide strip hot rolling mill. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2011, no. 4, pp. 46-50. (In Russian)
24. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Petryakov S.A. Monitoring system of automatic control of strip thickness at a hot rolling mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo*

- Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 3, pp. 25-29. (In Russian)
25. Hramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Hramshin R.R. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods. *Vestnik YuUrGU. Seriya Energetika* [Bulletin of YuUrGU. Series "Power engineering"]. Iss. 13. Chelyabinsk: FGBOU VPO "YuUrGU", 2013, no. 1, pp. 144-151. (In Russian)
26. Baskov S.N., Karandaev A.S., Osipov O.I. Power parameters of drives and the system of shaped slab rolling at 2800 mill. *Privodnaya tekhnika* [Electrically driven equipment]. 1999, no. 1-2, pp. 21-24. (In Russian)
-
- Шубин А.Г., Логинов Б.М., Гасияров В.Р., Маклакова Е.А. Обоснование способов ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 14-25. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-14-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25)
- Shubin A.G., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. Feasibility of the Ways to Limit Dynamic Loads of Electromechanical Systems of a Rolling Stand. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 14-25. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-14-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25)
-

Богданов Д.Ю., Кравченко О.А.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СТЕНДОВ ОБЕЗВЕШИВАНИЯ С УЧЕТОМ СИЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В РАДИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Для подготовки космонавтов к внекорабельной деятельности применяют стенды обезвешивания, реализуемые с использованием многокоординатных силокомпенсирующих систем (СКС), обеспечивающих до шести степеней подвижности объекта. Реализация составляющих движения на них обеспечивается суммой трех взаимно перпендикулярных движений, а также вращением и качанием объекта относительно его центра масс в кардановом подвесе. Для выполнения комплексных исследований, структурно-параметрического синтеза системы управления, анализа статических, динамических показателей работы СКС разработана математическая модель, описывающая силовые взаимодействия в многокоординатных СКС радиальной конструкции.

Сформулированы допущения, принимаемые при получении математического описания механической части СКС. Выделены четыре основных элемента, взаимодействующих друг с другом: мост, тележка, барабан и обезвешиваемый объект. С использованием метода поэлементного описания получены уравнения, описывающие взаимосвязанное движение координат СКС при приложении к обезвешиваемому объекту внешнего силового воздействия. С учетом принципов управления электродвигателями и анализа физических процессов в механической части СКС обоснована целесообразность представления математического описания каждой из координат СКС в виде обобщенной двухмассовой электромеханической моделью с упругой связью.

Приведены аналитические выражения для определения параметров обобщенной математической модели и рассмотрены взаимовлияния координат при изменении параметров и силовых воздействиях. Приведены экспериментальные исследования силовых взаимодействий на примере устройства обезвешивания полезного груза при изменении параметров объекта управления.

Ключевые слова: стенды обезвешивания, тренажеры, имитация невесомости, регулирование усилий, математическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

За 2013-2017 годы на Международной космической станции было осуществлено 34 выхода в открытый космос с максимальной продолжительностью в 8 ч 7 мин. При выходах решались задачи обслуживания космической станции и установки нового оборудования. Такие операции в условиях открытого космоса особенно сложны и требуют от космонавтов слаженной профессиональной работы. Поэтому при подготовке космонавтов к работе в открытом космосе необходимо получить специальные навыки в работе, которые в НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина отрабатываются на специальных тренажерах, обеспечивающих имитацию условий невесомости. При этом возрастающее число типов операций, их сложности и количества постоянно повышает требования, предъявляемые к подготовке космонавтов, а следовательно, и к тренажерам. Прогнозируемые в ближайшем будущем Лунные и Марсианские программы выводят требования к тренажерам на качественно новый уровень [1]. Поэтому разработка и создание перспективных тренажеров и модернизация существующих тренажеров для обеспечения подготовки в условиях пониженной гравитации является актуальной задачей.

С 2002 года в НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина эксплуатируется тренажерный комплекс «Выход-2», предназначенный для отработки циклограмм шлюзования и элементов внекорабельной деятельности. Данный тренажер обеспечивает имитацию условий невесомости по средствам электромеханической силокомпенсирующей системы. В такой силокомпенсирующей системе с помощью синхронного электродвигателя компенсируется вес перемещаемого объекта, а также возникающие в процессе силы трения и силы инерции дополнительных присоединенных масс, что позволяет

осуществлять космонавту в скафандре перемещения посредством малых собственных усилий (около 50Н), аналогично движению в невесомости. С 2013 года на данном тренажере проводятся научно-исследовательские работы с участием экипажей МКС по изучению особенности перемещения космонавта после длительного перелета на Марс [2], которые показали перспективность тренажеров данного типа.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ВЫБОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Конструкция тренажера «Выход-2» выполнена в виде мостового радиального крана (рис. 1). Такая конструкция позволяет размещать приводные устройства вне подвижных частей тренажера и упрощает подвод коммуникаций к скафандру. Недостатком тренажера «Выход-2» является пассивная система горизонтальных перемещений, которая позволяет реализовывать с требуемым качеством лишь медленные перемещения (до 0,2 м/с). Исследования [3-6] показали, что для реализации перспективных тренажеров, позволяющих имитировать условия невесомости и пониженной гравитации, необходимо использовать активные системы вертикальных и горизонтальных поступательных перемещений.

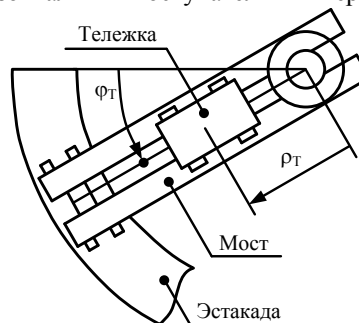


Рис. 1. Схема радиальной конструкции тренажера «Выход-2» (вид сверху)

При создании реализованных таким образом многокоординатных СКС необходимо решить задачу получения обобщенной математической модели, позволяющей выполнять комплексные исследования, анализ статических, динамических показателей работы стендов обезвешивания, структурно-параметрического синтеза системы управления, исследования силовых взаимодействий между координатами СКС [7-10]. Наиболее общий подход к получению математического описания ЭМС с УС связан с основан на уравнениях Лагранжа. Комплексное системное применение этого подхода позволяет получить формальный метод строгого математического описания процессов в форме уравнений Лагранжа-Максвелла. Основная сложность в использовании уравнений Лагранжа-Максвелла для математического описания многокоординатных СКС связана со сложностью применения на начальном этапе допущений и отсутствием рекомендаций по выбору обобщенных координат. Также большое распространение при исследовании ЭМС получил метод поэлементного их описания, в основу которого положена идея получения исходных уравнений системы с непосредственным применением законов механики, электротехники и других смежных дисциплин [11].

Этот подход базируется на изучении физики процессов и явлений, происходящих в отдельных устройствах и элементах систем, и учёте их влияния друг на друга с помощью уравнений связи. Такой подход на этапе составления исходных уравнений позволяет выделить только основные силы и моменты, действующие в СКС, а также делать допущения в ходе преобразований исходных уравнений и анализировать полученные конечные уравнения с физической точки зрения. Поэтому при математическом описании стендов обезвешивания целесообразно использовать метод поэлементного описания механической части стендов обезвешивания. Математическое описание механической и электромеханической частей СКС с учётом специфики управления

электродвигателями целесообразно выполнять с использованием модели двухфазной обобщенной электрической машины и метода обобщенного пространственного вектора [12].

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Для математического описания системы радиальной конструкции удобно использовать цилиндрическую систему координат, ось которой совпадает с осью вращения моста. Тогда точка схода каната с тележки будет описываться координатами (ρ_T, φ_T, z_T) , где ρ_T – расстояние от оси вращения до центра тележки, φ_T – угол поворота моста, z_T – расстояние от пола до точки схода каната. По аналогии центр масс обезвешиваемого объекта будет иметь координаты (ρ_0, φ_0, z_0) . Для получения математической модели механической части стенда обезвешивания составлены его расчётные схемы, приведённые на **рис. 2**.

Для получения математического описания целесообразно применять следующие допущения: элементы конструкции моста и тележки под действием внешних сил не деформируются, мост имеет одну степень подвижности, тележка имеет возможность перемещаться только вдоль моста; направляющие, по которым обеспечивается перемещение моста и тележки, расположены в горизонтальной плоскости, волновым характером распространения деформации каната можно пренебречь, канат невесом и в процессе работы всегда натянут, деформация каната подчиняется закону Гука; барабан жестко связан с мостом, при намотке каната радиус барабана и точка схода каната остаются постоянными, что обеспечивается конструктивно; силы и моменты приложены к недеформируемому сосредоточенным неизменяемым массам; центр масс объекта обезвешивания всегда находится на прямой, являющейся продолжением каната; объект обезвешивания может свободно вращаться относительно точки крепления его к канату, поэтому моментом закручивания каната можно пренебречь.

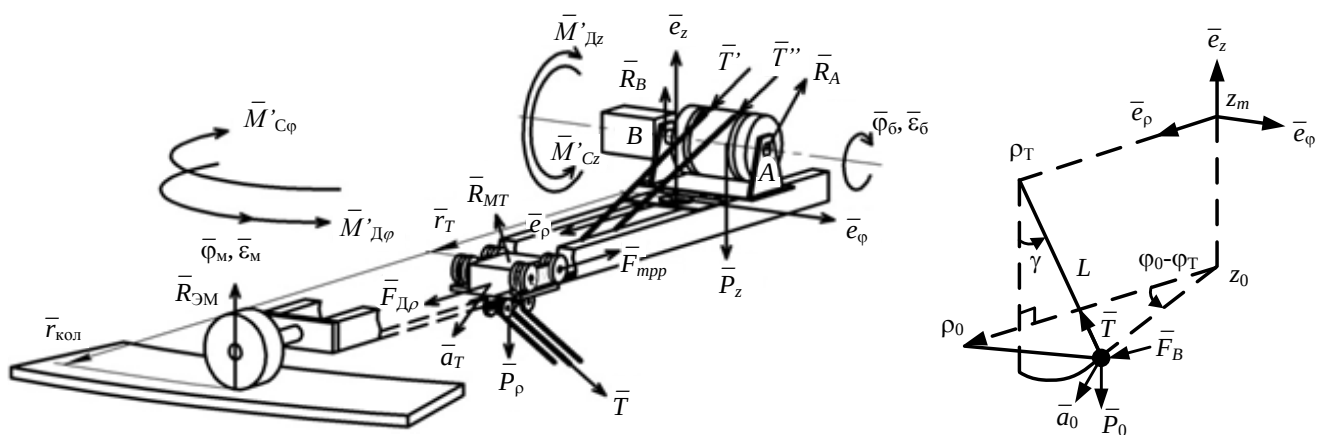


Рис. 2. Расчётные схемы для механической части стенда обезвешивания

Выделив в рассматриваемой механической системе четыре основных элемента, взаимодействующих друг с другом (мост, тележку, барабан и обезвешиваемый объект), с учётом действующих на них усилий и моментов, указанных на рис. 2, можно составить для каждого из них уравнение движения в векторной форме записи:

для моста

$$J_{\varphi} \bar{\varepsilon}_m = \bar{M}'_{D\varphi} + \bar{M}'_{C\varphi} + [\bar{r}_{\text{кол}} \times \bar{R}_{\text{ЭМ}}] + [\bar{r}_T \times \bar{R}_{\text{ТМ}}] + [\bar{r}_{\text{сф}} \times \bar{P}_{\varphi}] - [\bar{r}_{\text{Аф}} \times \bar{R}_A] - [\bar{r}_{\text{Вф}} \times \bar{R}_B], \quad (1)$$

для тележки

$$m_p \bar{a}_T = \bar{F}_{Dp} + (-\bar{T}) + \bar{F}_{Cp} + \bar{R}_{\text{МТ}} + \bar{P}_p, \quad (2)$$

для барабана

$$J_z \bar{\varepsilon}_B = \bar{M}'_{Dz} + \bar{M}'_{Cz} + [\bar{r}_{\text{к1}} \times \bar{T}'] + [\bar{r}_{\text{к2}} \times \bar{T}'] + [\bar{r}_{\text{Bz}} \times \bar{R}_B] + [\bar{r}_{\text{Cz}} \times \bar{P}_z], \quad (3)$$

для обезвешиваемого объекта

$$m_o \bar{a}_o = \bar{T} + \bar{F}_B + \bar{P}_o + \bar{F}_{Co}, \quad (4)$$

где m_p , m_o – суммарные массы тележки и обезвешиваемого объекта с установленными на них механизмами; J_{φ} , J_z – моменты инерции моста и барабана; $\bar{a}_T$, $\bar{a}_o$ – ускорения тележки и обезвешиваемого объекта; $\bar{\varepsilon}_m$, $\bar{\varepsilon}_B$ – угловые ускорения моста и барабана; $\bar{P}_{\varphi}$, $\bar{P}_p$, $\bar{P}_z$, $\bar{P}_o$ – суммарный вес моста, тележки, барабана и обезвешиваемого объекта с установленными на них механизмами; $\bar{F}_{Dp}$ – суммарная сила тяги электропривода тележки; $\bar{F}_{Cp}$, $\bar{F}_{Co}$ – силы сопротивления движению тележки и обезвешиваемого объекта, обусловленные трением; $\bar{M}'_{D\varphi}$ – момент двигателя моста, приведенный к оси поворота моста; $\bar{M}'_{C\varphi}$ – момент сопротивления повороту моста, обусловленный трением; $\bar{M}'_{Dz}$, $\bar{M}'_{Cz}$ – моменты двигателя системы вертикальных перемещений (СВП) и сил сопротивления, обусловленных трением, приведённые к валу барабана диаметром D_B ; $\bar{R}_{\text{ЭМ}}$, $\bar{R}_{\text{МТ}}$ ($\bar{R}_{\text{ТМ}}$) – силы реакции на мост со стороны эстакады и на тележку со стороны моста (на мост со стороны тележки); $\bar{R}_A$, $\bar{R}_B$ – силы реакции подшипников на вал барабана; $\bar{F}_B$ – внешняя сила, прикладываемая к обезвешиваемому объекту; $\bar{T} = T_{\varphi} \bar{e}_{\varphi} + T_{\rho} \bar{e}_{\rho} + T_z \bar{e}_z$ – совокупная сила натяжения ветвей канатной передачи, приложенная к обезвешиваемому объекту; $\bar{T}' = \bar{T}'' = \bar{T}/4$ – сила натяжения одной ветви каната; $T_{\rho} = T(\rho_T - \rho_o \cos(\varphi_o - \varphi_T))/L$, $T_{\varphi} = T \rho_o \sin(\varphi_T - \varphi_o)/L$, $T_z = T(z_T - z_o)/L$ – проекции совокупной силы натяжения каната на оси ортогональной системы координат, привязанной к мосту соответственно; $\bar{e}_{\varphi}$, $\bar{e}_{\rho}$, $\bar{e}_z$ – ортогональный базис; $L = \sqrt{\rho_T^2 + \rho_o^2 - 2\rho_T \rho_o \cos(\varphi_o - \varphi_T)} + (z_m - z_o)^2$ – расстояние от точки схода каната до центра масс обезвешиваемого объекта; $\bar{r}_{\text{к1}}$, $\bar{r}_{\text{к2}}$, $\bar{r}_{\text{Bz}}$, $\bar{r}_{\text{Cz}}$ – радиусы-векторы точек приложения соответствующих сил $\bar{T}'$, $\bar{T}''$, $\bar{R}_B$, $\bar{P}_z$, направленные из точки A на оси вращения барабана; $\bar{r}_{\text{кол}}$, $\bar{r}_T$, $\bar{r}_{\text{сф}}$, $\bar{r}_{\text{Аф}}$, $\bar{r}_{\text{Вф}}$ – радиусы-векторы точек приложения соответствующих сил $\bar{R}_{\text{ЭМ}}$, $\bar{R}_{\text{ТМ}}$, $\bar{P}_{\varphi}$, $\bar{R}_A$, $\bar{R}_B$, направленные из оси поворота моста.

Записав полученные уравнения моста (1) в проекции на базисный вектор $\bar{e}_{\varphi}$, тележки (2) – на базисный вектор $\bar{e}_{\rho}$, барабана (3) – на его ось, обезвешиваемого объекта (4) в проекциях на канат и вектора $\bar{e}_{\varphi}$, $\bar{e}_{\rho}$, получим математическое описание механической части стенов обезвешивания в скалярном виде

$$J_{\varphi} \frac{d^2 \varphi_m}{dt^2} = M'_{D\varphi} - M'_{C\varphi} - \rho_T T \frac{\rho_o \sin(\varphi_T - \varphi_o)}{L} + \rho_T m_T \left(2 \frac{d\rho_T}{dt} \frac{d\varphi_T}{dt} - \rho_T \frac{d^2 \varphi_T}{dt^2} \right); \quad (5)$$

$$m_p \left(\frac{d^2 \rho_T}{dt^2} + \rho_T \left(\frac{d\varphi_T}{dt} \right)^2 \right) = F_{Dp} - F_{Cp} - T \frac{\rho_T - \rho_o \cos(\varphi_o - \varphi_T)}{L}; \quad (6)$$

$$J_z \varepsilon_B = M'_{Dz} - M'_{Cz} - T \frac{D_B}{4}; \quad (7)$$

$$m_o \left(\rho_o \frac{d^2 \varphi_o}{dt^2} - 2 \frac{d\rho_o}{dt} \frac{d\varphi_o}{dt} \right) = F_{B\varphi} - F_{\text{соф}} + T \frac{\rho_o \sin(\varphi_m - \varphi_o)}{L}; \quad (8)$$

$$m_o \left(\frac{d^2 \rho_o}{dt^2} + \rho_o \left(\frac{d\varphi_o}{dt} \right)^2 \right) = F_{B\rho} - F_{\text{соп}} + T \frac{\rho_T - \rho_o \cos(\varphi_o - \varphi_T)}{L}; \quad (10)$$

$$m_o \left(L \left(\frac{d\gamma}{dt} \right)^2 + \frac{d^2 L}{dt^2} \right) = F_{Bz} - F_{\text{соз}} + T - P_o \cos(\gamma), \quad (11)$$

где $\gamma = \arcsin \left(\sqrt{\rho_T^2 + \rho_o^2 - 2\rho_T \rho_o \cos(\varphi_o - \varphi_T)} / L \right)$ – угол отклонения каната от вертикали.

Качество работы силокомпенсирующих систем обезвешивания принято характеризовать отношением некомпенсированных сил к весу объекта, в частности для тренажера «Выход-2» это отношение должно быть менее 2%. Выполненные исследования показали, что для обеспечения этого требования угол отклонения каната от вертикали γ не должен превышать $1,1^\circ$, что позволяет линеаризовать тригонометрические функции в математическом описании. Приведя переменные в полученных уравнениях к валам электроприводов со-ответствующих координат с учётом моментов инерции электродвигателей и механических передач, выполнив преобразование Лапласа, получим уравнения движения, описывающие взаимосвязанное движение исследуемых координат при приложении к обезвешиваемому объекту внешнего силового воздействия. Анализ математического описания показал, что уравнения движения для каждого базисного направления (φ , ρ , z) можно свести к виду двухмассовой электромеханической системы (ДЭМС):

$$\begin{cases} J_1 \Omega_1 s = M_D - (b + C/s)(\Omega_1 - \Omega_2) - M_1; \\ J_2 \Omega_2 s = M_B + (b + C/s)(\Omega_1 - \Omega_2) - M_2, \end{cases} \quad (11)$$

где для каждого базисного направления: J_1, J_2 – моменты инерции ротора двигателя с жестко связанными с ним механизмами и обезвешиваемого объекта; C, b – коэффициенты, учитывающие жёсткость и диссипативные силы упругой механической передачи; Ω_1, Ω_2 – скорости двигателя и объекта обезвешивания; M_d, M_B – моменты двигателя и внешнего воздействия; M_1, M_2 – возмущающие воздействия, действующие на двигатель и обезвешиваемый объект; s – оператор Лапласа

Таким образом, математическое описание по трем координатам СКС можно представить в виде ДЭМС (11). А силовые взаимодействия между координатами СКС, как и действия на них гравитационных сил и сил трения, учесть в возмущающих воздействиях M_1 и M_2 , зависимости которых приведены в табл. 1.

Здесь $M_{тр}$ – момент трения в механической передаче тележки, моста и барабана; $\rho_{пр\rho}, \rho_{прz}$ – радиусы приведения сил к двигателям тележки и барабана соответственно; $i_\phi = \Omega_{1\phi}/\Omega_m$ – передаточное отношение механической передачи моста; $\Omega_{1\rho}, \Omega_{1\phi}$ – скорость вращения двигателя тележки и моста; $\Omega_{2\rho}, \Omega_{2\phi}$ – скорости движения обезвешиваемого объекта, приведенные соответственно к двигателю тележки и моста; Ω_m – скорость поворота моста; g – ускорение свободного падения, $\dot{\gamma}$ – производная по времени от угла отклонения каната от вертикали.

При работе координат СКС параметры математической модели ДЭМС изменяются в зависимости от положения и массы объекта обезвешивания. Функции, описывающие такие изменения, сведены в табл. 2.

Таблица 1

Выражения для возмущающих воздействий M_1, M_2 каждого направления движения

M_1, M_2	Зависимость
$M_{1\phi}$	$M_{тр\rho} + m_p \rho_{тр\rho} \Omega_{1\phi}^2 / i_\phi^2$
$M_{2\phi}$	$m_o \rho_{пр\rho} \Omega_{2\phi}^2 / i_\phi^2$
$M_{1\rho}$	$M_{тр\phi} - 2m_p \rho_{тр\rho} \Omega_{1\phi} \Omega_{1\rho} / i_\phi^2$
$M_{2\rho}$	$-2m_o \rho_{пр\rho} \Omega_{2\phi} \Omega_{2\rho} / i_\phi^2$
M_{1z}	$M_{трz}$
M_{2z}	$m_o g \rho_{прz} \cos(\gamma) - m_o \dot{\gamma}^2 \rho_{прz}$

Таблица 2

Функции изменения параметров математической модели

j	J_{1j}	J_{2j}	C_j
ϕ	$m_p \rho_{пр\rho}^2 + J_{Д\rho}$	$m_o \rho_{пр\rho}^2$	$m_o g \rho_{пр\rho}^2 \frac{1}{L}$
ρ	$m_p \frac{\rho_{тр}^2}{i_\phi^2} + J_{Д\phi}$	$m_o \frac{\rho_{тр}^2}{i_\phi^2}$	$m_o g \frac{\rho_{тр}^2}{i_\phi^2} \frac{1}{L}$
z	$J_{Дz}$	$m_o \rho_{прz}^2$	$C_o \frac{l_{const} + L_{max}}{l_{const} + L}$

Здесь $J_{Д\rho}, J_{Д\phi}, J_{Дz}$ – суммарные моменты инерции двигателей тележки, моста, барабана с жестко связанными с ними механизмами совершающими вращательное движение; C_o – эквивалентная жёсткость канатной передачи, соответствующая длине $l_{const} + L_{max}$; l_{const} – длина горизонтального неизменяемого участка каната; L_{max} – максимальная длина вертикального участка каната L .

Математическое описание электромеханических преобразователей выполнено с учётом того, что в СКС целесообразно применять синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) при работе до номинальной скорости. При использовании векторного управления СДПМ с ориентацией по вектору потокоцепления, создаваемого постоянными магнитами ротора, и использовании блоков компенсации перекрестных связей [13, 14] математическая модель электромеханических преобразователей может быть представлена передаточными функциями, приведенными на рис. 3. С учётом математического описания силового преобразователя двигателя и отрицательной обратной связи по току, математическую модель многокоординатной СКС можно унифицировать, получив обобщённое математическое описание по вертикальной и горизонтальным координатам СКС. Тогда с учетом выражений, приведенных в табл. 1, 2, структурная схема обобщенной математической модели СКС по одной из координат будет иметь вид, представленный на рис. 3.

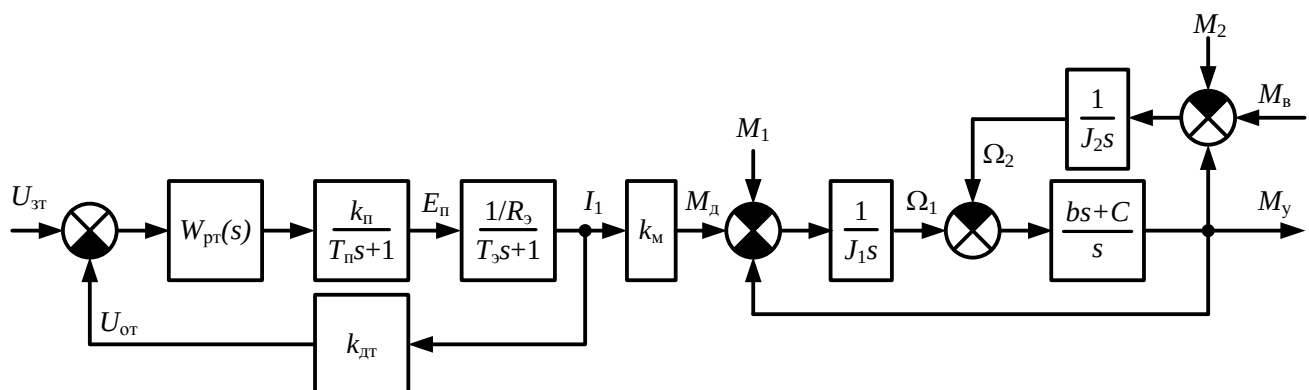


Рис. 3. Обобщенная математическая модель СКС

На рис. 3 приведены следующие обозначения: T_n – постоянная времени, учитывающая инерционные свойства преобразователя; k_n – коэффициент передачи преобразователя по напряжению; E_n – ЭДС преобразователя; $W_{pt}(s)$ – передаточная функция регулятора электромагнитного момента (тока) электродвигателя; k_{dt} – коэффициент передачи обратной связи по электромагнитному моменту (току) электродвигателя; T_s – электромагнитная постоянная времени статора СДПМ; R_s – эквивалентное сопротивление СДПМ; k_m – коэффициент передачи СДПМ; $U_{от}$ – сигнал обратной связи по току (электромагнитному моменту) электродвигателя; U_{zt} – сигнал задания на ток (электромагнитный момент) электродвигателя.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования взаимодействий между координатами осуществлялись на СКС устройства обезвешивания полезного груза (УОГ), предназначенного для работы космонавтов во время тренировок со вспомогательным оборудованием (рис. 4). УОГ предназначено для обезвешивания объектов массой от 10 до 100 кг в рабочем пространстве радиусом в 7,2 м и высотой 8 м. УОГ обеспечивает перемещение обезвешиваемого объекта со скоростями до 0,2 м/с при усилиях оператора не более 2% от веса груза.

На рис. 5 и 6 приведены осциллограммы изменения угла отклонения каната γ и усилия в канатной передаче T при свободных качаниях груза поперек моста для двух случаев, соответствующих максимальной и минимальной реализуемой жесткости на УОГ. Осциллограммы на рис. 5, а, б получены при следующих параметрах: $m_0 = 107,12$ кг, $L = 0,858$ м, $\rho_r = 6,55$ м; а на рис. 5, б, б: $m_0 = 47,40$ кг, $L = 2,81$ м, $\rho_r = 2,05$ м.

Анализ полученных осциллограмм на рис. 5, а и б показал, что при изменении параметров СКС изменяется период свободных качаний груза, что совпадает с расчетным периодом качаний груза $T_{0\phi} = 2\pi \sqrt{\frac{J_{1\phi}/2\phi}{(J_{1\phi} + J_{2\phi})C_\phi}}$, с отклонением не более 2%.

Из осциллограмм усилия в канатной передаче T , представленных на рис. 6, видно, что суммарный переходной процесс состоит из низкочастотных и высокочастотных колебаний. Анализ показал, что низкочастотные колебания обусловлены влиянием центробежной силы и изменением проекции веса груза при горизонтальных перемещениях груза в соответствии с выражением для M_{2z} (см. табл. 1), а высокочастотные колебания – моментом упругого взаимодействия M_{yz} .



Рис. 4. Устройство обезвешивания полезного груза

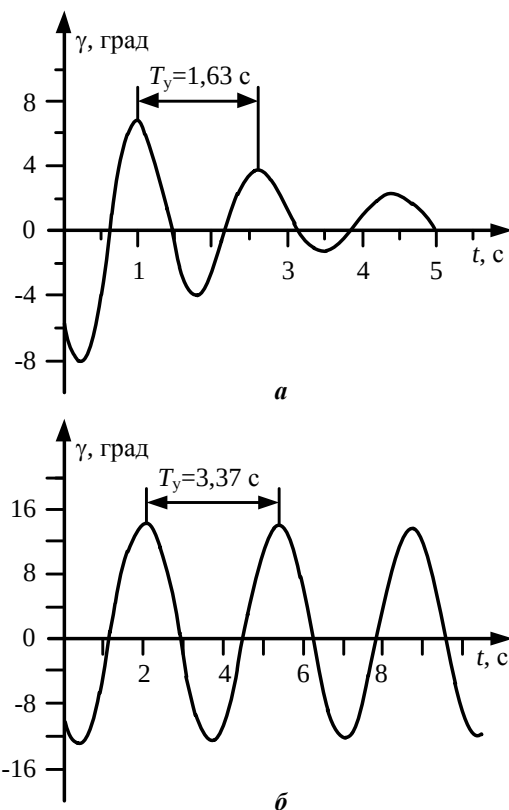


Рис. 5. Осциллограммы изменения угла отклонения каната от вертикали γ при свободных качаниях груза поперек моста

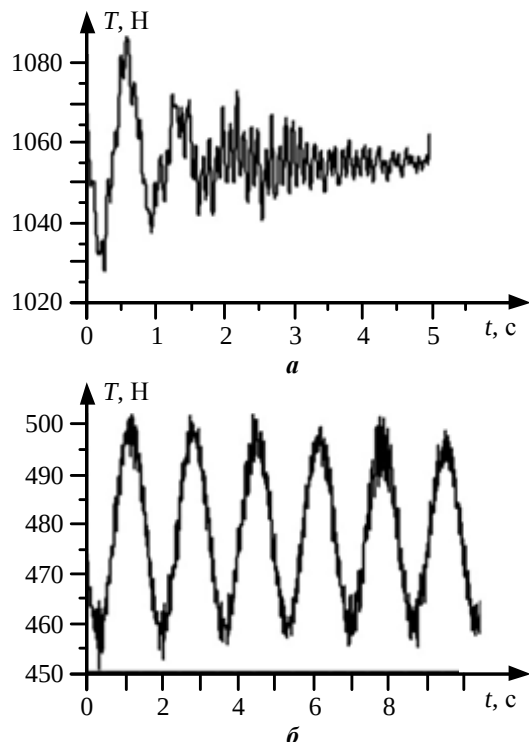


Рис. 6. Осциллограммы изменения усилия в канатной передаче T при свободных качаниях груза поперек моста

Так как составляющие момента M_{2z} обусловлены проекцией силы тяжести объекта обезвешивания на канат и действием центробежной силы, пропорциональной квадрату функции изменения угла, то данный момент изменяется с двойной частотой по отношению к частоте качаний груза, представленных на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Для разработки единого подхода к построению систем управления различными координатами стенов обезвешивания и обобщения результатов исследования упруго-силовых взаимодействий в СГП и СВП их математическую модель рекомендуется представить обобщенно, в виде эквивалентной двухмассовой ЭМС с упругой связью, при этом взаимное влияние координат удобно представить в виде добавочных сил, приложенных к соответствующим массам.

2. Анализ силовых взаимодействий, приведенных в **табл. 1**, проведенных экспериментальных исследований показал, что силовые взаимодействия между координатами СКС проявляется следующим образом:

– на движение тележки вдоль моста оказывает влияние сила упругого взаимодействия, сила трения и центробежная сила, действующая на тележку, зависящая от скорости вращения моста;

– на поворот моста относительно центральной оси оказывает влияние сила упругого взаимодействия, сила трения и кориолисова сила, действующая на тележку;

– на вращение барабана вокруг своей оси – сила упругого взаимодействия и сила трения;

– на перемещение объекта обезвешивания действуют силы упругого взаимодействия, гравитационные силы и инерционные силы.

3. Анализ выражений в **табл. 2** показал, что параметры привода барабана, моста и тележки зависят от массы обезвешиваемого груза и длины каната, а параметры привода моста, кроме того, и от положения тележки.

4. Для перехода к синтезу в виде ДЭМС необходимо проанализировать величины взаимовлияний и предусмотреть механизмы их компенсации.

Результаты получены в рамках реализации проекта 585596-EPP-1-2017-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP Fostering Internationalisation in AgRicultural Engineering in Iran and Russia.



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Crew on the iss: creativity or determinism? / Krikalev S.K., Kalery A.Yu., Sorokin I.V. // Acta Astronautica. 2010. Vol. 66.

- № 1-2. P. 70-73. DOI.org/10.1016/J.Actaastro.2009.05.022.
2. Эксперименты с участием экипажей МКС для осуществления полета на марс / Крикалев С.К., Крючков Б.И., Курицын А.А., Харламов М.М. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 6-2. С. 278-288.
3. Conditions of optimization and efficiency of damping of oscillations of elastic mechanisms by an electric drive / Pyatibratov G.Y. // Russian Electrical Engineering. 2015. Vol. 86. № 7. P. 373-378. DOI.org/10.3103/S1068371215070111.
4. Пятибратов Г.Я., Кравченко О.А., Папирняк В.П. Способы реализации и направления совершенствования тренажеров для подготовки космонавтов к работе в невесомости // Изв. вузов. Электромеханика. 2010. № 5. С. 70-76.
5. Пятибратов, Г.Я., Кравченко О.А., Денисов А.А. Реализация систем регулирования усилий электромеханических комплексов с упругими связями // Изв. вузов. Электромеханика. 1997. № 3. С. 51-54.
6. Силокомпенсирующие системы с электроприводами переменного тока тренажерных комплексов подготовки космонавтов / Д.В. Барыльник, Г.Я. Пятибратов, О.А. Кравченко; Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркасск: Ред. Журн. «Изв. Вузов. Электромеханика»: Лик, 2012. 176 с.
7. Synthesis of an object moving control system with flexible suspension under the action of external forces / Pyatibratov G.Y., Bogdanov D.Y., Bekin A.B. // Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. P. 29-36. DOI.org/10.1016/j.proeng.2015.12.004.
8. Retrofit simulator to train cosmonauts for working in non-gravity and reduced gravity environment / Pyatibratov G.Y., Bekin A.B., Bogdanov D.Y. // Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. P. 42-50. DOI.org/10.1016/j.proeng.2015.12.006.
9. Принципы построения и реализации систем компенсации силы тяжести / Кравченко О.А., Пятибратов Г.Я., Сухенко Н.А., Бекин А.Б. // Изв. вузов. Технические науки. 2013. № 2 (171). С. 32-35.
10. Кравченко О.А. Принципы построения многокоординатных силокомпенсирующих систем // Изв. вузов. Электромеханика. 2008. № 3. С. 43-47.
11. Кравченко О.А., Богданов Д.Ю., Барыльник Д.В. Математическая модель электромеханической многокоординатной силокомпенсирующей системы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14. № 1. С. 71-78.
12. Бекин А.Б., Пятибратов Г.Я., Шмат Р.А. Определение рациональной структуры системы управления перемещениями объектов на гибком подвесе // Изв. вузов. Электромеханика. 2017. Т. 60. № 2. С. 57-64. DOI:10.17213/0136-3360-2017-1-57-64
13. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
14. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / Иванов. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина. Иваново, 2008. 298 с.

Поступила в редакцию 16 ноября 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROMECHANICAL WEIGHTLESSNESS SIMULATORS TAKING ACCOUNT OF FORCE INTERACTIONS IN RADIAL CONSTRUCTION

Dmitriy Yu. Bogdanov

Postgraduate Student, the department of Energy supply and electric drive, Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation. E-mail: bogdanov_dmitr@mail.ru

Oleg A. Kravchenko

D.Sc (Eng.), Associate Professor, Head of the department of Energy supply and electric drive, Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation. E-mail: mvk346428@gmail.com

Weightlessness simulators implemented with the use of multicoordinate force compensation systems (FCS) providing up to six degree of mobility of the object are used to train astronauts for extravehicular activity. The implementation of submotion at them is provided by the sum of three orthogonally related movements as well as the rotation and rolling of object in gimbal. It is necessary to create mathematical model, which describes force-interaction of multicoordinate FCS correctly in order to implement complex researches, control system synthesis, control static and dynamic indices of FCS work.

In our paper we formulated the assumptions used under the creation mathematical description of mechanical part of FCS. Four major interconnected elements were selected: a bridge, a truck, a drum and an offload object. The equations were obtained using the method of elementwise evaluation, which describes the coupled motion of the coordinates of the FCS on application of the external force to the object. With account for the control principles by electric motor and analysis of physical processes in the mechanical part of FCS, the authors substantiated the rationale of presenting the mathematical description of each coordinates of the FCS in terms of a generic two-mass electromechanical model with springy constraint.

In our paper we presented the analytical expressions for determination parameters of generic mathematical model and considered coordinates influence during the change of parameters and force interaction is also considered. Experimental researches of force interaction for the case of offload device when applying parameters of control object are considered.

Keywords: Weightlessness simulators, simulator, imitation weightlessness, force control, mathematical model.

REFERENCES

- Krikalev S.K., Kalery A.Yu., Sorokin I.V. Crew on the iss: creativity or determinism? *Acta Astronautica*, 2010, no. 1-2, vol. 66, pp. 70-73. DOI.org/10.1016/j.actaastro.2009.05.022.
- Krikalev S.K., Kryuchkov B.I., Kuritsyn A.A., Kharlamov M.M. Experiments carried out by the ISS's crews in the interests of performing an exploration mission to mars. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula state university. Technical science], 2013, no. 6-2, pp. 278-288. (In Russian)
- Pyatibratov G.Y. Conditions of optimization and efficiency of damping of oscillations of elastic mechanisms by an electric drive. *Russian Electrical Engineering*, 2015, no. 7, vol. 86, pp. 373-378. DOI.org/10.3103/S1068371215070111.
- Pyatibratov G.Y., Kravchenko O.A., Papirnyak V.P. Ways of realization and directions of perfection of simulators for preparation of cosmonauts for work in weightlessness *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Russian Electromechanics], 2010, no. 5, pp. 70-76. (In Russian)
- Pyatibratov G.Y., Kravchenko O.A., Denisov A.A. Realization of systems of regulation of efforts of electromechanical complexes with elastic connections. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Russian Electromechanics], 1997, no. 3, pp. 51-54. (In Russian)
- Barylnik D.V., Pyatibratov G.Y., Kravchenko O.A. *Sil'kompensiruyushchie Sistemy s Elektroprivodami Peremennogo Toka Trenazhernykh Kompleksov Podgotovki Kosmonavtov* [Force Balancing Systems with AC Electric Drives of Cosmonauts Training Complexes]. Novocherkassk, 2012, 176 p. (In Russian)
- Pyatibratov G.Y., Bogdanov D.Y., Bekin A.B. Synthesis of an object moving control system with flexible suspension under the action of external forces. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 29-36. DOI.org/10.1016/j.proeng.2015.12.004.
- Pyatibratov G.Y., Bekin A.B., Bogdanov D.Y. Retrofit simulator to train cosmonauts for working in non-gravity and reduced gravity environment. *Procedia Engineering*. 2015. vol. 129, pp. 42-50. DOI.org/10.1016/j.proeng.2015.12.006
- Kravchenko O.A., Pyatibratov G.Y., Sukhenko N.A., Bekin A.B. The architecture and realization of systems compensating force of gravity. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [University news. North-caucasian region. Technical sciences series], 2013, no. 2 (171), pp. 32-35. (In Russian)
- Kravchenko O.A. Principles of construction of multicoordinate force compensating systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Russian Electromechanics], 2008, no. 3, pp.43-47 (In Russian).
- Kravchenko O.A., D.V. Barylnik, Bogdanov D.Y., Mathematical model of electromechanical multicoordinate force-compensation systems. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2014, vol. 14, no. 1, pp. 71-78. (In Russian)
- Bekin A.B., Pyatibratov G.Y., Shmat R.A. Determination of rational structure of control system moves objects with uses of flexible transmission. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Russian Electromechanics], 2017, vol. 60, no. 2, pp. 57-64. (In Russian). DOI:10.17213/0136-3360-2017-1-57-64.
- Kovach K.P., Rats I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transient processes in alternating current machines]. Moscow, Gosenergoizdat, 1963, 744 p. (In Russian)
- Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC electric drives]. Ivanovo, Ivanovo Power Engineering Institute, 2008, 298 p. (In Russian)
- Bogdanov D.Yu., Kravchenko O.A. Математическая модель электромеханических стендов обезвешивания с учетом силовых взаимодействий в радиальной конструкции // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 1(38). С. 26-32. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-26-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-26-32)
- Bogdanov D.Yu., Kravchenko O.A. Mathematical Model of Electromechanical Weightlessness Simulators Taking Account of Force Interactions in Radial Construction. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 26-32. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-26-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-26-32)

КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ МЕСТА УСТАНОВКИ РЕКЛОУЗЕРА В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 6-10 кВ

Продолжительность восстановления электроснабжения в неавтоматизированных распределительных сетях 6-10 кВ может находиться в диапазоне 3-10 и более часов. Около 60% этого времени идет на поиск и локализацию поврежденного участка и только 40% времени занимают ремонтные работы. Повышение надежности электроснабжения связывается с секционированием сетей с помощью автоматизированных децентрализованно управляемых реклоузеров, сокращающих продолжительность определения места повреждения, локализуемых поврежденный участок сети и практически мгновенно включающих резервное питание. В зависимости от условий размещения и выбранного варианта применения реклоузеров возникает необходимость определения оптимальных мест их расположения в сети. В решении многовариантной задачи требуется определение критериев оптимизации: интегрального показателя – суммарного годового недоотпуска электроэнергии; количества и продолжительности отключений потребителя. При последовательном реклоузерном секционировании линии с односторонним питанием надежность потребителей трех участков не одинакова и тем выше, чем ближе участок к центру питания: на первом участка общее количество и продолжительность отключений снизились в 2,8 раза, у второго – в 1,4 раза, а для третьего – остались прежними; недоотпуск электроэнергии снизился по сравнению с базовым вариантом в 1,58 раза. При последовательном секционировании линии с двухсторонним питанием возникновение короткого замыкания на одном участке не влияет на надежность электроснабжения потребителей смежных участков. Недоотпуск электроэнергии снизился в 2,91 раза, улучшились параметры, влияющие на надежность, – эффективность автоматического секционирования тем выше, чем меньше протяженность участка между двумя реклоузерами. Проведенные расчеты с учетом влияния децентрализованной системы секционирования показали снижение количества и продолжительности отключений. В зависимости от выбранного варианта секционирования линий суммарный недоотпуск электроэнергии по сети снижается на 69,7-83,5%. Результаты расчета параметров, влияющих на надежность электроснабжения, показали, что в различных вариантах секционирования надежность электроснабжения потребителей конкретных участков сети меняется не пропорционально изменению суммарного недоотпуска электроэнергии. В зависимости от выбранного критерия оптимизации необходимо придерживаться предложенных подходов к выбору мест размещения реклоузеров.

Ключевые слова: реклоузер, децентрализованное управление, распределительная электрическая сеть, оптимизация, критерии надежности.

ВВЕДЕНИЕ

Одними из наиболее слабых звеньев в системе электроснабжения являются распределительные электрические сети (РЭС) напряжением 6-10 кВ – конечный этап на пути электроэнергии от районной подстанции (ПС) к потребителю. Около 70% всех нарушений электроснабжения происходит в воздушных линиях (ВЛ) этого класса напряжения [1, 2]. Современным способом повышения надежности электроснабжения является секционирование линий электропередачи (ЛЭП) с помощью децентрализованно управляемых реклоузеров [2-5].

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В зависимости от условий размещения и выбранного варианта применения реклоузеров возникает необходимость определения оптимальных мест их расположения в РЭС. Для решения рассматриваемой многовариантной задачи необходимо определение критериев оптимизации, к которым можно отнести минимизацию соответствующих параметров, влияющих на надежность электроснабжения [1-4].

Проведенный в работе [6] расчет капитальных вложений и эксплуатационных затрат даже без учета расходов на выезд бригад, проведение осмотра линии, производства оперативных переключений, для опреде-

ления поврежденного участка особенно на длинных ВЛ, проходящих через лесные массивы и болотистую местность, позволил авторам сделать вывод о том, что применение реклоузеров в распределительных сетях 6-10 кВ является не только перспективным, но и экономически оправданным мероприятием.

Уже в 2008 году предприятие «Карелэнерго» [7] при использовании реклоузеров получило экономический эффект 1467,8 тыс. руб., в том числе из-за снижения эксплуатационных расходов – 1365,2 тыс. руб. и за счет снижения недоотпуска электрической энергии – 102,6 тыс. руб. Продолжительность окупаемости реклоузеров составила 7,5 лет.

Энергетики также отмечают снижение эксплуатационных расходов и уменьшение недоотпуска электроэнергии [8]. Например, сравнивая схемы электроснабжения без реклоузеров и с ними, видно, что расходы на восстановление схем с учетом затрат на транспорт, персонал и связь сократились в 2,1 раза, а суммарный недоотпуск электроэнергии – в 2,2 раза.

Кроме того, только использование реклоузеров позволяет решать задачи построения автоматизированных сетей, оснащенных интеллектуальными средствами мониторинга, диагностики и управления [9]. В подобных случаях экономический эффект и срок окупаемости уходят на второй план, уступая место интегральному показателю оценки [8] – суммарному годовому недоотпуску электроэнергии (ГНЭ), который позволяет количественно оценивать эффективность

различных мероприятий по повышению надежности электроснабжения через возможный ущерб при отключении потребителя.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При разработке и проектировании электрических сетей с распределенной генерацией в вопросах определения оптимального места расположения реклоузеров требуются сложные алгоритмы [10, 11].

В радиальных электрических сетях 6-10 кВ достаточно сконцентрироваться на объеме суммарного ГНЭ [2, 4, 8, 12], на который влияет ряд факторов, каждый из которых также служит показателем надежности: количество и продолжительность отключений потребителя или группы электроприемников (ЭП).

Суммарный ГНЭ $\Delta W_{\text{НО}}$ используется как интегральный критерий в случае необходимости повышения надежности потребителей фидера в целом. При этом оптимизация заключается также в уменьшении этого параметра по РЭС в целом. Целевая функция суммарного ГНЭ для РЭС записывается в виде [3, 4]

$$\Delta W_{\text{НО}} = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot T \cdot L \cdot P_p \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$P_p = S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi \cdot k_3, \quad (2)$$

где $\Delta W_{\text{НО}}$ – ГНЭ, кВт·ч/год; ω_0 – удельная частота повреждений ВЛ 6-10 кВ, единиц на 100 км в год; T – средняя продолжительность восстановления одного устойчивого повреждения, ч; L – длина участка линии, км; P_p – активная расчетная мощность нагрузки, кВт; $S_{\text{НОМ}}$ – полная номинальная мощность нагрузки, кВ·А; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности; k_3 – коэффициент загрузки.

Количество $\omega_{\text{П}}$ и продолжительность отключений потребителя или группы ЭП $T_{\text{П}}$ используются в качестве критерия при адресном повышении надежности электроснабжения. Оптимизация заключается в уменьшении значений параметров, влияющих на надежность электроснабжения конкретного потребителя или группы ЭП. Параметры определяются индивидуально для ЭП на участке сети между двумя реклоузерами по формулам [3-5]:

$$\omega_{\text{П}} = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot L \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $\omega_{\text{П}}$ – количество отключений потребителя в год, 1/год;

$$T_{\text{П}} = \omega_{\text{П}} \cdot T \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $T_{\text{П}}$ – продолжительность отключения потребителя в год, ч/год.

Сравнение параметров, влияющих на надежность, в различных вариантах размещения реклоузеров проводится с базовым вариантом сети, в которой установлены другие коммутационные аппараты или с РЭС 6-10 кВ, оборудованной электромеханической релейной защитой и автоматикой, однократными средствами АПВ в центрах питания (ЦП) и линейными разъединителями с ручным управлением.

Для определения параметров, влияющих на надежность, необходимы следующие сведения:

1) присутствие в РЭС автоматических пунктов секционирования (для корректировки базового варианта схемы сети);

2) наличие в сети средств АПВ (для оценки степени влияния устанавливаемых реклоузеров на число отключений ЛЭП);

3) удельная частота повреждений ω_0 – значение устойчивых отключений на 100 км в ЛЭП, на которой планируется установка реклоузеров. Известно, что около 80% повреждений ВЛ являются неустойчивыми и/или самовосстанавливаемыми [13], что объясняет целесообразность установки средств АПВ. Опыт эксплуатации ВЛ показывает, что успешность первого срабатывания АПВ сокращает число отключений на 60%. В неавтоматизированных сетях функцию АПВ выполняет линейная ремонтная бригада, которая осуществляет первое пробное включение фидера в ЦП при его аварийном отключении. Для оценки дополнительного влияния в расчетные формулы параметров, влияющих на надежность, вводится коэффициент $k_{\text{НУ}}$ и расчетные выражения принимают вид:

$$\Delta W'_{\text{НО}} = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{\text{НУ}}) \cdot T \cdot L \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi \cdot k_3; \quad (5)$$

$$\omega'_{\text{П}} = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{\text{НУ}}) \cdot L; \quad (6)$$

$$T'_{\text{П}} = \omega'_{\text{П}} \cdot T \rightarrow \min, \quad (7)$$

где $k_{\text{НУ}}$ – коэффициент учета влияния децентрализованной системы секционирования сетей на число аварийных отключений.

В практических расчетах можно принимать следующие значения [3, 4, 12]:

– $k_{\text{НУ}} = 0$ – в исходном варианте сети без реклоузеров или в сети, где планируется установка реклоузеров уже имеется АПВ, а также если количество циклов АПВ на реклоузерах (в соответствии с принятым алгоритмом работы) равно количеству циклов АПВ на головном выключателе в ЦП;

– $k_{\text{НУ}} = 0,2$ – при наличии двукратного АПВ реклоузера, а на головном выключателе ЦП однократного АПВ или ручного включения;

– $k_{\text{НУ}} = 0,25$ – при трехкратном АПВ реклоузера;

4) средняя продолжительность восстановления электроснабжения T – среднее время, затрачиваемое на восстановление электроснабжения потребителей при одном устойчивом повреждении;

5) нагрузки потребителей и средние коэффициенты загрузки трансформаторных пунктов ТП 6-10/0,4 кВ;

6) протяженности фидеров и ответвлений.

Перед расчетом параметров, влияющих на надежность электроснабжения потребителей, необходимо представлять, каким образом автоматическое секционирование ЛЭП с применением реклоузеров может изменить эти параметры. Из выражений (1)-(3) видна линейная зависимость недоотпуска электроэнергии, количества и длительности отключений от составляющих: ω_0 – удельной частоты повреждений ЛЭП в год; T – общего времени восстановления электроснабжения в год; произведения $T \cdot L \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi \cdot k_3$ – значения отключаемой нагрузки при одном отключении на участке длиной L .

Оценим возможное влияние автоматического секционирования реклоузеров на рассматриваемые составляющие и, как следствие, на параметры, влияющие на надежность электроснабжения.

Общая продолжительность восстановления электроснабжения. Процесс восстановления электроснабжения существующих РЭС разделяется на несколько стадий:

1) от момента отключения ЛЭП до начала поиска – время, через которое диспетчер получает сообщение о повреждении и отдает распоряжение линейной бригаде на поиск повреждения в ЛЭП;

2) определение места повреждения (ОМП) – первое пробное включение выключателя $Q_{ЦП}$ в ЦП (рис. 1) или ручное повторное включение и последующие переходы по зоне обхода, ручные переключения разъединителей QS на ВЛ до момента нахождения поврежденного участка (отключение QS_4 – включение $Q_{ЦП}$ – $Q_{ЦП}$ отключается – отключение QS_3 – включение $Q_{ЦП}$ – $Q_{ЦП}$ отключается – отключение QS_2 – включение $Q_{ЦП}$ – $Q_{ЦП}$ остается включенным – поврежденный участок найден);

3) выделение поврежденного участка РЭС – включение разъединителей между поврежденным участком и сетевым резервом (отключение $Q_{ЦП}$ – включение QS_4);

4) включение потребителей на неповрежденных участках РЭС путем ввода сетевого резерва (включение Q_C с подачей питания до QS_2);

5) обход поврежденного участка и ОМП;

6) выполнение ремонтных работ в зависимости от вида повреждения.

Продолжительность восстановления электроснабжения фактически сводится ко времени, затрачиваемому на обход поврежденного участка и ремонт в месте повреждения. В связи с тем, что для оценки эффективности децентрализованной системы управления в послеаварийном режиме требуется значительный объем данных (принятый алгоритм передвижения линейной бригады в зоне обхода, учет особенностей рельефа местности, средние скорости передвижения и др.), в укрупненных расчетах можно оперировать средним показателем – коэффициентом $k_{ВВ}=0,6$ для 40% времени ремонтных работ.

Выражения (2)-(4) для расчета параметров, влияющих на надежность, с введением дополнительного коэффициента $k_{ВВ}$ примут вид:

$$\Delta W_{НО}^{//} = 0,01\omega_0(1-k_{НУ})T \cdot k_{ВВ}L \cdot S_{НОМ} \cos \varphi \cdot k_3; \quad (8)$$

$$\omega_{П}^{//} = 0,01\omega_0(1-k_{НУ})L; \quad (9)$$

$$T_{П}^{//} = \omega_{П} \cdot T \cdot k_{ВВ}, \quad (10)$$

где $k_{ВВ}$ – коэффициент влияния децентрализованной системы секционирования на общую продолжительность возобновления электроснабжения.

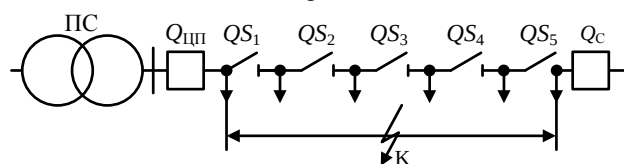


Рис. 1. Схема секционирования участков РЭС с помощью разъединителей QS и пункта секционирования Q_C

На значение мощности отключенной нагрузки ЭП существенное влияние оказывает децентрализованная автоматизация. В расчетах параметров, влияющих на надежность, эффективность оценивается по мощности отключаемой нагрузки при повреждениях на участках между реклоузерами. В связи с тем, что в ремонт автоматически выводится поврежденный участок РЭС, степень влияния повреждения на потребителей зависит от места и количества установленных коммутационных аппаратов Q_R (рис. 2).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Использование методики расчета параметров, влияющих на надежность РЭС, целесообразно проиллюстрировать на типичных примерах некоторых вариантов автоматического секционирования РЭС.

1. Схема местного секционирования линии с двухсторонним питанием с помощью разъединителей (используемый для сравнения базовый вариант). Пусть известны следующие исходные данные по исследуемой сети (рис. 3):

- на каждом ответвлении длиной $L_{отв}=2$ км находится по два трансформаторных пункта (ТП) 10/0,4 кВ;
- номинальная мощность каждого ТП $S_{НОМ}=160$ кВ·А;
- средние коэффициенты нагрузки ТП: $\cos \varphi=0,85$; $k_3=0,735$, тогда расчетная мощность каждого ответвления будет равна $P_{р\ отв}=2 \cdot S_{НОМ} \cos \varphi \cdot k_3=200$ кВт;
- протяженность фидера по магистрали $L_{маг\Sigma}=15$ км;
- протяженность магистрального участка фидера между секционирующими устройствами $SQ - L_{маг}=5$ км;
- удельная частота повреждений $\omega_0=40$ единиц на 100 км [2];
- среднее продолжительность восстановления электроснабжения $T=6$ ч.

Вероятность отключения потребителей по всей протяженности фидера одинакова, поскольку при коротком замыкании (КЗ) в любой из точек $K1$, $K2$ или $K3$ релейная защита отключает головной выключатель $Q_{ЦП}$ ЦП ПС1 и электроснабжение прекращается для всех потребителей.

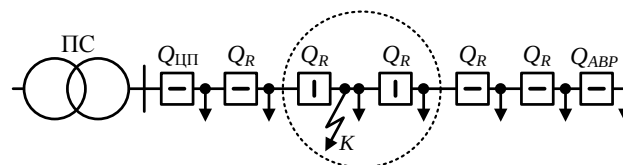


Рис. 2. Децентрализованное управление послеаварийным режимом работы сети:
 Q_R – секционирующий реклоузер;
 Q_{ABP} – АБР-реклоузер

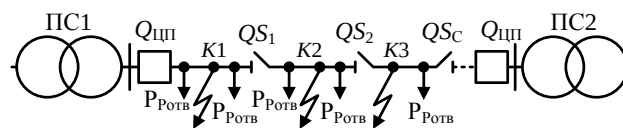


Рис. 3. Базовый вариант схемы местного секционирования фидера с помощью разъединителей:
 Q_C – разъединитель сетевого резерва

Вероятность отключений и количество отключений РЭС определяется суммарной протяженностью фидера и ответвлений (15 км по магистрали и 10 км по ответвлениям). Параметры, влияющие на надежность электроснабжения потребителей, практически не зависят от принадлежности к отдельным участкам ЛЭП и также определяются вероятностью повреждения всей ЛЭП. ГНЭ согласно (1) составит

$$\Delta W_{HO} = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot T \cdot (L_{отв} + L_{маг}) \cdot \sum_{i=1}^n P_{ротв i} ; \quad (11)$$

$$\Delta W_{HO} = 0,01 \cdot 40 \cdot 6 \cdot (5 \cdot 2 + 15) [(200 + 200) + (200 + 200) + 200] = 60000 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Количество отключений потребителя в год согласно (3)

$$\begin{aligned} \omega_{\Pi} &= 0,01 \omega_0 (L_{отв} + L_{маг}) = \\ &= 0,01 \cdot 40 \cdot (10 + 15) = 10 \text{ год}^{-1}. \end{aligned}$$

Продолжительность отключения потребителя в год согласно (4)

$$T_{\Pi} = \omega_{\Pi} \cdot T = 10 \cdot 6 = 60 \text{ ч/год}.$$

2. Последовательное секционирование РЭС с односторонним питанием и использованием реклоузеров (рис. 4). Для исследования использованы основные исходные данные из первого примера. Фидер разделен на три участка установленными автоматическими реклоузерами Q_{R1} и Q_{R2} .

В рассматриваемой схеме вероятность отключения потребителей определяется вероятностью возникновения повреждения на каждом отдельном участке. Для упрощения анализа пока не будем учитывать влияние децентрализованной системы секционирования на количество отключений и на продолжительность восстановления электроснабжения.

При КЗ на участке от головного выключателя $Q_{ЦП}$ ЦП ПС до реклоузера Q_{R1} (точка К1) электроснабжения, как и в первом примере, лишаются все потребители. При КЗ на участке от Q_{R1} до Q_{R2} (точка К2) отключатся только потребители, расположенные за реклоузером Q_{R1} , и в случае КЗ на участке за Q_{R2} (точка К3) питание сохраняют все потребители, за исключением потребителей третьего участка. Следовательно, при последовательном секционировании линии с односторонним питанием надежность потребителей отдельных участков уже не одинакова и тем выше, чем ближе секционированный участок, на котором находится потребитель, к ЦП.

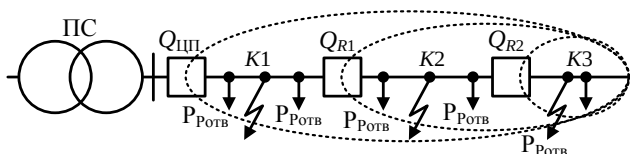


Рис. 4. Схема последовательного секционирования ЛЭ с односторонним питанием

Параметры, влияющие на надежность, необходимо учитывать отдельно по каждому j -участку, а суммарный ГНЭ определяется суммой недоотпусков при КЗ на разных участках линии. ГНЭ согласно (1) составит

$$\Delta W_{HO} = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot T \cdot (L_{отв} + L_{маг}) \cdot \sum_{i=1}^n P_{ротв i} ; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{HO} &= 0,01 \cdot 40 \cdot 6 \cdot \{ (4 + 5) [(200 + 200) + \\ &+ (200 + 200) + 200] + (4 + 5) [(200 + 200) \\ &+ 200] + (2 + 5) 200 \} = 37920 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}. \end{aligned}$$

Количество отключений потребителя в год согласно (3) и продолжительность отключения потребителя в год по (4) на отключаемых j -участках РЭС составит

$$\omega_{\Pi} = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot \sum_{j=1}^m (L_{отв j} + L_{маг j}) ; \quad (13)$$

$$\omega_{\Pi 1} = 0,01 \cdot 40 \cdot (4 + 5) = 3,6 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{\Pi 1} = \omega_{\Pi 1} \cdot T = 3,6 \cdot 6 = 21,6 \text{ ч/год};$$

$$\omega_{\Pi 2} = 0,01 \cdot 40 \cdot ((4 + 5) + (4 + 5)) = 7,2 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{\Pi 2} = 7,2 \cdot 6 = 43,2 \text{ ч/год}.$$

$$\omega_{\Pi 3} = 0,01 \cdot 40 ((4 + 5) + (4 + 5) + (2 + 5)) = 10 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{\Pi 3} = 10 \cdot 6 = 60 \text{ ч/год}.$$

Полученные результаты показывают, что ГНЭ в РЭС в целом снизился по сравнению с базовым вариантом в 1,58 раза. При этом параметры, влияющие на надежность электроснабжения конкретных потребителей, изменились по-разному. У потребителей первого участка общее количество и продолжительность отключений снизились в 2,8 раза, у второго – в 1,4 раза, а для третьего – остались прежними.

3. Последовательное секционирование реклоузерами линии с двухсторонним питанием. В этой схеме (рис. 5) в случае аварии (КЗ или обрыв в линии) имеется возможность автоматически включить резервное питание от смежной подстанции ПС2. При возникновении КЗ в любой точке сети КЗ будет автоматически локализовано в пределах одного участка РЭС.

В рассматриваемой схеме возникновение КЗ на одном участке не влияет на надежность электроснабжения потребителей смежных участков. В сравнении с базовым вариантом вероятность отключения потребителей в пределах одного участка определяется длиной только j -участка, ограниченного двумя реклоузерами.

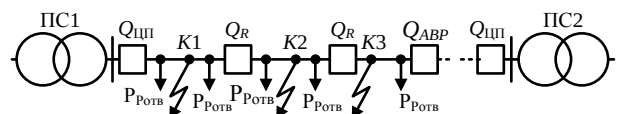


Рис. 5. Схема последовательного секционирования линии с двухсторонним питанием с помощью реклоузеров: Q_{ABP} – реклоузер АВР

ГНЭ составит

$$\Delta W_{HO} = 0,01 \omega_0 T \left[\sum_{j=1}^m (L_{отв j} + L_{mag j}) \cdot P_{р_отв j} \right], \quad (14)$$

где $P_{р_отв j}$ – расчетная нагрузка j -участка.

$$\Delta W_{HO} = 0,01 \cdot 40 \cdot 6 \left[(4+5) \cdot (200+200) + (4+5) \times (200+200) + (2+5) \cdot 200 \right] = 20640 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

$$\Delta W_{HO} = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot T \cdot L \cdot P_{ном} = 0,01 \cdot 10 \cdot 6 \cdot (5+4) \times (400+400) + 0,01 \cdot 10 \cdot 6 \cdot (5+4) \cdot (400+400) + 0,01 \cdot 10 \cdot 6 \cdot (5+2) \cdot 400 = 10320 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Количество отключений потребителя в год согласно (3) и продолжительность отключения потребителя в год по (4) на отключаемых j -участках сети:

$$\omega_{П1} = 0,01 \cdot 40 \cdot (4+5) = 3,6 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{П1} = 3,6 \cdot 6 = 21,6 \text{ ч/год};$$

$$\omega_{П2} = 0,01 \cdot 40 \cdot (4+5) = 3,6 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{П2} = 3,6 \cdot 6 = 21,6 \text{ ч/год};$$

$$\omega_{П3} = 0,01 \cdot 40 \cdot (2+5) = 2,8 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{П3} = 2,8 \cdot 6 = 16,8 \text{ ч/год}.$$

Результаты расчетов показывают, что ГНЭ снизился в 2,91 раза. Имеет место и улучшение параметров, влияющих на надежность потребителей каждого секционированного участка фидера. В данном случае эффективность автоматического секционирования тем выше, чем меньше протяженность участка между двумя реклоузерами. Результаты проведенных расчетов сведены в **табл. 1**. Проведенные расчеты не учитывали влияния децентрализованной системы секционирования на количество и продолжительность отключений. Поэтому для определения реального эффекта результаты расчетов (**табл. 1**) целесообразно уточнить, применяя коэффициенты $k_{НУ}$ и $k_{ВВ}$.

Примем значение $k_{НУ}=0,2$ для двукратного АПВ на реклоузерах и однократного АПВ в ЦП; $k_{ВВ}=0,6$. Пересчет результатов из **табл. 1** проводится по выражениям (8)–(10). Результаты уточненных расчетов сведены в **табл. 2**.

Таблица 1

Результаты расчета технической эффективности различных вариантов секционирования

Вариант секционирования	Участок сети	Годовой недоотпуск ΔW_{HO} , кВт·ч/год	Количество отключений потребителя $\omega_{П}$, год ⁻¹	Продолжительность отключения потребителя $T_{П}$, ч/год
1. Ручное–местное	1 2 3	60000	10	60
2. Последовательное в сети с односторонним питанием	1 2 3	37920	3,6 7,2 10	21,6 43,2 60
3. Последовательное в сети с двухсторонним питанием	1 2 3	20640	3,6 3,6 2,8	21,6 21,6 16,8

Таблица 2

Уточненные результаты расчета эффективности вариантов секционирования

Вариант секционирования	Участок сети	$\Delta W_{HO}'$, кВт·ч/год	$\Delta W_{отн}'$, %	$\omega_{П}'$, год ⁻¹	$\omega_{П отн}'$, год ⁻¹	$T_{П}'$, ч/год	$T_{П отн}'$, %
1. Ручное–местное	1 2 3	60000	–	10	–	60	–
2. Последовательное в сети с односторонним питанием	1 2 3	18201,6	69,7	2,88 5,76 8	71,2 42,4 20	12,96 25,92 36	78,4 56,8 40
3. Последовательное в сети с двухсторонним питанием	1 2 3	9907,2	83,5	2,88 2,88 2,24	71,2 71,2 77,6	12,96 12,96 10,08	78,4 78,4 83,2

Для сравнительной оценки эффективности между расчетным (Р) и базовым (Б) вариантами найдем относительное процентное значение параметров, влияющих на надежность: $\Delta W_{\text{отн}}$, $\omega_{\text{П отн}}$ и $T_{\text{П отн}}$, определяемых по выражениям:

$$\Delta W_{\text{отн}} = \frac{\Delta W_{\text{Б}} - \Delta W_{\text{Р}}}{\Delta W_{\text{Б}}} 100\%; \quad (15)$$

$$\omega_{\text{П отн}} = \frac{\omega_{\text{ПБ}} - \omega_{\text{ПР}}}{\omega_{\text{ПБ}}} 100\%; \quad (16)$$

$$T_{\text{П отн}} = \frac{T_{\text{ПБ}} - T_{\text{ПР}}}{T_{\text{ПБ}}} 100\%. \quad (17)$$

В зависимости от выбранного варианта автоматического секционирования линий суммарный ГНЭ по РЭС в целом снижается на 69,7-83,5% (см. табл. 2). Надежность электроснабжения по сравнению с базовым вариантом (сеть с ручным местным секционированием) по РЭС в целом повышается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчета параметров, влияющих на надежность электроснабжения потребителей отдельных участков РЭС, показывают, что в различных вариантах автоматического секционирования надежность электроснабжения потребителей конкретных участков сети меняется не пропорционально изменению суммарного ГНЭ. В зависимости от выбранного критерия оптимизации необходимо придерживаться следующих подходов к выбору мест размещения реклоузеров в сети.

1. По критерию суммарного ГНЭ для повышения надежности электроснабжения потребителей РЭС в целом целесообразно разделить фидер на отдельные участки путем размещения реклоузеров так, чтобы моменты (произведения длины и нагрузки) каждого отдельного участка были примерно равны друг другу. Эффективность (надежность электроснабжения) будет тем выше, чем меньше протяженность каждого участка или чем больше секционированных участков в РЭС.

2. По критерию числа и продолжительности отключений конкретного потребителя (или группы ЭП) для адресного повышения надежности необходимо устанавливать реклоузеры наиболее приближенно к рассматриваемому потребителю (или группы ЭП).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воротницкий В.Э., Воротницкий В.В. Надежность распределительных электрических сетей 6 (10) кВ – автоматизация с применением реклоузеров // *Новости электротехники*. 2002. № 5. С. 22-25.
2. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г. Децентрализованное управление распределительными электрическими сетями 6-10 кВ АПК // *Актуальные вопросы технических наук: теоретический и практический аспекты: коллективная монография / под ред. И.В. Мирошниченко*. Уфа: Аэтерна, 2017. С. 64-87.
3. Воротницкий В., Бузин С. Реклоузер – новый уровень автоматизации и управления ВЛ 6 (10) кВ // *Новости электротехники*. 2005. № 3 (33).
4. Реклоузер вакуумный серии РВА/TEL: Техническая информация ТШФГ 674153.101. Изменение № 6. М.: Российская группа компаний «Таврида электрик». 2007. 82 с.
5. Ray S.; Bhattacharya A.; Bhattacharjee S. Optimal placement of switches in a radial distribution network for reliability improvement. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2016. No 76. P. 53-68.
6. Гришин Д.А., Василькова Т.М. Экономическая эффективность применения вакуумных реклоузеров серии РВА/TEL // *Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии; ФГБОУ ВО «Костромская ГСХА»*. Караваев, 2016. С. 141-147.
7. Чурсин В. Реклоузеры: насколько это выгодно? // *Кабель-News*. 2009. № 3. С. 22-23.
8. Кваша Е.М. Эффективные инновации, или насколько выгодно применять реклоузеры? // *Энергия и менеджмент*. 2009. № 5 (50). С. 6-9.
9. Hajivand M., Karimi R., Karimi M. Optimal recloser placement by binary differential evolutionary algorithm to improve reliability of distribution system. *International Journal of Information. Security and Systems Management*. 2014. Vol. 3. No. 2. P. 345-349.
10. Abiri-Jahromi A. Fotuhi-Firuzabad M. Parvania, Masood M. Optimized Sectionalizing Switch Placement Strategy in Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2012. No 27 (1). P. 362-370.
11. Wang L., Singh C. Reliability-Constrained Optimum Placement of Reclosers and Distributed Generators in Distribution Networks Using an Ant Colony System Algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part C: Applications and Reviews*. 2008. Vol. 38. No 6. P. 757-764.
12. Максимов Б.К., Воротницкий В.В. Оценка эффективности автоматического секционирования воздушных распределительных сетей 6(10) кВ с применением реклоузеров с целью повышения надежности электроснабжения потребителей // *Электротехника*. 2005. № 10. С. 7-22.
13. Калентионок Е.В. Статистический анализ повреждаемости воздушных распределительных электрических сетей // *Энергия и менеджмент*. 2011. № 4 (61). С. 15-18.

Поступила в редакцию 06 ноября 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CRITERIA FOR OPTIMIZING THE PLACE OF REKLOUSER INSTALLATION IN THE 6-10 kV DISTRIBUTION NETWORK

Vasilii G. Sazykin

D.Sc. (Eng.), Professor, the Department of application of electric energy, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia.

Alexander G. Kudryakov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of application of electric energy, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia.

Alexander A. Bagmetov

Laboratory assistant, Department of application of electric energy, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia.

The duration of the restoration of power supply in the non-automated 6-10 kV distribution networks can be in the range of 3-10 or more hours. About 60% of this time goes to the search and localization of the damaged site and only 40% of the time is occupied by repair work. Improving the reliability of power supply is associated with network partitioning with the help of automated decentralized managed reclosers. Depending on the conditions of deployment and the chosen application of reclosers, it becomes necessary to determine the optimal locations for their location in the network. In solving the problem, the definition of optimization criteria is required: the total annual under-supply of electricity; the number and duration of customer shutdowns. The calculations taking into account the influence of the decentralized system of sectioning showed a decrease in the number and duration of cut-offs. Depending on the option of sectioning the lines, the total under-supply of electricity through the grid is reduced by 69.7-83.5%. The results of calculating the parameters influencing the reliability of power supply showed that in various sections of the configuration the reliability of the power supply to consumers of specific sections of the network varies not in proportion to the change in the total under-supply of electricity. Depending on the chosen optimization criterion, it is necessary to adhere to the proposed approaches to the choice of locations for placement of reclosers.

Keywords: recloser, decentralized control, distribution network, optimization, reliability criteria.

REFERENCES

1. Vorotnitsky V.E., Vorotnitsky V.V. Reliability of distributive electrical networks 6 (10) kV – automation with the use of reclosers. *Novosti elektrotehniki* [News of electrical engineering]. 2002, no. 5, pp. 22-25. (In Russian)
2. Sazykin V.G., Kudryakov A.G. *Aktualnye voprosy tekhnicheskikh nauk: teoreticheskiy i prakticheskiy aspekty* [Decentralized control of 6-10 kV distributive electrical networks APK. Actual questions of technical sciences: theoretical and practical aspects]. Collective monograph. Edited by I.V. Miroshnichenko. Ufa: AERTERNA, 2017, pp. 64-87. (In Russian)
3. Vorotnitsky V., Buzin S. Recloser – a new level of automation and control of HVL 6 (10) kV. *Novosti elektrotehniki* [News of electrical engineering]. 2005, no. 3 (33). (In Russian)
4. *Reklozer vakuumnyi serii PVA/TEL* [Recloser vacuum series PVA / TEL]. Technical information TSHFG 674153.101. Change No. 6. Moscow: Russian group of companies "Tavrida Electric", 2007. 82 p. (In Russian)
5. Ray S.; Bhattacharya A.; Bhattacharjee S. Optimal placement of switches in a radial distribution network for reliability improvement. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2016. No. 76. pp. 53-68.
6. Grishin D.A., Vasilkova T.M. Economic efficiency of the use of vacuum reclosers series PBA / TEL. *Trudy Kostromskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* [Proceedings of the Kostroma State Agricultural Academy]. Kostroma State Agricultural Academy. Karavaev, 2016, pp. 141-147. (In Russian)
7. Chursin V. Reclosers: how profitable are they? *Kabel-News* [Cable-News]. 2009, no. 3, pp. 22-23.
8. Kvasha. E.M. Effective innovation, or how much benefit from reclosers? *Energiya i menedzhment* [Energy and management]. 2009, no. 5 (50), pp. 6-9. (In Russian)
9. Hajivand M., Karimi R., Karimi M. Optimal recloser placement by binary differential evolutionary algorithm to improve reliability of distribution system. *International Journal of Information. Security and Systems Management.* 2014, vol. 3, no. 2, pp. 345-349.
10. Abiri-Jahromi A. Fotuhi-Firuzabad M. Parvania, Masood M. Optimized Sectionalizing Switch Placement Strategy in Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 2012, no. 27 (1), pp. 362-370.
11. Wang L., Singh C. Reliability-Constrained Optimum Placement of Reclosers and Distributed Generators in Distribution Networks Using an Ant Colony System Algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part C: Applications and Reviews.* 2008, vol. 38, no. 6, pp. 757-764.
12. Maksimov B.K., Vorotnitsky V.V. Evaluation of the efficiency of automatic sectioning of 6 (10) kV air distribution grids with the use of reclosers in order to increase the reliability of power supply of consumers. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2005, no. 10, pp. 7-22. (In Russian)
13. Kalentionok E.V. Statistical Analysis of the Damage of Air Distribution Electric Networks. *Energiya i menedzhment* [Energy and Management]. 2011, no. 4 (61), pp. 15-18. (In Russian)

Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г., Багметов А.А. Критерии оптимизации места установки реклоузера в распределительной сети 6-10 КВ // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 1(38). С. 33-39. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-33-39](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-33-39)

Sazykin V.G., Kudryakov A.G., Bagmetov A.A. Criteria for Optimizing the Place of Reclouser Installation in the 6-10 KV Distribution Network. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 33-39. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-33-39](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-33-39)

Газизова О.В., Соколов А.П., Малафеев А.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

К ВОПРОСУ УЧЕТА НАСЫЩЕНИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

При анализе переходных электромеханических и электромагнитных переходных процессов одним из наиболее важных является выбор адекватной математической модели синхронного генератора. В общем случае подходы к моделированию делятся на два вида. С целью подробного анализа систем автоматического регулирования генератора создается подробная математическая модель, учитывающая все контуры регулирования, их характеристики и физические свойства машины. Однако такой подход оправдан для подробного исследования отдельной машины. При анализе режимов сложных промышленных систем электроснабжения чрезмерная детализация процессов, порой не имеющая значения для исследования режимов сети, существенно усложняет процесс моделирования и приводит к увеличению длительности расчета. С целью анализа длительных переходных электромеханических процессов генератор рекомендуется задавать упрощенно неизменными переходными величинами. Однако такой подход может приводить к погрешности расчета. Одной из причин этого является изменение собственных сопротивлений генератора, поскольку изменения токов и напряжений вызывают изменение уровня насыщения машины, в том числе ее отдельных частей. Таким образом, при расчете электромеханических и электромагнитных процессов синхронного генератора следует учитывать не только внешние характеристики регуляторов возбуждения и скорости с соответствующими постоянными времени, но и изменение переходных сопротивлений, оказывающих влияние на токи в аварийном и послеаварийном режимах, а также на величины вращающих электромагнитных моментов, определяющих небаланс мощностей на валу. Учет изменения сверхпереходных, переходных и синхронных индуктивных сопротивлений с учетом насыщения машины в режиме короткого замыкания предполагается произвести при разработке программного комплекса расчета и анализа переходных электромеханических режимов. Расчеты показали, что учет изменения переходного сопротивления оказывает существенное влияние на токи в момент отключения повреждения и синхронизации генератора с сетью. Разработанная математическая модель позволит более корректно определять токи при длительных коротких замыканиях и их отключениях в сетях сложной конфигурации.

Ключевые слова: переходное сопротивление, промышленный синхронный генератор, короткое замыкание, переходный электромеханический режим, программное обеспечение, автоматический регулятор возбуждения, насыщение синхронной машины, электрическая удаленность, математическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование динамической устойчивости электроэнергетических систем является важной задачей и требует учета большого количества факторов. С другой стороны, использование подробных математических моделей синхронных генераторов может существенно увеличивать длительность расчета и перегружать его без необходимости. Анализ динамической устойчивости синхронных генераторов электроэнергетических систем посвящены работы как отечественных, так и зарубежных ученых [1-6]. В настоящее время исследования в данной области направлены на разработку мероприятий по улучшению устойчивости энергосистем [7-11]. Отдельной задачей является повышение устойчивости работы протяженных линий электропередачи [12]. Также в ряде работ описываются дополнительные технические средства, позволяющие повысить устойчивость энергосистемы в целом или отдельной электропередачи [13-15].

При создании математических моделей синхронных генераторов для исследования переходных процессов в общем случае можно выделить два подхода. Первый, предусматривающий подробный учет систем регулирования и технических характеристик, необходим для задач электропривода конкретной машины. Второй подход предназначен для анализа переходных процессов крупных энергосистем, имеющих в своем

составе большое количество электростанций. В этом случае генератор представляется внешними характеристиками с упрощенным учетом постоянных времени регуляторов и объединением группы генераторов в один эквивалентный. Такой подход не вполне применим для сложносвязанных промышленных систем электроснабжения, в которых генераторы имеют мощности, соизмеримые с отдельными электроприемниками, и являются электрически удаленными относительно друг друга. Вопросам математического моделирования промышленных генераторов посвящены труды [16-22]. В случае сложной конфигурации сети и высоких напряжениях могут иметь место сложные электромеханические переходные процессы, зависящие от действия релейной защиты и автоматики [23, 24]. Учет нагрузок промышленных сетей, которые могут быть электрически близкими к генераторам и оказывать непосредственное влияние на динамическую устойчивость, посвящены труды [25, 26]. Отдельными задачами при исследовании устойчивости является представление линий электропередачи [27-29], а также учет возможности аварийного отключения нагрузки [30].

Одним из наиболее важных этапов при анализе устойчивости энергосистем является выбор корректной математической модели генератора. При анализе переходных процессов в энергосистемах часто рекомендуют генератор представлять переходной или сверхпереходной ЭДС за неизменным переходным или сверхпереходным сопротивлением [1]. При этом не учитывается изменение насыщения машин при дли-

тельных глубоких провалах напряжения, которые не вполне ликвидирует также действие АРВ. Данная работа посвящена влиянию изменения сопротивлений машины в переходных режимах на его параметры.

УЧЕТ НАСЫЩЕНИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОРА

Математическое описание сложной электроэнергетической системы основывается на уравнениях различных элементов системы. Синхронные генераторы являются одними из наиболее сложных элементов, поэтому необходимо знать их точные параметры. Это позволяет определить поведение машины при различных возмущениях, например коротких замыканиях. Определение параметров синхронного генератора является ответственной задачей. В то же время нужно максимально просто, наглядно и корректно суметь описать переходные процессы, возникающие в машине посредством внешних возмущений, что, в свою очередь, определяет качественное и успешное воздействие на машину в ряде аварийных случаев в электроэнергетической системе. Вопросы точного и несложного описания процессов и изменения параметров машины очень остры и актуальны на сегодняшний день, поскольку это связано с высокими требованиями к устойчивости систем и экономическим показателям.

Вопросам математического моделирования синхронных генераторов в переходных и сверхпереходных режимах посвящено большое число трудов. Так, в работе Жданова П.С. [1] дается характеристика сверхпереходным и переходным режимам, в частности рекомендуется при длительных электромеханических процессах турбогенератор, в том числе при действии АРВ, представлять переходной ЭДС за неизменным сверхпереходным сопротивлением. Подробная характеристика переходных процессов синхронного генератора приводится в трудах Адкинса Б. [3], Казовского Е.Я. [4], Ковача К.П., Раца И. [2]. В работе Кимбарка Э. [5] подробно описан физический смысл переходных и сверхпереходных ЭДС, сопротивлений и постоянных времени турбогенераторов и приведены принципы их математического моделирования применительно к методам численного интегрирования.

На кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова разработан программный комплекс «КАТРАН» для расчет электромеханических переходных процессов. В его основу положены методы последовательного эквивалентирования и последовательных интервалов. Математические модели и принципы исследования статической и динамической устойчивости в данном программном комплексе изложены в трудах [16, 18, 19].

В современной литературе при использовании методов численного интегрирования для исследования переходных электромагнитных и электромеханических процессов для расчета токов КЗ синхронный генератор без демпферных контуров представляется переходной ЭДС, определенной из начального установившегося режима, за переходным сопротивлением. Такой подход справедлив для расчета периодической составляющей тока КЗ в начальные несколько периодов. Далее начинают изменяться как переходная ЭДС, так и переходное сопротивление. Изменению переходной ЭДС по-

священо значительное количество трудов. Что касается переходного сопротивления, то в имеющейся литературе данный вопрос глубоко освещается довольно редко [2]. Как правило, приводится рекомендация пользоваться переходным сопротивлением, неизменным во времени, в частности при работе АРВ. Однако во время длительных переходных электромеханических и электромагнитных процессов переходное сопротивление не остается неизменным вследствие изменения пути замыкания соответствующих магнитных полей, а также вследствие изменения насыщения магнитопроводов. Нормальный режим работы синхронного генератора относят к насыщенным, в справочной литературе приводят все сопротивления для насыщенного состояния, имея в виду, что из данного состояния генератор переходит в режим короткого замыкания. В режиме КЗ состояние машины изменяется [2] и режим установившегося КЗ относят к ненасыщенным.

Согласно [2], если происходит электрически близкое к синхронному генератору КЗ, то резко повышаются токи в обмотке статора и, следовательно, для соблюдения принципа постоянства потокоцепления в обмотке возбуждения. При этом в воздушном зазоре имеет место небольшая суммарная намагничивающая сила, и в целом машину можно считать ненасыщенной. При этом переходное сопротивление по сути характеризует магнитное сопротивление суммарному магнитному потоку, который вытесняется к полюсным наконечникам машины. Магнитное сопротивление растет, индуктивное падает. В последующие моменты КЗ поток реакции статора начинает проявляться и результирующий поток обмотки возбуждения начинает замыкаться в большей степени по магнитопроводу ротора. Магнитное сопротивление снижается, индуктивное растет. Кроме пути замыкания потоков на величину индуктивного сопротивления оказывает влияние магнитная проницаемость стали, которая снижается при больших токах короткого замыкания как у статора, так и у ротора. Как показали эксперименты [2], отношение насыщенных к ненасыщенным величинам переходных реактивных сопротивлений составляет 1:1,8. Таким образом, при точном исследовании длительных электромеханических процессов необходимо учитывать изменение индуктивного переходного сопротивления. Постоянная времени изменения данного сопротивления зависит от характеристик обмотки ротора и может быть определена по справочной литературе с учетом электрической удаленности.

При наличии демпферных обмоток или массивного ротора на начальное изменение периодического тока КЗ обмотки статора реагирует демпферная обмотка и режим считается сверхпереходным. В этом случае в практических расчетах КЗ генератора в схему замещения вводится неизменная сверхпереходная ЭДС за неизменным сверхпереходным сопротивлением. Фактически оба данных параметра будут изменяться. Так, изменение ЭДС будет обусловлено снижением суммарного магнитного потока из-за проявившейся реакции статора, сверхпереходное сопротивление по мере насыщения машины и изменения пути замыкания соответствующего магнитного потока также будет изменяться. Суммарный магнитный поток обмотки возбуж-

дения при наличии демпферной будет замыкаться изначально в воздушном зазоре и постепенно вытесняться в ротор. В связи с этим, согласно [2], сверхпереходное сопротивление насыщенного и ненасыщенного турбогенератора составляет 1:2. Постоянная времени, соответствующая затуханию сверхпереходного тока, также зависит от электрической удаленности КЗ и может быть скорректирована при расчете режима.

Синхронное индуктивное сопротивление синхронного генератора также зависит от степени насыщения магнитопроводов и изменяется при длительном переходном процессе. Поскольку данное сопротивление определяется потоками рассеяния и реакции статора, то снижение магнитной проницаемости стали сердечника при протекании больших токов статора приводит к снижению сопротивления реакции статора и, следовательно, к снижению синхронного индуктивного сопротивления в ненасыщенном состоянии машины, таком как длительное КЗ. Из справочной литературы данное сопротивление можно определить как величину, обратную ОКЗ. Постоянная времени затухания синхронного индуктивного сопротивления может быть принята аналогичной переходной ЭДС, учитывающей скорость проявления реакции статора.

Электрическая удаленность в общем случае может быть определена из расчета сверхпереходного режима. В данной работе расчет сверхпереходного режима сложноразомкнутой сети ведется методом последовательного эквивалентирования. Причем действие АРВ может быть учтено по ходу расчета переходного процесса с коррекцией на каждом шаге, так как при этом изменяется напряжение на выводах обмотки статора, определяющее согласно [2] насыщение машины. Более грубо действие АРВ может быть учтено при расчете установившегося режима КЗ.

Особый интерес представляет режим отключения КЗ и переход синхронного генератора в послеаварийный режим. В этом случае в первый момент отключения возможно различное положение ротора относительно вращающегося магнитного поля статора, то есть повторное включение может быть несинхронным. Причем при угле ротора, близком к 180 эл. град, токи в обмотках статора могут превышать токи КЗ. Поэтому в таком режиме сначала также задействуется демпферная обмотка, то есть переходный процесс следует рассматривать как сверхпереходный, затем токи в демпферной обмотке затухают, суммарный магнитный поток обуславливается взаимодействием потоков реакции статора и обмотки возбуждения с учетом АРВ.

РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «КАТРАН»

Реализация данной математической модели предполагается в программном комплексе «КАТРАН». При этом для расчета установившихся и начальных сверхпереходных режимов, а также для расчета промежуточного режима на каждом шаге используют метод последовательного эквивалентирования. Расчет переходного режима предполагается осуществлять методом последовательных интервалов, причем возможен любой из методов численного интегрирования. При таком подходе появляется возможность оценки электрической удаленности КЗ и действия АРВ.

Объектом исследования является турбогенератор ТВС-32-УЗ, мощность которого характерна для заводских теплоэлектроцентралей. Для данной машины было осуществлено построение семейств графиков для по алгоритму, описанному в блок-схеме (рис. 1). На рис. 1 приведены следующие обозначения: ОКЗ – отношение короткого замыкания, о.н.е.; x_d, x'_d, x''_d – синхронное индуктивное, переходное и сверхпереходное сопротивления, о.н.е.; T'_{d0}, T''_{d0} – постоянные времени синхронной машины при разомкнутой обмотке статора при наличии и отсутствии демпферных контуров, с; T'_d, T''_d – переходная и сверхпереходная постоянные времени синхронной машины при замкнутой обмотке статора, с; T_a – постоянная времени обмотки статора, с; x – внешнее сопротивление от генератора до точки короткого замыкания; X_d, x', x'' – текущие значения синхронного индуктивного, переходного и сверхпереходного сопротивлений в режиме КЗ, о.н.е.; $X_{d\text{откл}}, x'_{\text{откл}}, x''_{\text{откл}}$ – текущие значения синхронного индуктивного, переходного и сверхпереходного сопротивлений после отключения КЗ, о.н.е.; $x_{d\text{ненас}}, x'_{d\text{ненас}}, x''_{d\text{ненас}}$ – значения синхронного индуктивного, переходного и сверхпереходного сопротивлений в установившемся режиме КЗ, о.н.е.

В качестве исходных данных задаются технические характеристики генератора. Далее для построения характерных кривых задаются внешние индуктивные сопротивления x , характеризующие электрическую удаленность точки КЗ. Для вышеуказанного генератора при выбранной длительности КЗ и различной его удаленности были определены зависимости переходного, сверхпереходного и индуктивного сопротивления во времени. Так, при трехфазном КЗ на выводах синхронного генератора индуктивное сопротивление изменяется согласно кривым, приведенным на рис. 2. При учете внешнего сопротивления, в 2 раза превышающего номинальное сопротивление машины, кривые примут вид, показанный на рис. 3.

Данный алгоритм был использован при разработке программного комплекса «КАТРАН», предназначенного для анализа установившихся режимов и переходных электромагнитных и электромеханических процессов. Исследование переходных режимов при учете и неучете насыщения производили на примере турбогенератора номинальной мощностью 12 МВт. Исследовали режим трехфазного КЗ длительностью 0,5 с и последующим отключением. Изменение действующих значений токов статора приведено на рис. 4, 5. Знак тока статора принят в зависимости от направления активной мощности генератора.

В режиме КЗ за счет изменения пути магнитного сопротивления суммарному магнитному потоку индуктивное сопротивление растет и после отключения КЗ генератор подключается к сети с большими переходным и сверхпереходным сопротивлениями. Следовательно, скачек тока при ресинхронизации снижается. Таким образом, учет насыщения при расчете длительных электромеханических процессов позволяет более точно оценить режимы и разработать мероприятия по обеспечению динамической устойчивости синхронных генераторов.

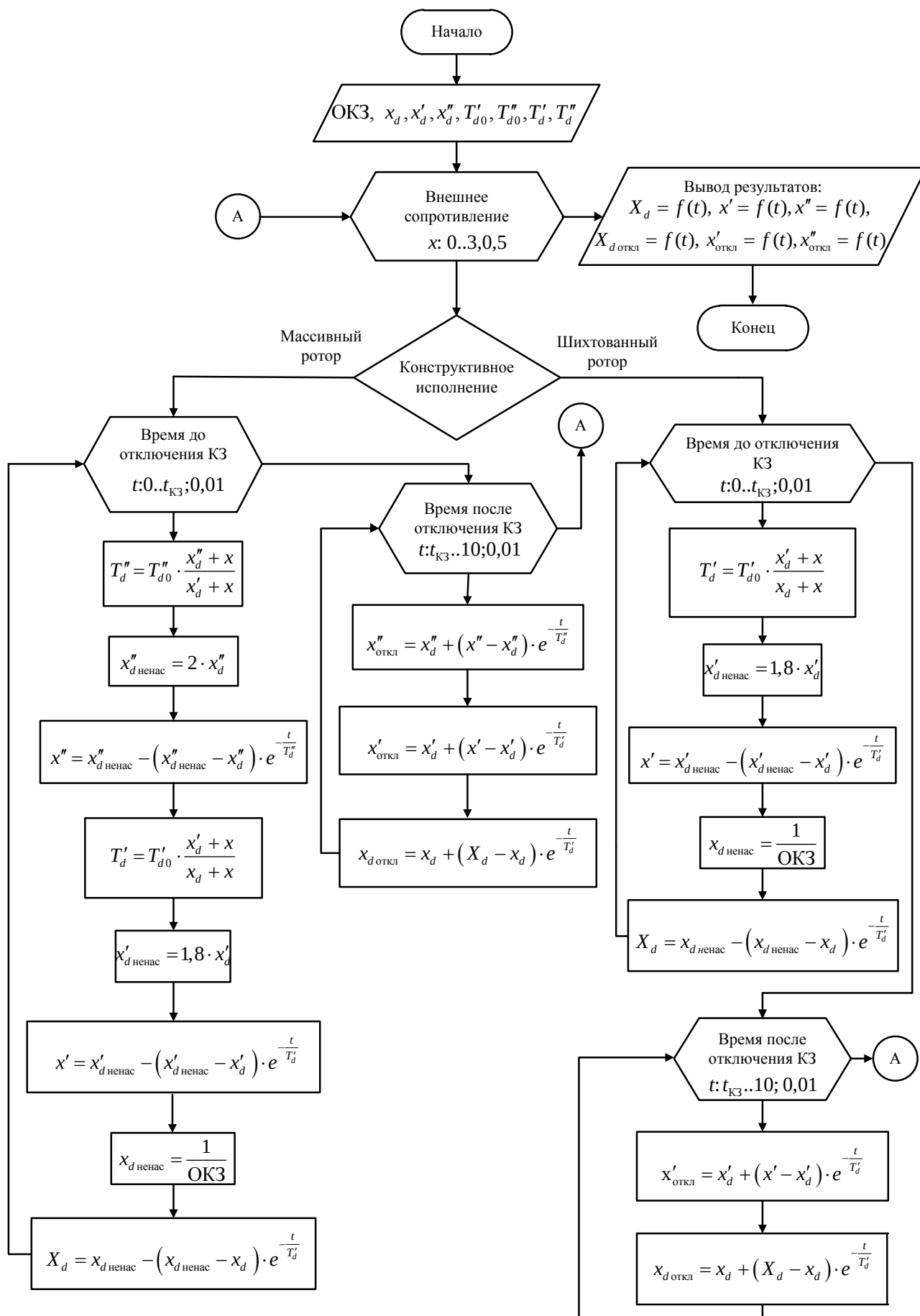


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета сопротивлений

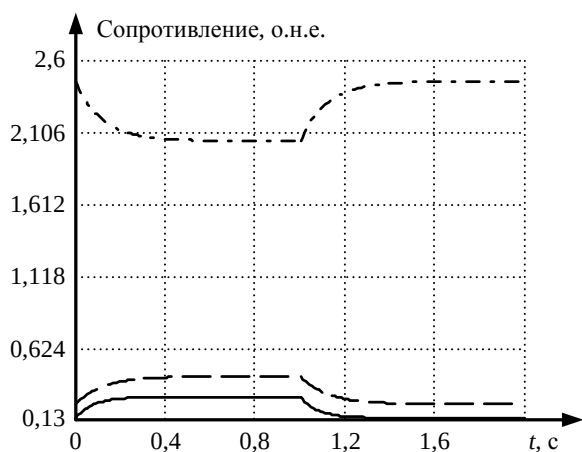


Рис. 2. Изменение сопротивлений во времени при КЗ на выводах генератора

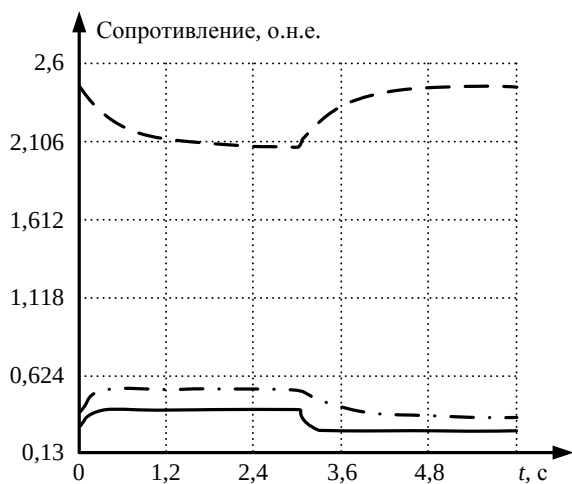


Рис. 3. Изменение сопротивлений во времени при электрически удаленном КЗ

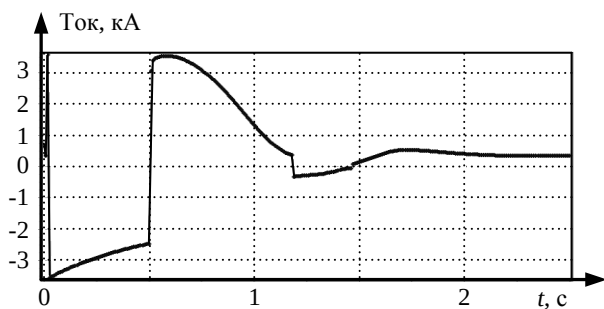


Рис. 4. Зависимость тока статора от времени без учета насыщения

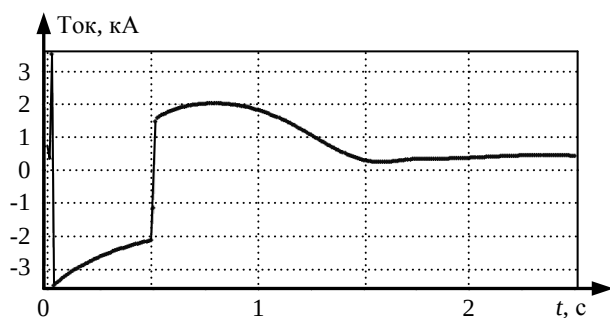


Рис. 5. Зависимость тока статора от времени с учетом насыщения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при исследовании длительных электромеханических переходных процессов в промышленных системах электроснабжения сложной конфигурации для повышения точности полученных результатов необходим учет насыщения и его влияния на все три сопротивления синхронного генератора: синхронное, переходное и сверхпереходное.

Нормальный режим работы синхронного генератора близок к насыщенному, поэтому все величины в справочной литературе приводятся для насыщенного состояния. Режим короткого замыкания является ненасыщенным, что приводит к изменению величин указанных сопротивлений более чем на 30%.

Программный комплекс «КАТРАН» позволяет учесть насыщение при расчете переходных режимов с учетом удаленности точки короткого замыкания и тем самым повысить точность вычислений. Результаты расчета могут быть использованы при прогнозировании аварийных и послеаварийных режимов сложных промышленных систем электроснабжения, имеющих в своем составе синхронные генераторы, электрически удаленные относительно друг друга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вопросы устойчивости энергетических систем / П.С. Жданов; под ред. Л.А. Жукова. М.: Энергия, 1979. 456 с.
2. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
3. Адкинс Б. Общая теория электрических машин. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 272 с.
4. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М.; Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. 625 с.
5. Кимбарк Э. Синхронные машины и устойчивость электрических систем. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 392 с.
6. Power System Engineering / D.P. Kothari, I.J. Nagrath. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
7. Research on Measures to Improve Stability of the Power System / Shi Xiufeng, Mu Shiguang. Applied Mechanics and Materials, vol. 742 (2015), pp. 648-652.
8. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables / D. Hazarika. IET Generation, Transmission & Distribution. Oct 2012, vol. 6, iss. 10, pp. 977-985.
9. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN / A. Satheesh, T. Manigandan // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 10th March 2013, vol. 49, iss. 1, pp. 38-47.
10. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique / Mohamed Boudour, Abdelhafid Hellal // The Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 30, no. 1B.
11. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator / D. Harikrishna, N.V. Srikanth // TELKOMNIKA. vol. 10, no.1, March 2012, pp. 9-16.
12. Transient Stability Enhancement of Tneb 400 kV Transmission Network with SVC / Er.S. Sujatha, Dr.R. Anitha, Dr.P. Selvan, Er.S. Selvakumar // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 10th May 2014, vol. 63, iss. 1, pp. 85-91.
13. Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system / Rui Zhang, Yan Xu, Zhao Yang Dong, Kit Po Wong // The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib., 2015, vol. 9, iss. 3, pp. 296-305.

14. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems / Yosra Welhazi, Tawfik Guesmi, Imen Ben Jaoued, Hsan Hadj Abdallah // *Electrical Systems* 10-3 (2014): 276-291.
15. Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization / Hirofumi Akagi, Kenji Takahashi, Toshiaki Kobayashi, Hiroaki Sugihara, Takaaki Kai // *Electrical Engineering in Japan*, vol. 133, no. 1, 2000.
16. Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Исследование динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями при отделении от энергосистемы в результате короткого замыкания // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2008. № 17 (117). С. 72-74.
17. Ачитаев А.А., Удалов С.Н., Юманов М.С. Повышение запаса регулировочной способности генераторов в энергетических системах с распределенной генерацией // *Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. тр. VII Междунар. научной конференции молодых ученых; Новосибирский государственный технический университет, Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области*. 2015. С. 8-10.
18. Анализ переходных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий, имеющих в своем составе объекты малой энергетики / О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова, В.М. Тарасов // *Промышленная энергетика*. 2010. № 4. С. 22-28.
19. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability / Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malafeyev A.V. // *Procedia Engineering*. 2015. T. 128. С. 759-763.
20. Определение асинхронной мощности синхронных генераторов в расчетах электромеханических переходных процессов при несимметричных режимах / Буланова О.В., Малафеев А.В., Николаев Н.А., Ротанова Ю.Н., Панова Е.А. // *Электрика*. 2010. № 8. С. 24-26.
21. Удалов С.Н., Ачитаев А.А., Юманов М.С. Исследование режимов работы ветроэнергетической установки на базе электромагнитной трансмиссии в составе автономной системы электроснабжения // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2015. № 5. С. 32-35.
22. Construction and Design Features of Permanent Magnet electric Motors for General Industrial Purposes / Shevchenko A.F., Pristup A.G., Novokreshchenov O.I., Toporkov D.M., Korneev V.V. // *Russian Electrical Engineering*. 2014. T. 85. № 12. С. 748-751.
23. Комплексная оценка эффективности токовых и дистанционных защит в сетях 110-220 кВ в условиях магнитогорского энергетического узла / Б.И. Заславец, В.А. Игumenцев, Н.А. Николаев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова, Е.А. Панова // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2011. № 15. С. 14-21.
24. Оценка эффективности релейной защиты в сетях 110-220 кВ сложных систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / Игumenцев В.А., Заславец Б.И., Николаев Н.А., Малафеев А.В., Буланова О.В., Кондрашова Ю.Н., Панова Е.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 141 с.
25. Оценка регулирующего эффекта выпрямительной нагрузки для определения параметров установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.А. Николаев, О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова, В.М. Тарасов // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2011. № 4. С. 115-118.
26. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management / Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Сер. «International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015». 2016. С. 012056.
27. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models / Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. // *Procedia Engineering*. 2015. T. 129. С. 951-955.
28. Газизова О.В., Абдулхаликова А.А. Исследование пропускной способности питающих линий электропередачи крупного промышленного энергетического узла // *Электротехнические системы и комплексы*. 2014. № 2 (23). С. 48-52.
29. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization / Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. // *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. 2015.
30. Methodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems / Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. // *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS*. 2014. С. 1-6.

Поступила в редакцию 15 декабря 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SATURATION IN THE MATHEMATICAL MODEL INDUSTRIAL GENERATOR FOR CALCULATION OF TRANSITION MODE IN THE POWER COMPLEX CONFIGURATION

Olga V. Gazizova

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Power Engineering and Automated Systems Institute, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Alexandr P. Sokolov

Student, Power Engineering and Automated Systems Institute, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Alexey V. Malafeyev

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Power Engineering and Automated Systems Institute, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

In the analysis of transient electromechanical and electromagnetic transients one of the most important things is the selection of the synchronous generator with adequate mathematical model. In general, the modeling approaches are divided into two types. For a detailed analysis of the auto-matic generator control system, the research group created a detailed mathematical model that takes into account all the control circuits, their characteristics and physical properties of the machine. However, this approach is justified for the detailed study of a single machine. In the analysis of complex industrial systems modes excessive detailed description of processes sometimes has no significance for the study network modes but significantly complicates the simulation process and increases the duration of the calculation. In order to analyze the long transient processes in the electromechanical generator, it is recommended to set simplistic transitional constant values. However, this approach can lead to calculation errors. One reason for this is the change in internal resistance of the generator because the change of currents and voltages cause a change in the saturation level of the machine including its individual parts. Thus, when calculating the electromechanical and electromagnetic processes synchronous generator, we should take into account the external characteristics of the excitation controller and velocity with the corresponding time constants but also the change of contact resistances affecting the currents in emergency and after emergency mode, and also the magnitude of rotating electromagnetic moments determining the balance of power on the shaft. Accounting for changes in excess transient, transient and synchronous inductive resistance in view of the machine in saturation mode, short circuit is expected to make in the development of software system to calculate and analyze transient electromechanical modes. Calculations have shown that taking into account the transient changes in resistance has a significant effect on the currents at the moment fault current generator and synchronization with the network. The developed mathematical model makes it possible to correctly detect the currents during long short circuits and disconnections in a complex configuration networks.

Keywords: contact resistance, industrial synchronous generator, short-circuit, transient electromechanical mode, software, automatic excitation regulator, saturation of the synchronous machine, electric remoteness, mathematical model.

REFERENCES

1. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti energeticheskikh system* [Questions of stability of power systems]. Ed. L.A. Zhukov. Moscow: Energy, 1979. 456 p. (In Russian)
2. Kovach K.P., Raz J. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transients in AC machines]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. 744 p. (In Russian)
3. Adkins B. *Obschaya teoriya elektricheskikh mashin* [Overall theory of electrical machines]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. 272 p. (In Russian)
4. Kazovsky E.Y. *Perekhodnye protsessy v elektricheskikh mashinakh peremennogo toka* [Transients in electric machines AC]. Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1962. 625 p. (In Russian)
5. Kimbark E. *Sinkhronnye mashiny i ustoychivost elektricheskikh system* [Synchronous machines and stability of electrical systems]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. 392 p. (In Russian)
6. Kothari D.P., Nagrath I.J. *Power System*. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
7. Xiufeng Shi, Shiguang Mu. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 742 (2015), pp. 648-652.
8. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables. *IET Generation, Transmis-*

- sion & Distribution. Oct 2012, vol. 6, iss. 10, pp. 977-985.
9. Satheesh A., Manigandan T. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 10th March 2013, vol. 49, iss. 1, pp. 38-47.
10. Boudour Mohamed, Hellal Abdelhafid. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 30, no. 1B.
11. Harikrishna D., Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator. *TELKOMNIKA*, vol. 10, no. 1, March 2012, pp. 9-16.
12. Sujatha Er.S., Anitha Dr.R., Selvan Dr.P., Selvakumar Er.S. Transient Stability Enhancement of Tneb 400 kV Transmission Network with SVC. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 10th May 2014, vol. 63, iss. 1, pp. 85-91.
13. Zhang Rui, Xu Yan, Dong Zhao Yang, Wong Kit Po. Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system. *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, vol. 9, iss. 3, pp. 296-305.
14. Welhazi Yosra, Guesmi Tawfik, Jaoued Imen Ben, Abdallah Hsan Hadj. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. *J. Electrical Systems* 10-3 (2014): pp. 276-291.
15. Akagi Hirofumi, Takahashi Kenji, Kobayashi Toshiaki, Sugihara Hiroaki, Kai Takaaki. Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization. *Electrical Engineering in Japan*, vol. 133, no. 1, 2000.
16. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Research of dynamical stability of industrial power systems with own power stations at separation from the electric system in the result of short-circuit failure. *Vestnik Yuzno-uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics"]. 2008, no. 17 (117), pp. 72-74. (In Russian)
17. Achitayev A.A., Udalov S.N., Yumanov M.S. Increase of an inventory of adjusting ability of generators in power systems with distributed Generation. *Elektrotehnika. Elektrotekhnologiya. Energetika. Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh* [Electrical engineering. Electrotechnology. Power engineering collection of scientific works of the VII International scientific conference of young scientists]. Novosibirsk State Technical University Interuniversity center of assistance of scientific and innovative activities of students and young scientists of the Novosibirsk region. 2015, pp. 8-10. (In Russian)
18. Bulanova O.V., Malafeev A.V., Rotanova Y.N., Tarasov V.M. Analysis of transient modes of power supply systems of industrial enterprises, having in its composition objects small energy. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power]. 2010, no. 4, pp. 22-28. (In Russian)
19. Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malapheev A.V. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 128, pp. 759-763.
20. Bulanova O.V., Malafeev A.V., Nicolayev N.A., Rotanova Yu.N., Panova E.A. Determination of asynchronous power of the synchronous generators in calculations of electromechanical transient phenomena in case of the asymmetrical modes. *Elektrika* [Electrician]. 2010, no. 8, pp. 24-26. (In Russian)
21. Udalov S.N., Achitayev A.A., Yumanov M.S. Research of operation modes of wind power installation on the basis of electromagnetic transmission as a part of autonomous system Electrical power supply. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost* [Electro.

- Electrical engineering, power industry, electrotechnical industry]. 2015, no. 5, pp. 32-35. (In Russian)
22. Shevchenko A.F., Pristup A.G., Novokreshchenov O.I., Toporkov D.M., Korneev V.V. Construction and Design Features of Permanent Magnet electric Motors for General Industrial Purposes. *Russian Electrical Engineering*. 2014, vol. 85, no. 12, pp. 748-751.
 23. Zaslavets B.I., Igumenshev V.A., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanov O.V., Rotanova Y.N., Panova E.A. Comprehensive evaluation of current and for the remote-shield networks 110-220 kV in terms of energy Magnitogorsk node. *Vestnik Yuzno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Energy]. 2011, no. 15, pp. 14-21. (In Russian)
 24. Igumenshev V.A., Zaslavets B.I., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanov O.V., Kondrashova Y.N., Panova E.A. *Otsenka effektivnosti releinoy zashchity v setyakh 110-220 kV slozhnykh sistem elektrosnabzheniya predpriyatiy s sobstvennymi elektrostantsiyami* [Evaluating the effectiveness of relaying networks 110-220 kV power complex systems of industrial enterprises with their own power plants]. Magnitogorsk, Magnitogorsk Publ. State. Tehn. University Press, 2011. 141 p. (In Russian)
 25. Nikolaev N.A., Bulanov O.V., Malafeev A.V., Kondrashova Y.N., Tarasov V.M. Qualification regulating rectification effect for load-defined division parameters established modes of power supply systems of industrial enterprises. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Proceedings of the higher educational institutions. Electromechanics]. 2011, no. 4, pp. 115-118. (In Russian)
 26. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Cep. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015". 2016, p. 012056.
 27. 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, vol. 129, pp. 951-955.
 28. Gazizova O.V., Abdulkhalikova A.A. Bandwidth transmission lines feeding study of a large industrial energy hub. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2014, no. 2 (23), pp. 48-52. (In Russian)
 29. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015.
 30. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. Methodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems. Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014, pp. 1-6.

Газизова О.В., Соколов А.П., Малафеев А.В. К вопросу учета насыщения в математической модели промышленного генератора для расчета переходных режимов в системе электроснабжения сложной конфигурации // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 1(38). С. 40-47. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-40-47](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-40-47)

Gazizova O.V., Sokolov A.P., Malafeyev A.V. Saturation in the Mathematical Model Industrial Generator for Calculation of Transition Mode in the Power Complex Configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 40-47. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-40-47](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-40-47)

ЛОКАЛИЗАЦИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРА СРЕДСТВАМИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Мониторинг технического состояния и определение мест возникновения неисправностей являются важнейшими задачами, обеспечивающими безаварийную работу технологических (печных) трансформаторов металлургических предприятий. Решение этих задач предопределяет актуальность внедрения диагностических систем и приборов, а также разработки способов и методик, обеспечивающих локализацию и идентификацию неисправностей. Показано, что решение этих задач наиболее эффективно обеспечивается средствами акустической локации частичных разрядов (ЧР) с последующим вычислением их интегральных характеристик. Разработан способ контроля состояния, включающий on-line мониторинг, осуществляемый стационарной системой, и периодическую акустическую локацию ЧР переносным прибором. Рассмотрен способ локализации неисправностей, основанный на определении координат разрядов в баке трансформатора и их математической обработке с использованием метода субтрактивной кластеризации. Приведен пример локализации конкретной неисправности трансформатора агрегата печь-ковш. Дано практическое подтверждение достоверности определения места ее возникновения. Даны рекомендации по обслуживанию трансформатора и дальнейшему применению полученных результатов.

Ключевые слова: печной трансформатор, техническое состояние, мониторинг, неисправность, локализация, способ, частичные разряды, акустическая локация, практическое применение, достоверность, подтверждение.

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывный контроль технического состояния печных трансформаторов является необходимым условием безаварийной работы ответственных металлургических агрегатов: дуговых сталеплавильных печей и агрегатов печь-ковш (АПК). В связи с этим оснащение трансформаторов данного класса системами on-line мониторинга является актуальной и остро востребованной задачей [1]. В 2013 и 2014 гг. на трансформаторах ЭТЦНКВ – 40000/110-УХЛ-4 АПК-1 и АПК-2 электросталеплавильного цеха Магнитогорского металлургического комбината (ММК) внедрены системы мониторинга технического состояния. Они разработаны коллективом Магнитогорского государственного технического университета совместно со специалистами ММК и компании «Димрус» (г. Пермь). Их подробное описание представлено в публикациях [2-5].

Внедренные системы интегрированы в цеховую компьютерную сеть и выполняют контроль технического состояния, а также отдельные диагностические функции. Они обеспечивают вывод информации о контролируемых параметрах, автоматическое формирование журнала учета неисправностей, оповещение о предаварийных ситуациях [6, 7]. Данные системы находятся в эксплуатации и доказали свою эффективность, благодаря своевременному предупреждению опасного развития дефектов. По информации от этих систем в 2015 г. осуществлен внеплановый ремонт обоих трансформаторов. Это потребовало определенных затрат, но позволило предотвратить аварии, следствием которых могли стать длительные простои агрегатов и значительно большие затраты на устранение последствий.

Своевременное предотвращение аварий подтверждает эффективность работы диагностических систем в режиме «индикаторов неисправностей». Однако общим недостатком всех известных систем мониторинга является то, что они не позволяют определить место возникновения и характер неисправности (локализовать и идентифицировать неисправность).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Опыт эксплуатации стационарных систем и применения переносных диагностических приборов показал, что единственным методом, который может обеспечить оперативную локализацию неисправностей трансформаторного оборудования без снятия напряжения, является метод акустической локации частичных разрядов. Появление ЧР вызвано тем, что полный пробой изоляции в условиях эксплуатации возникает не сразу. Как правило, ему предшествуют разряды, перекрывающие часть изоляционного промежутка, за что они и получили свое название. Увеличение интенсивности ЧР является сигналом зарождающейся неисправности, кроме того, сами ЧР вызывают разрушение изоляции. Такие разряды достигают контролируемого уровня уже на ранней стадии развития дефекта. Поэтому их возникновение и интенсивность являются важными диагностическими признаками, а метод контроля, основанный на регистрации ЧР, обладает высокой диагностической ценностью.

Дефекты, вызванные деструктивными процессами в изоляции (витковые замыкания, разрушение вследствие перегрева, механические повреждения и др.), имеют конкретное место возникновения в фазах обмоток либо высоковольтных вводах трансформатора. Они наиболее эффективно диагностируются путем регистрации интенсивности ЧР и оценки скорости ее увеличения. Главная проблема определения места возник-

новения неисправности связана со сложностью конструкции трансформатора и соответственно неоднородной средой, в которой распространяются ЧР.

Для количественной оценки интенсивности ЧР используются интегральные характеристики [8]:

1. *Кажущийся заряд* Q_{02} (нКл) – величина, количественно пропорциональная максимальной амплитуде импульса. Системы, эксплуатируемые на трансформаторах АПК ММК, настроены таким образом, что длительность импульса должна быть не более 640 нс при условии, что в течение последующих 2560 нс не должно быть импульсов амплитудой выше 30% первоначального импульса. В случае Графики мощностей ЧР в фазах А и В трансформатора АПК-2 если эти условия не выполняются, импульс считается помехой и не регистрируется. Импульсы ЧР считаются периодически повторяющимися, если частота их следования составляет 0,2 импульса за один период питающей сети. При использовании для регистрации ЧР практически всех известных приборов измеряется амплитуда, т.е. напряжение импульса U (мВ). Для определения кажущегося заряда используется зависимость $Q_{02}=10 \cdot U_{02}$, облегчающая настройку системы.

2. *Мощность ЧР*, ее чаще всего сводят к параметру PDI (*Partial Discharge Intensity*). Он характеризует мощность и интенсивность ЧР и определяется зависимостью

$$PDI = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m Q_i U_d,$$

где m – число регистрируемых импульсов за время наблюдения T ; U_d – действующее значение напряжения.

Наряду с фиксацией числовых параметров в системах on-line мониторинга формируются их временные зависимости (тренды). Это позволяет определить скорость развития и соответственно степень опасности неисправности. Примеры трендов характеристик ЧР, зафиксированные на трансформаторе АПК-2 в сентябре-декабре 2016 года, представлены на **рис. 1**. На графиках виден интенсивный рост разрядной активности во всех фазах в период после 15 декабря. Это говорит о развитии неисправности внутри трансформатора, однако место ее возникновения средствами установленной системы определить невозможно. Вследствие этого 23.12.2016 была произведена остановка агрегата пещков, после чего трансформатор был выведен в ремонт.

Приведенный пример подтверждает техническую эффективность применения регистрации ЧР для контроля текущего состояния объекта. При этом для локализации неисправности необходимо выделение в баке трансформатора зоны с повышенной разрядной активностью. Это требует применения приборов, фиксирующих пространственные координаты разрядов, и специальных методов их математической обработки.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Способ локации очагов ЧР

В результате проведенных исследований разработан способ контроля состояния и локализации неисправностей высоковольтного оборудования. Суть его заключается в комплексном применении on-line мониторинга технического состояния, осуществляемого стационарной системой, и периодической акустической локации ЧР с помощью переносных приборов.

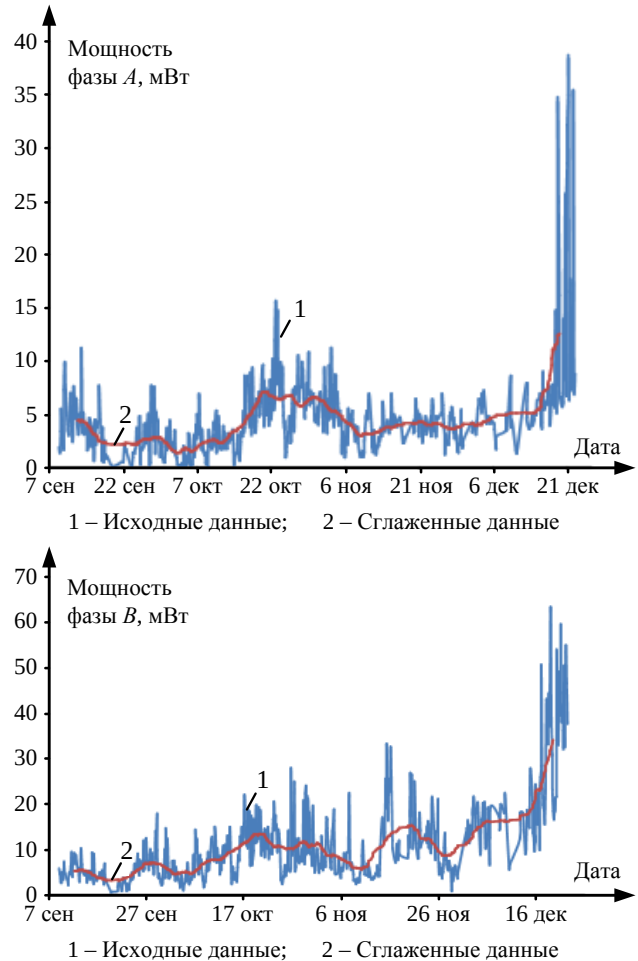


Рис. 1. Графики мощностей ЧР в фазах А и В трансформатора АПК-2

Способ локализации неисправностей поясняется с помощью временных диаграмм, представленных на **рис. 2, а** [9]. Выявление очага осуществляется по разнице времени поступления импульсов на каждый из четырех датчиков, установленных на фиксированном расстоянии друг от друга.

Данный принцип реализован в приборах акустической локации ЧР марки AR-700, выпускаемых компанией «Димрус». Прибор регистрирует и загружает в память компьютера пространственные координаты (x_i, y_i, z_i) каждого импульса, зафиксированного датчиками. Для математической обработки результатов периодических замеров в работах [10, 11] обосновано применение метода субтрактивной (горной) кластеризации. При этом в качестве элементов матрицы наблюдений предлагается использовать координаты каждого разряда.

Объемная схема, поясняющая локализацию участков с повышенной разрядной активностью, представлена на **рис. 2, б**. На ней условно показаны центры участков (кластеров) с высокой интенсивностью разрядных явлений. Анализ пространственного перемещения центров кластеров, а также динамики изменения их потенциалов позволяет дать оценку скорости развития неисправности.

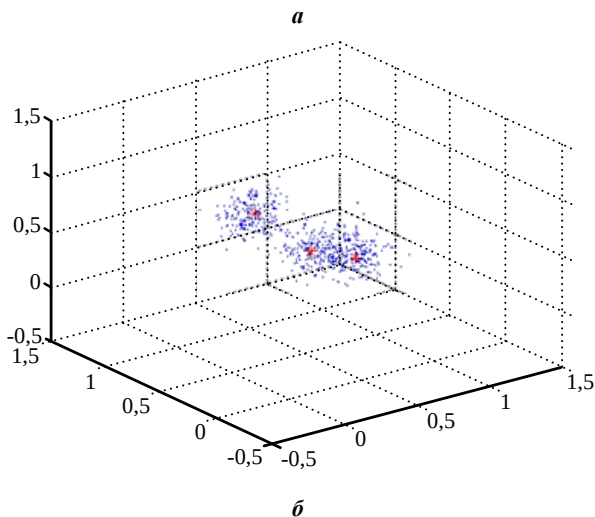
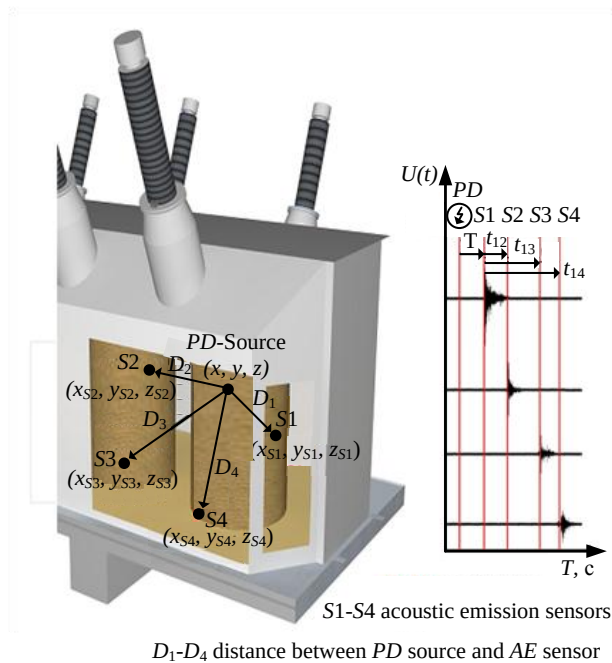


Рис. 2. Иллюстрация методов локализации источника ЧР и кластерного анализа (а) в трехмерных координатах (б)

Идентификацию неисправностей предложено осуществлять путем сопоставления центров кластеров с конструктивным расположением узлов трансформатора. Данный способ применен в разработанной универсальной системе мониторинга состояния силового трансформатора [12]. С помощью встроенного программного обеспечения обрабатывается информация об интенсивности, амплитудах, фазах и пространственных координатах импульсов ЧР. По результатам обработки определяются участки с наиболее высокой разрядной активностью. Поскольку частичные разряды являются признаками деструктивных процессов в изоляции, это позволяет определить место ее разрушения на ранней стадии.

Пример локализации неисправности

С целью определения места возникновения неисправности, развитие которой зафиксировано системой online мониторинга и представлено на рис. 1, проведены измерения активности ЧР. Замеры выполнялись с помощью прибора AR700, его вид представлен на рис. 3, а.



а



б

Рис. 3. Измерение ЧР прибором AR-700 (а – общий вид прибора; б – расположение акустических датчиков на поверхности бака)

Согласно методике проведения замеров, предварительно была обследована поверхность бака. В результате обнаружена зона повышенной разрядной активности, в районе которой установлены четыре акустических датчика. Датчики устанавливались по углам квадрата со стороной 300 мм с привязкой к «центру тяжести» трансформатора (рис. 3, б). В результате получены сигналы, пропорциональные амплитудам ЧР, и выполнено их спектральное разложение. На рис. 4, а представлены результаты замеров, проведенных 12.10.2016 (до обнаружения неисправности), полученные по одному измерительному каналу. Сигналы, поступающие с других акустических датчиков, имеют аналогичный характер. На рис. 4, б приведены аналогичные графики, зафиксированные после устранения неисправности.

При первоначальных обследованиях было обнаружено, что работающие маслососы системы охлаждения трансформатора приводят к сильному «зашумлению» сигналов, поступающих с датчиков (рис. 4, а). Поэтому последующие измерения (рис. 4, б) проводились при кратковременных отключениях маслососов.

Результаты обработки координат ЧР кластерным методом приведены в виде объемных изображений на рис. 5. С целью наглядности, в объемной зоне трансформатора выделен куб со стороной 1 м, что соответствует эффективной акустической локации. Для расчетов была использована скорость распространения звука в трансформаторном масле 1500 м/с. Были учтены координаты датчиков и разница во времени прихода импульсов. В результате получилось несколько вероятных очагов развития дефекта (центров кластеров), выделенных более темными точками внутри куба.

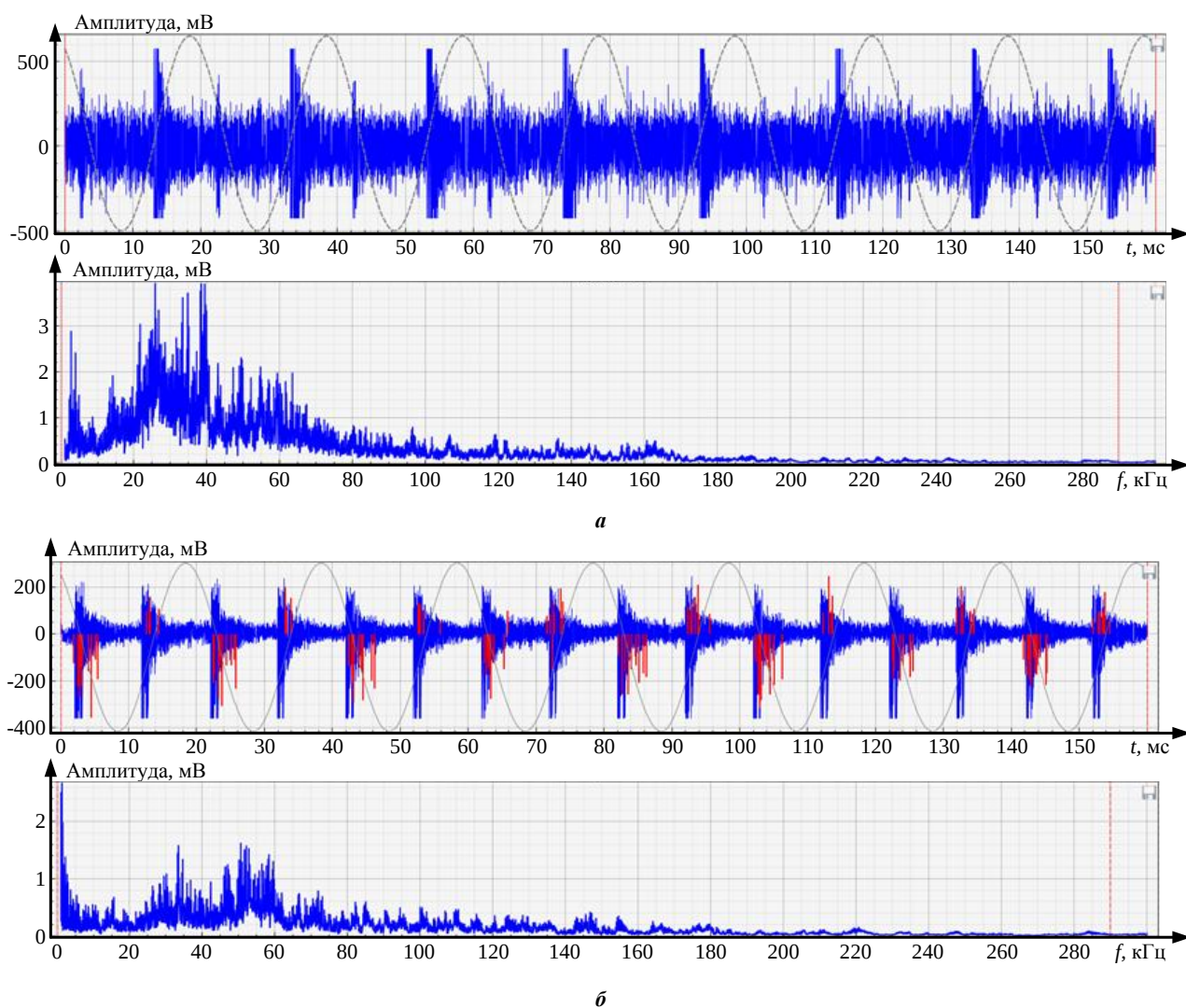


Рис. 4. Акустические сигналы с одного датчика и их спектральное разложение до (а) и после (б) устранения неисправности

После сопоставления центров кластеров с конструкцией трансформатора была обнаружена зона повышенной акустической активности в зоне фазы В высоковольтного ввода. Приблизительное место ее расположения находится на 360 мм правее и на 650 мм выше центра масс трансформатора (показано на рис. 5, а выносной линией). Ввиду сложной внутренней конструкции и большого числа отражений разрядов от внутренних поверхностей более точно определить глубину, на которой расположен поврежденный участок, не представляется возможным.

После частичной разборки трансформатора, проведенной в декабре 2016 г., был обнаружен дефект, показанный на рис. 6. Он связан с неправильным изгибом провода, соединяющего высоковольтный ввод с первичной обмоткой. В результате выводной конец фазы В обмотки высокого напряжения находился в непосредственной близости с острым углом пластины, приваренной к балке вольтодобавочного трансформатора. С учетом того, что разряды концентрируются на заостренных поверхностях, это оказалось наиболее вероятным местом возникновения разрядов. Именно этот дефект вызвал интенсивный рост ЧР, зафиксированный на рис. 1.

Анализ результатов

После устранения обнаруженной неисправности и ввода трансформатора в работу зафиксировано резкое снижение интенсивности ЧР во всех фазах. Это демонстрируют временные зависимости амплитуды и мощности ЧР в фазе В, представленные на рис. 7. Их сравнение с трендами на рис. 1 подтверждает достоверность выполненного диагностирования.

Для подтверждения результатов 27.01.2017 проведены повторные измерения ЧР в зоне, показанной на рис. 5, а. Графики акустических сигналов и их спектры приведены на рис. 4, б, результаты математической обработки – на рис. 5, б. Их анализ позволил сделать вывод: после проведенных ремонтных работ в зоне дефекта произошло значительное снижение разрядной активности. Усредненная мощность ЧР в фазе В снизилась в 2,5 раза.

Вместе с тем обнаружена зона повышенной разрядной активности, расположенная на 230 мм ниже места установки датчика №4 на глубине до 400 мм (см. рис. 5, б). Центр кластера обозначен точкой с выносной линией с указанием координат. Однако, как следует из графиков на рис. 7, уровень интенсивности ЧР и отсутствие их роста в данном случае не вызывают серьезных опасений. В результате были рекомендованы проведение учащенных обследований прибором AR-700 и постоянные наблюдения за показаниями стационарной системы.

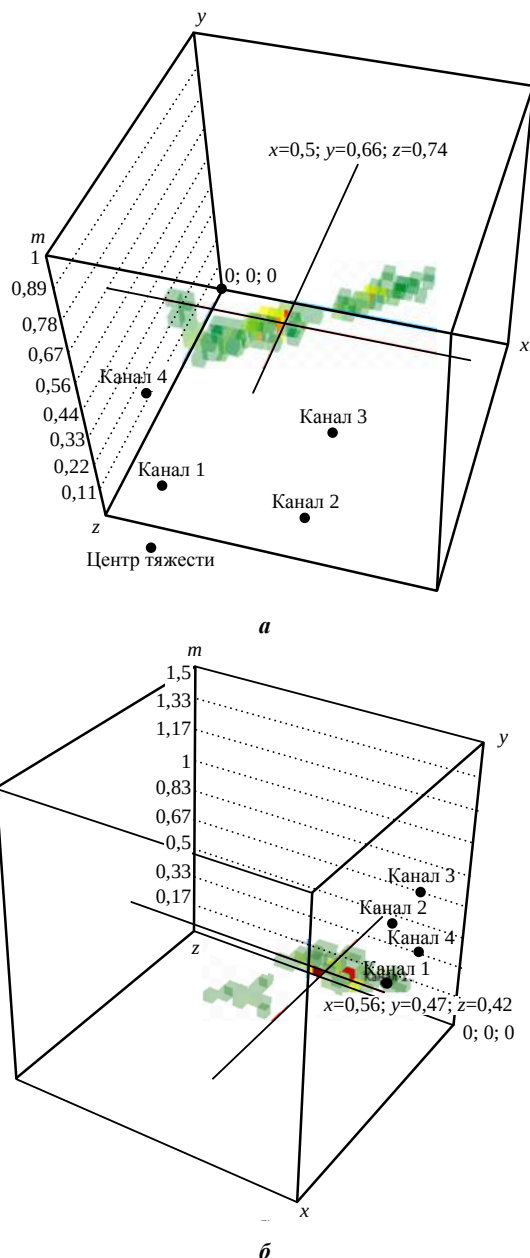


Рис. 5. Вероятные координаты источника дефекта до (а) и после (б) устранения неисправности



Рис. 6. Диагностированный «источник» повышенной разрядной активности

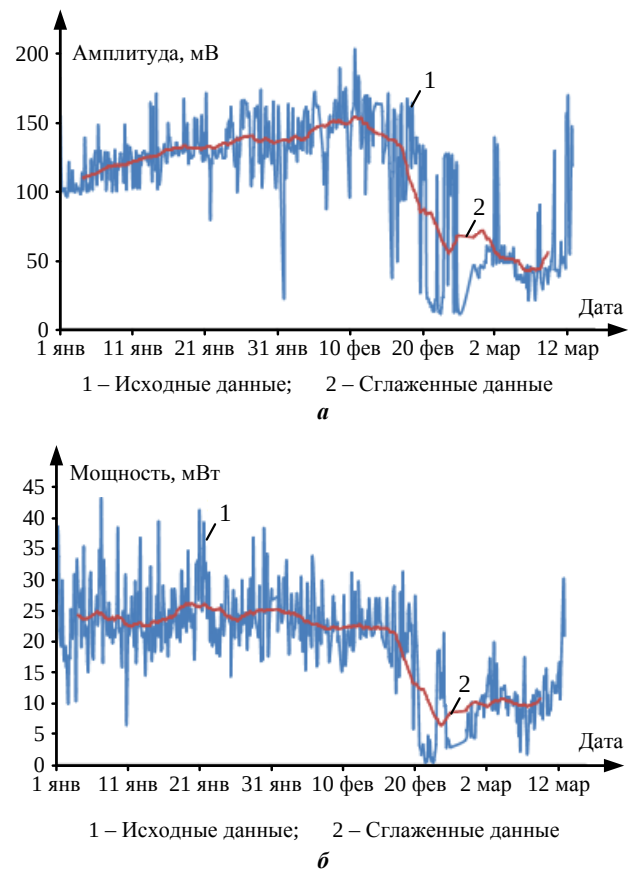


Рис. 7. Экспериментальные тренды амплитуды (а) и мощности (б) ЧР за период с 1.01.17 по 12.03.17

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтвердили эффективность разработанного способа контроля состояния и локализации неисправностей, включающего on-line мониторинг и периодическую акустическую локацию разрядной активности. При этом средствами on-line мониторинга оценивается общее состояние объекта и диагностируется возникновение неисправности. Проведение замеров переносным прибором и обработка сигналов с заданной периодичностью позволяют определить скорость развития дефекта и по смещению кластеров выполнить его идентификацию.

Несмотря на то, что в приведенном примере обнаружено несколько вероятных координат источника дефекта, зона повышенной акустической активности в баке трансформатора локализована достаточно точно. Для идентификации неисправности целесообразно сопоставление найденной зоны с чертежами либо объемным изображением трансформатора. При проведении планового технического обслуживания необходимо более внимательно обследовать указанную зону. Для определения тенденции развития дефектов обязательно постоянное наблюдение за разрядными явлениями в период последующей эксплуатации.

Общим недостатком приборов акустической локации ЧР является низкая «глубина» акустического контроля и соответственно низкая эффективность применения на крупногабаритных трансформаторах. Кроме того, эффективный контроль технического состояния с помощью переносных приборов затруднен отсутствием доступных инженерных методик диагностирования

состояния по совокупности признаков. Решение этих проблем должно стать предметом дальнейших исследований и разработок в принятом направлении.

Исследования выполнялись в рамках гранта МД-979.2017.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карандаева О.И. Характеристика повреждаемости сетевых и блочных трансформаторов ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2011. №4. С. 15-20.
2. Система диагностического мониторинга технического состояния трансформатора дуговой сталеплавильной печи / Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Храмшин В.Р., Сарлыбаев А.А. // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 4. С. 27-33.
3. Система оперативного контроля технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Храмшин В.Р., Сарлыбаев А.А. // Металлург. 2014. №10. С. 42-47.
4. Karandaev, A.S. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring / A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, V.R. Khrumshin, O.I. Karandaeva // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk. 2014. Vol. 1. P. 273-279. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040896
5. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V.R., Sarlybaev A.A. System for Real-Time Monitoring of the Technical State of a Transformer on an Ultrahigh-Power Electric-Arc Steelmaking Furnace. Metallurgist. Vol. 58. №9-10. 2014. P. 872-879. DOI: 10.1007/s11015-015-0010-z
6. Диагностические функции системы непрерывного контроля технического состояния трансформаторов агрегатов дуговых сталеплавильных печей / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмшин, Р.А. Леднов // Металлург. 2014. №8. С. 53-59.
7. Требования к системе мониторинга технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев, Р.А. Леднов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 58-68.
8. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. Екатеринбург: УрГУПС, 2011. 367 с.
9. Sikorski W., Walczak K. Power Transformer Diagnostics Based on Acoustic Emission Method. <http://dx.doi.org/10.5772/55211>
10. Radionov A.A., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Karandaeva O.I. Application of subtractive clustering for power transformer fault diagnostics. Procedia Engineering, 129, 2015, pp. 22-28. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.003
11. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, О.И. Карандаева, С.Е. Мостовой, А.А. Чертоусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». Вып. 10. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. № 26(126). С. 26-31.
12. Пат. 2615790 РФ, МПК H02H 7/04. Устройство для мониторинга силовых трансформаторов / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмшин, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев, А.А. Николаев. Опубл. 11.04.2017. Бюл. №11.

Поступила в редакцию 09 января 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

TRANSFORMER FAULT LOCATION BY MEANS OF PARTIAL DISCHARGES ACOUSTIC RADAR

Andrey A. Nikolaev

Supervisor of high voltage overhead network section, Power supply department, PJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works», Magnitogorsk, Russia. E-mail: nikolaev.ana@mmk.ru

Ekaterina A. Khrumshina

Research officer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Artemii A. Nikolaev

Postgraduate Student, Power Engineering and Automated Systems Institute, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Monitoring of the technical state and the location of failures are the urgent tasks providing failure-free operation of furnace transformers of metallurgical plants. Solution of these problems predetermines the urgency of introducing diagnostic systems and test instruments as well as development of ways and methods providing localization and identification of faults. It was shown that the most efficient solution of these problems is provided by mean of acoustic finding of partial discharges and further calculation of their integral characteristics. A new method of state control was developed, which includes on-line monitoring carried out by a stationary system and a periodic acoustic finding of partial discharges by a portable instrument. The research group considered a method of failure localization based on the defining of discharge coordinates in the transformer tank and their mathematical processing using the subtractive clustering method. The article offers an example of a certain failure localization of the ladle furnace transformer. It was confirmed that localization of the failure was quite valid. The authors offer their recommendations on maintenance of the transformer and further application of the obtained results.

Keywords: furnace transformer, technical state, monitoring, failure, localization, method, partial discharges, acoustic radar, practical application, validity, confirmation.

REFERENCES

1. Karandaeva O.I. Damage rate characteristic of network and main transformers of the OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works". *Vestnik Yuzno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South-Ural state university. Series: Power engineering]. 2011, no. 4, pp. 15-20. (In Russian)
2. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V.R., Sarlybaev A.A. System of diagnostic monitoring of the technical state of the arc steel-making furnace transformer. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost* [Electro. Electrical engineering, power engineering, electrical engineering industry]. 2014, no. 4, pp. 27-33. (In Russian)
3. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V.R., Sarlybaev A.A. The system of on-line control of the tech-

- nical state of the transformer of an ultra-high power arc steel-making furnace. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, no. 10, pp. 42-47. (In Russian)
4. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Karandaeva O.I. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring. 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 273-279. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040896.
 5. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Sarlybaev A.A. System for Real-Time Monitoring of the Technical State of a Transformer on an Ultrahigh-Power Electric-Arc Steelmaking Furnace. *Metallurgist*, vol. 58, no. 9-10, 2014, pp. 872-879. DOI: 10.1007/s11015-015-0010-z
 6. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Lednov R.A. Diagnostic functions of on-line control of the technical state of transformers of arc steel-making furnaces. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, no. 8, pp. 53-59. (In Russian)
 7. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Lednov R.A. Requirements to the system of technical state monitoring of the transformer of an ultra-high power arc steel making furnace. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Machine-building: network electronic scientific journal]. 2013, no. 2, pp. 58-68. (In Russian)
 8. Rusov V.A. *Izmerenie chastichnykh razryadov v izolyarsii vysokovoltного oborudovaniya* [Measuring of partial discharges in isolation of high-voltage equipment]. Yekaterinburg, UrGUPS, 2011. 367 p. (In Russian)
 9. Sikorski W., Walczak K. Power Transformer Diagnostics Based on Acoustic Emission Method. <http://dx.doi.org/10.5772/55211>
 10. Radionov A.A., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Karandaeva O.I. Application of subtractive clustering for power transformer fault diagnostics. *Procedia Engineering*, 129, 2015, pp. 22-28. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.003
 11. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Karandaeva O.I., Mostovoy S.E., Chernousov A.A. Control of the technical state of power transformers using the method of acoustic diagnostics. *Vestnik Yuzhnouralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika"* [Bulletin of the South-Ural state university. Series "Power engineering"]. Issue 10. Chelyabinsk: Publishing center of YuUGU, 2008, no. 26(126), pp. 26-31. (In Russian)
 12. Khramshin V.P., Karandaev A.S., Khramshin R.R., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Nikolaev A.A. *Ustroystvo dlya monitoring silovykh transformatorov* [A device for power transformer monitoring]. Patent RF no. 2615790, 2017.

Николаев А.А., Храмшина Е.А., Николаев А.А. Локализация неисправностей трансформатора средствами акустической локации частичных разрядов // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 48-54. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-48-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-48-54)

Nikolaev A.A., Khramshina E.A., Nikolaev A.A. Transformer Fault Location by Means of Partial Discharges Acoustic Radar. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 48-54. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-48-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-48-54)

Ячиков И.М., Ларина Т.П., ВострокнUTOва О.Н.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПОЛОЖЕНИЯ ТЕЛА ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ В КОНИЧЕСКОМ ИНДУКТОРЕ С ПРОТИВОВИТКОМ

В последнее время, с появлением дешевых высокочастотных источников питания мощностью до 4 кВт, возрос интерес к левитационному нагреву и плавке небольших образцов для получения чистого металла и прецизионных сплавов. Для устойчивой левитационной плавки конструкция катушки индуктора должна иметь специальную форму. Одним из возможных вариантов устойчивой левитационной плавки является использование конструкции в виде конического индуктора с противовитком – как одной из самых простых, но достаточно эффективных. В работе предложена математическая модель для определения амплитуды напряженности магнитного поля и положения металлического тела при его удержании во взвешенном состоянии в коническом индукторе с обратным витком. Проанализировано поведение вертикальной и радиальной составляющих вектора напряженности магнитного поля по радиусу индуктора. Установлено, что при увеличении угла конусности индуктора при фиксированном радиусе его основания, максимальные и минимальные значения поля на оси индуктора снижаются, при этом максимум поля смещается в сторону нижнего торца индуктора, а минимум – в сторону верхнего торца. Проведено компьютерное моделирование возможных точек равновесия цилиндрического тела в магнитном поле индуктора. Показана простая методика для инженерного расчета, позволяющая определить, удержит ли поле индуктора тело с заданными размерами из выбранного металла, положение тела при его равновесии с заданными параметрами индуктора, ток через индуктор, при котором возможно равновесие, и с какой максимальной плотностью и размерами металлическое тело в индукторе будет находиться во взвешенном состоянии.

Ключевые слова: левитационная плавка, высокочастотный конический индуктор с противовитком, напряженность магнитного поля, взвешенное состояние металла, электромагнитная сила, устойчивое равновесие.

ВВЕДЕНИЕ

Для получения очень чистого металла и прецизионных сплавов редких металлов нужно, чтобы они в процессе нагрева и плавления не взаимодействовали со стенками тигля и атмосферой. Для этого существует оригинальный метод плавления во взвешенном состоянии или левитационная плавка в инертной атмосфере или в вакууме [1].

Левитационная плавка – это плавление при помощи индукционного нагрева небольших образцов металла во взвешенном состоянии. При температурах ниже точки Кюри для ферромагнетиков образец удерживается за счет взаимодействия магнитного поля катушки и магнитных полей магнитных доменов. При температуре выше точки Кюри индукционные токи, воздействуя на металл, не дают ему упасть и могут нагревать его вплоть до температуры 1200°C [2, 3].

Взаимодействие высокочастотного магнитного поля с металлом приводит к возникновению в последнем вихревых токов, которые вытесняют поле из занимаемого металлом пространства, или, иными словами, поле внутри металла ослабляется вихревыми токами. Вследствие этого в переменном магнитном поле неферромагнитный проводник ведет себя подобно диамагнетику в постоянном. Благодаря силовому взаимодействию вихревых токов и поля металл выталкивается из зоны с большей плотностью поля в область с меньшей плотностью, то есть в потенциальную яму. Если указанные силы достаточно велики, то металл может быть поднят вверх несмотря на действие сил тяжести и удержан в пространстве во взвешенном состоянии [4].

Таким образом, для того чтобы кусок металла, непрозрачный для электромагнитного поля данной частоты, находился во взвешенном состоянии, нужно иметь поле определенной напряженности и конфигурации. Конфигурация поля задается конструкцией индуктора. Необходимая напряженность магнитного поля создается током через индуктор, который, в свою очередь, возникает за счет подключения к генератору, обеспечивающему подвод мощности соответствующей величины [5, 6].

Для устойчивой левитационной плавки конструкция катушки индуктора должна иметь специальную форму. В простейшем случае индуктор содержит несколько витков в прямом направлении и один – в обратном (противовиток). Это нужно для того, чтобы внутри индуктора была область, в которой поле меньше, чем вокруг нее. Проводник, помещенный в переменное электромагнитное поле, выталкивается в область меньших полей. Поэтому без области с минимальным полем положение образца внутри индуктора будет неустойчивым.

Одним из простейших вариантов устойчивой левитационной плавки является использование конструкции индуктора, выполненного из медной трубки и содержащего несколько витков в прямом направлении и один – в обратном (противовиток) [7, 8].

В теории и практике использования левитационной плавки остаются нерешенными ряд проблем. Нет практических критериев и рекомендаций по вопросам: будет ли наблюдаться взвешенное состояние при данной конструкции индуктора, параметрах источника питания, размерах и свойствах обрабатываемого материала? Мало работ, посвященных простым инженерным методикам, позволяющим прогнозировать положения тела и характер его движения во взвешенном состоянии.

В литературе довольно много работ, посвященных практическим результатам; например, в работе [9] приведен сравнительный анализ работы индукторов с квадратной и конической формой контура. Есть и работы по моделированию электромагнитных и тепловых процессов, протекающих при левитационной плавке металлов [10]. В работах [11, 12] предложена математическая модель для определения амплитуды напряженности магнитного поля и положения куска металла при его удержании во взвешенном состоянии в цилиндрическом индукторе обратным витком. Там же посредством моделирования с использованием компьютерной программы [13] было установлено, что критическая плотность материала, выше которой индуктор, имеющий включенный последовательно с основной катушкой противовиток с заданным током, не может удержать металлическое тело данной формы.

В работе [14] приведены экспериментальные и компьютерные результаты исследования положения точек равновесия цилиндрического тела в цилиндрическом индукторе с противовитком и приведено их сравнение с компьютерными исследованиями. В частности, установлено, что положение равновесия металлического тела во взвешенном состоянии в индукторе зависит от его конструкции (от количества витков, от расстояния между витками, от положения обратного витка и др.), от протекающего через индуктор тока, от формы и размеров тела.

В последнее время, с появлением дешевых высокочастотных источников питания мощностью до 4 кВт, возрос интерес к левитационному нагреву и плавке небольших образцов металлов. При этом чаще всего в качестве индуктора используется конструкция конического индуктора с противовитком – как одна из самых простых, но достаточно эффективных.

Целью данной работы является разработка упрощенной методики расчета поведения магнитного поля в высокочастотном коническом индукторе с обратным витком и нахождение положения проводящего тела во взвешенном состоянии при заданных его характеристиках и технологических параметрах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ КОНИЧЕСКОГО ИНДУКТОРА С ПРОТИВОВИТКОМ

Рассмотрим конический индуктор в виде винтовой линии, содержащий n витков, высотой h с диаметром основания $d=2R_0$, диаметром раскрытия $D=2R$. Угол раскрытия конуса $\beta=\arctg((R-R_0)/h)$, угол между образующей и горизонталью равен $\alpha=\arctg(h/(R-R_0))$ (рис. 1, а). При $\beta=0^\circ$ (или $\alpha=90^\circ$) имеем цилиндрический индуктор.

Найдем напряженность магнитного поля вблизи данного конического индуктора, через который протекает ток I , в произвольной точке, не совпадающей с линией протекания тока. Введем декартову (x, y, z) и цилиндрическую (r, φ, z) системы координат, причем они связаны между собой соотношениями: $r=\sqrt{x^2+y^2}$, $\varphi=\arctg(y/x)$.

Зададим функцию конической винтовой линии проводника с током в параметрической форме с учетом

того, что при $\varphi=0$: $x(\varphi)=R_0$, $y(\varphi)=0$, $z=0$, а при $\varphi=2\pi n$: $x(\varphi)=R$, $y(\varphi)=0$, $z=h$

$$\begin{cases} x(\varphi) = \left(R_0 + \frac{a_0}{2 \cdot \pi} \cdot \varphi \right) \cdot \cos(\varphi), \\ y(\varphi) = \left(R_0 + \frac{a_0}{2 \cdot \pi} \cdot \varphi \right) \cdot \sin(\varphi), \\ z(\varphi) = \frac{b_0}{2 \cdot \pi} \cdot \varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где $\varphi=[0, 2\pi \cdot n]$; $b_0=h/n$ – шаг винтовой линии в вертикальном направлении (расстояние, на котором находятся витки друг от друга в направлении Oz).

Если $b_0>0$, то винтовая линия находится в области $z>0$ и, наоборот, если $b_0<0$, то винтовая линия находится в области $z<0$; $a_0=(R-R_0)/n$ – шаг винтовой линии по радиусу (расстояние между витками винтовой линии вдоль координаты r).

Рассмотрим произвольную точку A , не принадлежащую винтовой линии и имеющую в декартовой системе координаты $A(x_0, y_0, z_0)$, а в цилиндрической – $A(r_0, \varphi_0, z_0)$ (рис. 1, б).

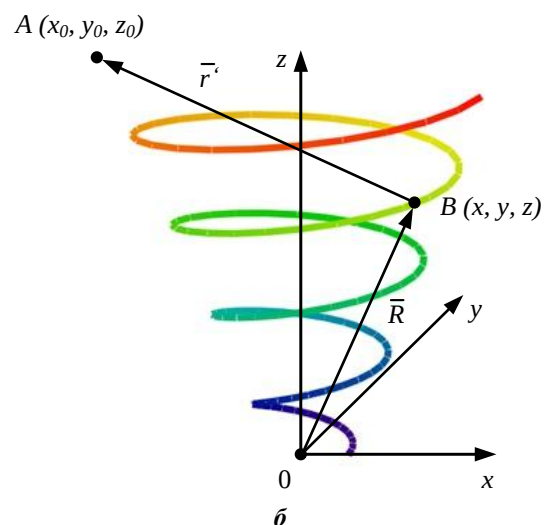
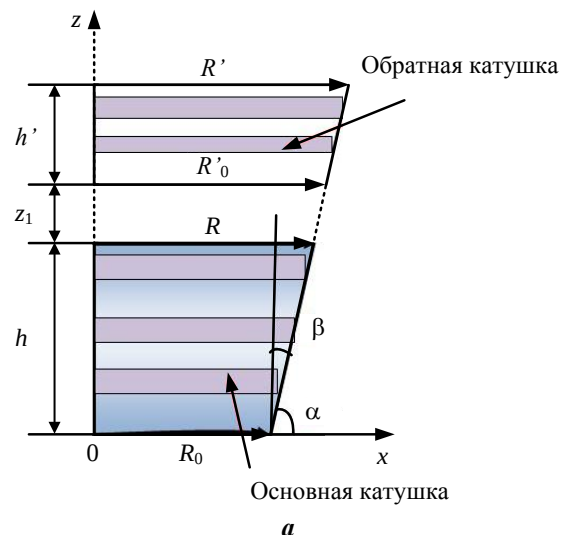


Рис. 1. К расчету магнитного поля в коническом индукторе

Величина и направление напряженности магнитного поля в точке A от тока, протекающего через элемент $d\vec{l}$ длины провода (точка B), определяется по закону Био-Савара-Лапласа в дифференциальной форме $d\vec{H} = \frac{I}{4\pi r^2} [d\vec{l} \times \vec{r}']$, где $\vec{r}'$ - радиус-вектор, проведенный от элемента тока $d\vec{l}$ (направление $d\vec{l}$ совпадает с током) к точке A .

Распишем координаты векторов (см. **рис. 1, б**). Обозначив $a = a_0/(2\pi)$, $b = b_0/(2\pi)$, получим:

$$\vec{R} = ((R_0 + a \cdot \varphi) \cdot \cos(\varphi), (R_0 + a \cdot \varphi) \cdot \sin(\varphi), b \cdot \varphi),$$

$$\vec{r}' = (\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}), \text{ где } \tilde{x} = x_0 - (R_0 + a \cdot \varphi) \cdot \cos(\varphi),$$

$$\tilde{y} = y_0 - (R_0 + a \cdot \varphi) \cdot \sin(\varphi), \tilde{z} = z_0 - b \cdot \varphi.$$

Расстояние от точки A до точки B определяется модулем последнего вектора $r = |\vec{r}'| = \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{z}^2}$.

Вектор $\vec{R}$ является вектор-функцией скалярного аргумента, описывающей винтовую линию, поэтому направляющий вектор касательной к годографу

$$d\vec{l} = \left(\frac{d\vec{R}}{d\varphi} \right) \cdot d\varphi.$$

Проекция вектора $d\vec{l}$ в декартовых координатах:

$$dl_x = (a \cdot \cos(\varphi) - (R_0 + a \cdot \varphi) \cdot \sin(\varphi)) \cdot d\varphi,$$

$$dl_y = (a \cdot \sin(\varphi) + (R_0 + a \cdot \varphi) \cdot \cos(\varphi)) \cdot d\varphi,$$

$$dl_z = b \cdot d\varphi.$$

Запишем векторное произведение

$$[d\vec{l} \times \vec{r}'] = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ dl_x & dl_y & dl_z \\ \tilde{x} & \tilde{y} & \tilde{z} \end{vmatrix}.$$

Найдем проекции напряженности магнитного поля в точке, заданной цилиндрическими координатами $A(r_0, \varphi_0, z_0)$, вблизи проводника в виде винтовой конической линии, содержащей n витков. Зная декартовые координаты точки A $x_0 = r_0 \cdot \cos(\varphi_0)$, $y_0 = r_0 \cdot \sin(\varphi_0)$ и обозначив $R_c(\varphi) = (R_0 + a \cdot \varphi) \cdot \cos(\varphi)$ и $R_s(\varphi) = (R_0 + a \cdot \varphi) \cdot \sin(\varphi)$, получим:

$$H_x(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{(a \sin(\varphi) + R_c)(z_0 - b\varphi)}{\eta(\varphi)} d\varphi - \frac{I}{4\pi} \int_0^{2\pi n} \frac{(r_0 \sin(\varphi_0) - R_s)b}{\eta(\varphi)} d\varphi, \quad (2)$$

$$H_y(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4\pi} \int_0^{2\pi n} \frac{(r_0 \cos(\varphi_0) - R_c)b}{\eta(\varphi)} d\varphi - \frac{I}{4\pi} \int_0^{2\pi n} \frac{(a \cos(\varphi) - R_s)(z_0 - b\varphi)}{\eta(\varphi)} d\varphi, \quad (3)$$

$$H_z(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4\pi} \times \int_0^{2\pi n} \frac{(a \cos \varphi - R_s)(r_0 \sin \varphi_0 - R_s)}{\eta(\varphi)} d\varphi - \frac{I}{4\pi} \int_0^{2\pi n} \frac{(r_0 \cos \varphi_0 - R_c)(a \sin \varphi + R_c)}{\eta(\varphi)} d\varphi, \quad (4)$$

$$\text{где } \eta(\varphi) = (r_0^2 - 2r_0(R_0 + a\varphi)\cos(\varphi - \varphi_0) + (R_0 + a\varphi)^2 + (z_0 - b\varphi)^2)^{3/2}.$$

Рассмотрим моделирование магнитного поля в катушке с противовитком. Принимаем допущение, что обратная катушка также имеет коническую форму и содержит n' витков. Считаем, что первый ее виток начинается на расстоянии z_1 от верха первой катушки (координата начала обратной катушки $z' = h + z_1$) и витки принадлежат образующей основной катушки, т.е. конической винтовой линии, задаваемой параметрическим уравнением (1) с теми же шагами a_0 и b_0 .

Тогда из (1) для обратной катушки можно определить ее геометрические размеры: радиус основания $R'_0 = R_0 + (h + z_1) \cdot a_0/b_0$, максимальный радиус $R' = R_0 + n' \cdot a_0$ и высоту $h' = n' \cdot b_0$. Высота сборной катушки $h_2 = h + z_1 + h'$ (см. **рис. 1, а**).

Проекция напряженности магнитного поля в точке A определяем по принципу суперпозиции как алгебраическую сумму магнитных полей от двух источников:

$$H_{px}(r_0, \varphi_0, z_0) = H^I_x(r_0, \varphi_0, z_0) - H^{II}_x(r_0, \varphi_0, z_0 - h - z_1), \quad (5)$$

$$H_{py}(r_0, \varphi_0, z_0) = H^I_y(r_0, \varphi_0, z_0) - H^{II}_y(r_0, \varphi_0, z_0 - h - z_1), \quad (6)$$

$$H_{pz}(r_0, \varphi_0, z_0) = H^I_z(r_0, \varphi_0, z_0) - H^{II}_z(r_0, \varphi_0, z_0 - h - z_1), \quad (7)$$

где H^I и H^{II} – проекции напряженности магнитного поля от основной и от обратной катушки соответственно, определяемые по формулам (2)–(4), причем для каждой катушки задается соответствующее ей число витков и радиус основания.

Можно определить и модуль вектора напряженности магнитного поля

$$H_p(r_0, \varphi_0, z_0) = \sqrt{\tilde{H}_{px}^2 + \tilde{H}_{py}^2 + \tilde{H}_{pz}^2}, \quad (8)$$

$$\tilde{H}_{px}^2 = H_{px}^2(r_0, \varphi_0, z_0),$$

$$\tilde{H}_{py}^2 = H_{py}^2(r_0, \varphi_0, z_0),$$

$$\tilde{H}_{pz}^2 = H_{pz}^2(r_0, \varphi_0, z_0).$$

Используя связь между декартовыми и цилиндрическими проекциями вектора

$$H_x = H_r \cos \varphi_0 - H_\varphi \sin \varphi_0,$$

$$H_y = H_r \sin \varphi_0 + H_\varphi \cos \varphi_0,$$

находятся радиальная H_r и азимутальная H_φ составляющие напряженности магнитного поля как

$$H_r(r_0, \varphi_0, z_0) = H_{py}(r_0, \varphi_0, z_0) \cdot \sin \varphi_0 - H_{px}(r_0, \varphi_0, z_0) \cdot \cos \varphi_0, \quad (9)$$

$$H_\varphi(r_0, \varphi_0, z_0) = H_{py}(r_0, \varphi_0, z_0) \cdot \cos \varphi_0 - H_{px}(r_0, \varphi_0, z_0) \cdot \sin \varphi_0. \quad (10)$$

Полученные уравнения (1)-(10) дают математическую модель для определения напряженности магнитного поля вблизи конического индуктора с противовитком.

По данной математической модели проведено компьютерное моделирование поведения магнитного поля в коническом индукторе с обратной катушкой при амплитудном токе через индуктор $I=1$ кА. Основные геометрические параметры индуктора приведены в таблице.

На рис. 2 показано поведение составляющих H_z напряженности магнитного поля на оси индуктора от основной и обратной катушки. Кроме этого, приведено суммарное значение этих составляющих, полученное методом суперпозиции.

Видно, что если поле от основной катушки положительное, то от обратной – отрицательное. Это приводит к тому, что функция $H_z(z)$ проходит через нулевое значение. В данном случае это происходит при $z \approx 40$ мм. Данное обстоятельство очень важно для обработки металлов при их левитационной плавке.

Проведено компьютерное исследование поведения вертикальной и радиальной составляющих напряженности магнитного поля по высоте и радиусу индуктора с обратным витком (рис. 3). Видно, что осевая проекция H_z существенно больше, чем радиальная H_r , и наибольшие значения радиальной составляющей напряженности магнитного поля наблюдаются на торцах основной катушки (1 и 3 кривая на рис. 3, б).

Основные геометрические параметры конического индуктора с противовитком

R_0 , мм	R , мм	h , мм	n	n'	z_1 , мм	h_2 , мм	R' , мм	β , град
6	12	30	4	1	15	52,5	16,5	11

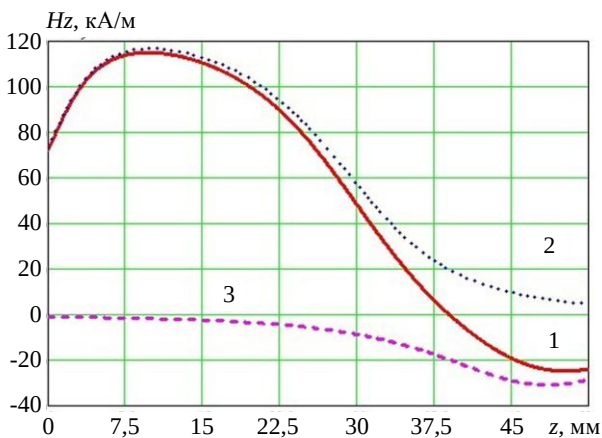


Рис. 2. Вертикальная составляющая вектора напряженности магнитного поля по высоте индуктора с противовитком: 1 – суммарное поле от основной и обратной катушек; 2 – поле основной катушки; 3 – поле обратной катушки

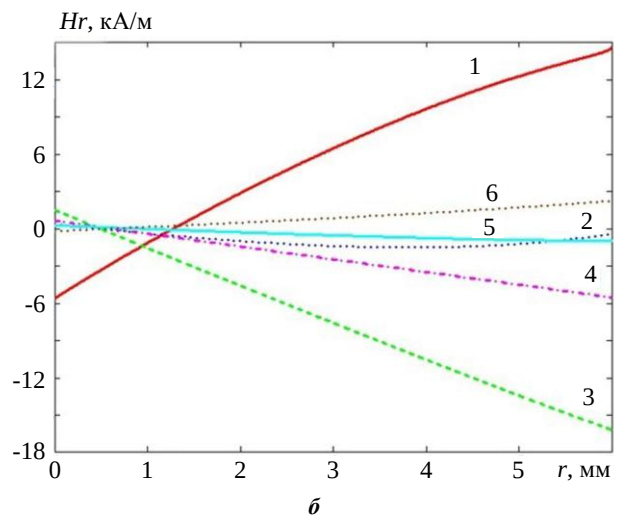
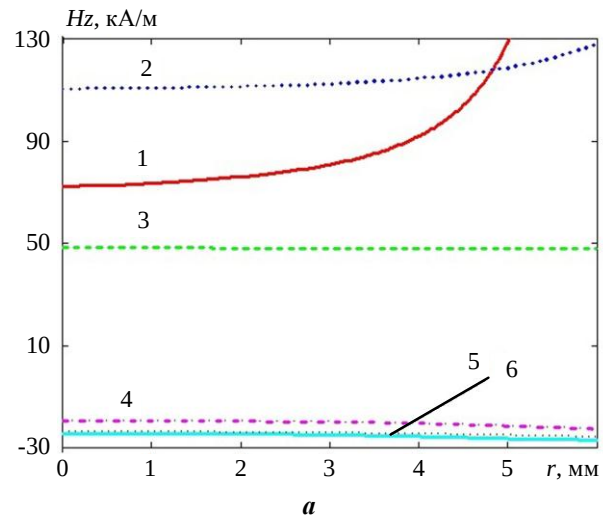


Рис. 3. Вертикальная (а) и радиальная (б) составляющие вектора напряженности магнитного поля по радиусу индуктора с противовитком на разной высоте индуктора (при $\varphi=0$): 1 – $z=0$; 2 – $z=h/2$; 3 – $z=h$; 4 – $z=h+h_1$; 5 – $z=h_2-h'/2$; 6 – $z=h_2$

Анализ этих и других графиков, в том числе и модуля вектора напряженности магнитного поля, показывает, что в вектор магнитного поля решающий вклад вносит вертикальная составляющая. При движении от оси индуктора до половины его радиуса вертикальная, радиальная составляющие и модуль вектора напряженности магнитного поля меняются незначительно. Наиболее существенное изменение (до 25%) наблюдается ближе к торцам катушек, поэтому в первом приближении в горизонтальной плоскости магнитное поле можно считать однородным. Можно считать, что удержание металла во взвешенном состоянии происходит только за счет неоднородного магнитного поля в вертикальном направлении.

Получены зависимости вертикальной составляющей поля на оси индуктора при разных углах его раскрытия (рис. 4). Видно, что при увеличении β (при фиксированном R_0) максимальные и минимальные значения поля снижаются, при этом максимум поля смещается в сторону меньших значений z , а минимум – в сторону больших значений z .

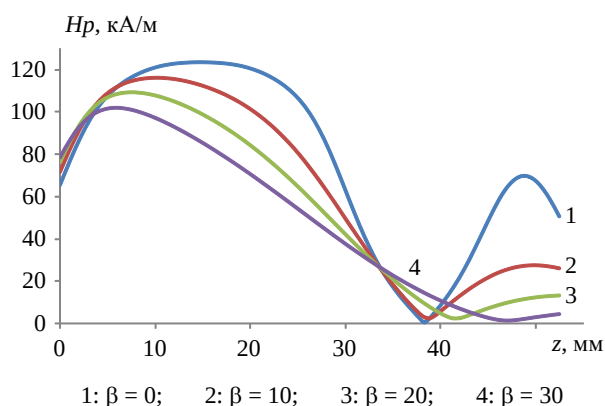


Рис. 4. Модуль напряженности магнитного поля по высоте индуктора при разных углах его раскрытия: 1 – $\beta=0^\circ$; 2 – $\beta=10^\circ$; 3 – $\beta=20^\circ$; 4 – $\beta=30^\circ$

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА В ИНДУКТОРЕ С ОБРАТНЫМ ВИТКОМ

Нагреваемый металл или капля расплава в индукторе будет удерживаться во взвешенном состоянии при условии, что напряженность поля под телом будет больше напряженности поля над ним. Электромагнитное давление на металл при ярко выраженном поверхностном эффекте проникновения поля в проводник выражается формулой $P_{эм} = \mu_0 H^2 / 4$, Па, где H – амплитуда напряженности магнитной составляющей поля на поверхности металла, А/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ В·с/(А·м) – магнитная постоянная [1, 2]. Причем это давление не зависит от частоты поля. Яркий выраженный поверхностный эффект проникновения поля заключается в том, что глубина проникновения поля в металл должна быть существенно меньше размеров тела.

Положение тела, при котором наступит его равновесие в вертикальном неоднородном электромагнитном поле, определяется корнями уравнения

$$F(z) = \frac{\mu_0}{4\rho_0 h_0} (H(z)^2 - H(z+h_0)^2) - g = 0, \quad (11)$$

где ρ_0 – плотность металла; h_0 – размер немагнитного цилиндрического тела, помещенного в индуктор; g – ускорение свободного падения [11, 12].

Получена зависимость функции $F(z)$, имеющей физический смысл ускорения, при исходных геометрических данных индуктора, приведенных в таблице. Показано поведение алюминиевого ($\rho_0=2,7$ г/см³) и стального ($\rho_0=7,8$ г/см³) цилиндров диаметром 5 мм и высотой $h_0=5$ мм при токе через индуктор с амплитудой $I=410$ А (рис. 5, а).

Видно, что для стального тела нет действительных корней уравнения (11), а для алюминиевого тела имеем два корня, а значит, и два положения равновесия. При их анализе можно легко установить, что первый корень ($z_0 \approx 13$ мм) отображает неустойчивое равновесие, так как при небольшом смещении вниз тело начинает с ускорением падать на землю, а при небольшом отклонении вверх оно за счет электромагнитной силы покидает точку равновесия. Второй корень ($z_0 \approx 30$ мм) соответствует устойчивому равновесию, так как при малых смещениях тела в любую сторону возникает сила, возвращающая его обратно.

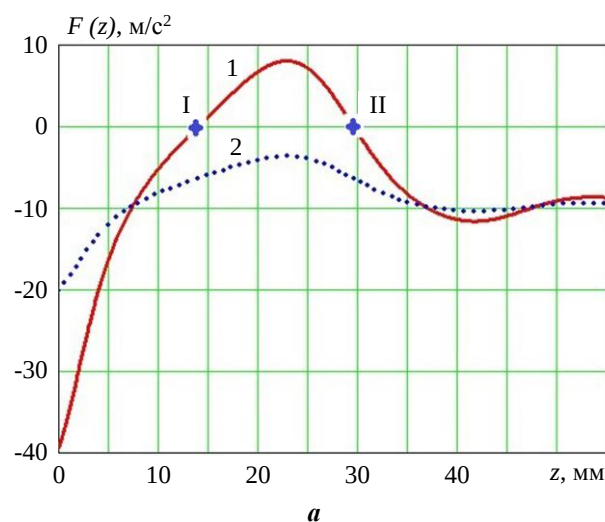


Рис. 5. Ускорение алюминиевого (1) и стального (2) тела по высоте индуктора с противовитком (а) и экспериментальный конический индуктор при нахождении в нем во взвешенном состоянии цилиндрического алюминиевого тела диаметром 5 мм (б)



На экспериментальной установке, рассмотренной в работе [14], проведено исследование положения тела во взвешенном состоянии. Был изготовлен конический индуктор с обратным витком из медной трубки диаметром 4 мм согласно размерам, приведенным в таблице. Измеренная прибором индуктивность индуктора с противовитком составила 0,366 мкГн, а частота его резонанса $f = 74,3$ кГц. После подачи тока в индуктор помещался алюминиевый цилиндр диаметром $d_0 = 5$ мм (рис. 5, б).

Визуально наблюдались колебания тела, поэтому экспериментально при определении положения равновесия z_0 зафиксированы минимальное (29 мм) и максимальное (31 мм) значения. При данных экспериментальных условиях глубина проникновения поля в металл $\Delta = \sqrt{\chi / (\mu_0 \pi f)}$ составляет около 0,31 мм ($\chi = 2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – удельное электрическое сопротивление алюминия). Можно считать, что $\Delta \ll d_0$, поэтому должно выполняться условие (11), а значит, эксперимент можно сравнивать с результатами компьютерного моделирования. Сопоставление полученных экспериментальных результатов с расчетом (рис. 5) позволяет говорить об адекватности предлагаемой методики определения положения равновесия тела в коническом индукторе в пределах допустимой инженерной точности.

Уравнение (11) для нахождения точки равновесия z_0 решить аналитически сложно или даже невозможно, однако легко получить зависимость плотности металла, который может удержать поле, по высоте индуктора с противовитком

$$\rho_0(z) = \frac{\mu_0}{4g \cdot h_0} (H(z)^2 - H(z + h_0)^2). \quad (12)$$

При амплитуде тока через индуктор $I_0 = 0,5$ кА на рис. 6 показаны зависимости $\rho_0(z)$ при разной высоте алюминиевого цилиндра для двух индукторов, имеющих разные углы раскрытия конуса. Видно, что для тела заданной плотности и размера имеются два положения равновесия, однако, как и для предыдущего рисунка, устойчивое равновесие отражается нисходящей ветвью параболы, где $d\rho_0(z)/dz < 0$.

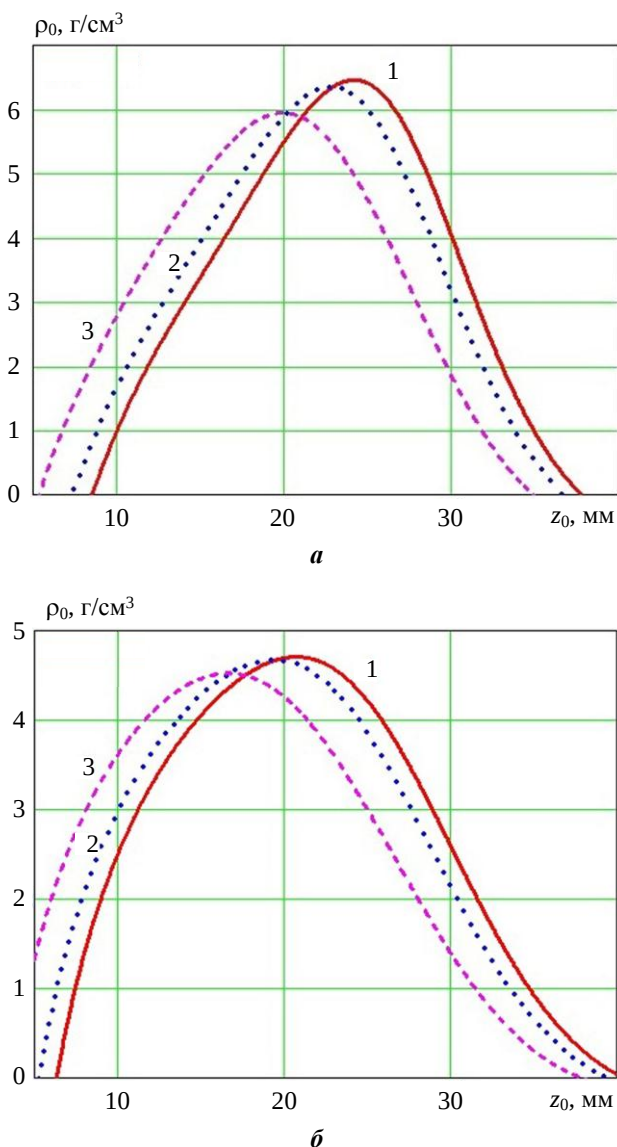


Рис. 6. Плотность металла, который может удержать поле, по высоте конического индуктора с углом раскрытия конуса $\beta = 11^\circ$ (а) и $\beta = 20^\circ$ (б) при разных размерах алюминиевого тела: 1 – $h_0 = 2,5$ мм; 2 – $h_0 = 5$ мм; 3 – $h_0 = 10$ мм

Полученный график очень удобный, так как позволяет ответить на практические вопросы: удержит ли поле индуктора тело с заданными размерами из выбранного металла и с какой максимальной плотностью $\rho_{0\max}$ может использоваться металл во взвешенном состоянии? При этом, если ток отличается от I_0 , то легко посчитать новое значение плотности при токе I :

$$\rho'_0(I) = \rho_0(I_0) \cdot (I/I_0)^2.$$

Это означает, что при увеличении тока через индуктор в 2 раза максимальная удерживаемая плотность возрастает в 4 раза. Из рисунка видно, что с увеличением угла конусности с одной стороны $\rho_{0\max}$ уменьшается, однако при этом положительным моментом является увеличение длины нисходящей ветви параболы и среднего внутреннего диаметра индуктора. Это позволяет удерживать в электромагнитном поле металлические тела, имеющие большие размеры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена математическая модель поведения амплитуды напряженности магнитного поля в высокочастотном коническом индукторе с обратным витком и алгоритм расчета положения равновесия во взвешенном состоянии цилиндрического металлического тела.

2. Установлено, что при движении от оси индуктора до половины его радиуса вертикальная, радиальная составляющие и модуль вектора напряженности магнитного поля меняются незначительно. Можно считать, что там поле практически однородное. Наиболее существенное изменение напряженности магнитного поля по радиусу до 25% наблюдается вблизи торцов катушек.

3. Показано поведение вертикальной и радиальной составляющих вектора напряженности магнитного поля по радиусу индуктора с противовитком. Установлено, что при увеличении угла конусности индуктора при фиксированном радиусе его основания максимальные и минимальные значения поля на оси индуктора снижаются, при этом максимум поля смещается в сторону нижнего торца индуктора, а минимум – в сторону верхнего торца.

4. Предложена простая методика для инженерного расчета, позволяющая определить удержит ли поле индуктора тело с заданными размерами из выбранного металла, положение тела при его равновесии с заданными параметрами индуктора, ток через индуктор, при котором возможно равновесие, и с какой максимальной плотностью и размерами металл в индукторе будет находиться во взвешенном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фогель А.А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии. Л.: Машиностроение, 1979. 104 с.
2. G. Lohöfer, S. Schneider. Heat balance in levitation melting: Sample cooling by forced gas convection in Helium. High Temperatures–High Pressures, 2015, vol. 44, pp. 429-450.
3. G. Lohöfer, S. Schneider. Heat balance in levitation melting: Sample cooling by forced gas convection in Argon. High Temperatures–High Pressures, 2016, vol. 45, pp. 255-271.
4. Глебовский В.Г., Бурцев В.Т. Плавка металлов и сплавов во взвешенном состоянии. М.: Metallurgy, 1974. 176 с.
5. Слухоцкий А.Е. Индукторы. Л.: Машиностроение, 1989. 69 с.
6. S. Roberts, S. Kok, J. Zietsman, H.M. Inglis, Electromagnetic levitation coil design using gradient-based optimization.

- Proceedings of the 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-11), Sydney, Australia, 7-12 June, 2015, no. 1307, pp. 1-6.
7. Левитационная плавка в конусном высокочастотном индукторе с обратным витком / Е.И. Маринкова, А.Ю. Борисов, А.А. Шабурова, В.Э. Фризен // Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров – 2016: материалы научно-практической конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 117-118.
 8. Определение формы свободной поверхности расплава при левитационной плавке в конусном высокочастотном индукторе с обратным витком / Е.И. Маринкова, А.Ю. Борисов, А.А. Шабурова, В.Э. Фризен // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. В 9 ч. / под ред. Е.Г. Гуровой. Новосибирск: НГТУ, 2016. Ч. 5. С. 23-24.
 9. B.K. Khoo, M. Ovinis, T. Nagarajan. A Comparative Analysis of Inductors with Square and Conical Contours. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 415, pp. 414-417.
 10. A. Kermanpur, M. Jafari, and M. Vaghayenagar. Electromagnetic-thermal coupled simulation of levitation melting of metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211, no. 2, pp. 222-229.
 11. Ячиков И.М., Вдовин К.М., Шмелев М.О. Моделирование поведения магнитного поля и положения тела во взвешенном состоянии в высокочастотном индукторе с обратным витком // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2013. №1. С. 47-53.
 12. Ячиков И.М. Положение равновесия тела во взвешенном состоянии в высокочастотном индукторе с обратным витком // *Электротехнические системы и комплексы*. 2014. № 3(24). С. 66-72.
 13. Свидетельство № 2014614306. Моделирование напряженности магнитного поля в индукторе с противовитком / Ячиков И.М., Шмелев М.О.; ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности», Федеральная служба по интеллектуальной собственности, Государственная регистрация программ для ЭВМ, № 2014612024; заявл. 12.03.2014; зарегистр. 22.04.2014.
 14. Ячиков И.М., Ларина Т.П. Экспериментальное исследование положения тела во взвешенном состоянии в цилиндрическом высокочастотном индукторе с обратным витком // *Электротехнические системы и комплексы*. 2015. № 2(27). С. 39-43.

Поступила в редакцию 15 декабря 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

RESEARCH OF MAGNETIC FIELD INTENSITY BEHAVIOR AND BODY POSITION IN SUSPENDED STATE IN THE CONICAL INDUCTOR WITH THE REVERSE COIL

Igor M. Yachikov

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

Tatyana P. Larina

Assistant Professor, Department of Industrial Electric Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tp_larina@mail.ru

Olga N. Vostroknutova

Assistant Professor, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: olvos@mail.ru

Recently, with the development of cheap high-frequency power sources with power up to 4 kW, there has been an increased interest in levitation heating and melting of small samples to obtain pure metal and precision alloys. For stable levitation melting the inductor coil design must have a special form. One of the possible variants of stable levitation melting is the use of construction in the form of conical inductor with a reverse coil - as one of the simplest, but quite effective. The mathematical model for determining the amplitude of magnetic field intensity and the position of the metal body held in suspended state in the conical inductor with the reverse coil is proposed in the paper. The behavior of the vertical and radial components of the magnetic field intensity vector along the inductor radius is analyzed. It is established that when the cone angle of the inductor is increased at a fixed radius of its base, the maximum and minimum values of the field on the inductor axis decrease, wherein the field maximum is shifted towards the lower end of the inductor, and the minimum - towards the upper end. Computer simulation of the possible equilibrium points of the cylindrical body in inductor magnetic field is made. The simple method for engineering calculation is shown, which makes it possible to determine whether the inductor field retains a body with the specified dimensions from the selected metal, the position of the body at its equilibrium with the given parameters of the inductor, current through the inductor, at which equilibrium is possible, and what is maximum density and dimensions the metal body in the inductor will be in suspended state.

Keywords: Levitation melting, high-frequency conical inductor with reverse coil, magnetic field intensity, suspended state of metal, electromagnetic force, stable equilibrium.

REFERENCES

1. Fogel A.A. *Induktsionnyy metod uderzhaniya zhidkih metallov vo vzveshennom sostoyanii* [Induction method of liquid metals retention in suspended state]. Leningrad: Mechanical Engineering, 1974. 104 p. (In Russian)
2. G. Lohöfer, S. Schneider. Heat balance in levitation melting: Sample cooling by forced gas convection in Helium. *High Temperatures-High Pressures*, 2015, vol. 44, pp. 429-450.
3. G. Lohöfer, S. Schneider. Heat balance in levitation melting: Sample cooling by forced gas convection in Argon. *High Temperatures-High Pressures*, 2016, vol. 45, pp. 255-271.
4. Glebovsky V.G., Bourtsev V.T. *Plavka metallov i spлавov vo vzveshennom sostoyanii* [Melting of metals and alloys in suspended state]. Moscow: Metallurgy, 1974. 176 p. (In Russian)
5. Sluhotskiy A.E. *Induktory* [Inductors]. Leningrad: Mashinostroenie, 1989. 69 p. (In Russian)
6. S. Roberts, S. Kok, J. Zietsman, H.M. Inglis, Electromagnetic levitation coil design using gradient-based optimization. Proceedings of the 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-11), Sydney, Australia, 7-12 June, 2015, no. 1307, pp. 1-6.

7. Marinkova E.I., Borisov A.Yu., Shaburova A.A., Frizen V.E. Levitation melting in a cone high-frequency inductor with a reverse coil. *Perspektivnye energeticheskie tehnologii. Ekologiya, ekonomika, bezopasnost i podgotovka kadrov – 2016*. [Perspective energy technologies. Ecology, economics, security and training – 2016]: materials of the scientific-practical conference, Ekaterinburg: UrFU, 2016, pp. 117-118. (In Russian)
8. Marinkova E.I., Borisov A.Yu., Shaburova A.A., Frizen V.E. Determination of the shape of the free surface of the melt at the levitation melting in a cone high-frequency inductor with a reverse coil. *Nauka. Tehnologii. Innovatsii*. [The science. Technologies. Innovations]: collection of scientific papers in 9 parts, ed. E.G. Gurova, Novosibirsk: NSTU, 2016, part 5, pp. 117-118. (In Russian)
9. B.K. Khoo, M. Ovinis, T. Nagarajan. A Comparative Analysis of Inductors with Square and Conical Contours. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 415, pp. 414-417.
10. A. Kermanpur, M. Jafari, and M. Vaghayenegar. Electromagnetic-thermal coupled simulation of levitation melting of metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211, no. 2, pp. 222-229.
11. Yachikov I.M., Vdovin K.N., Shmelev M.O. Modeling of magnetic field behavior and position of a body suspended in the high-frequency inductor with reverse coil. *Mathematical and software systems in industrial and social spheres*. 2013, no. 1, pp. 47-53. (In Russian)
12. Yachikov I.M. Position balance of body suspended in high frequency inductor with reverse coil. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2014, no. 3(24), pp. 66-72. (In Russian)
13. Certificate no. 2014614306. Modeling of the magnetic field in the inductor with reverse coil. Yachikov I.M., Shmelev M.O. FGBU «Federal Institute of Industrial Property», Federal Service for Intellectual Property, State Registration of Computer Programs, no. 2014612024; claimed 12.03.2014; date of registration 22.04.2014.
14. Yachikov I.M., Larina T.P. Experimental research of body position in suspension state in a cylindrical high-frequency inductor with a reverse coil. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2015, no. 2(27), pp. 39-43. (In Russian)

Ячиков И.М., Ларина Т.П., Вострокнутова О.Н. Исследование поведения напряженности магнитного поля и положения тела во взвешенном состоянии в коническом индукторе с противовитком // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 55-62. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-55-62](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-55-62)

Yachikov I.M., Larina T.P., Vostroknutova O.N. Research of Magnetic Field Intensity Behavior and Body Position in Suspended State in the Conical Inductor with the Reverse Coil. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 55-62. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-55-62](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-55-62)

ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 004.421

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-63-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-63-67)

Носова Т.Н., Калугина О.Б.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА БИТОВЫХ ШКАЛ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПОИСКОВЫХ ЗАПРОСОВ, ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ДАННЫЕ С НИЗКОЙ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬЮ**

Оптимизация запросов является важной частью работы любого приложения, взаимодействующего с базами данных. Наиболее эффективным методом ускорения поисковых запросов является применение индексных структур разного вида. Известно, что запросы, использующие кластеризованные и некластеризованные индексы, максимально производительны в том случае, когда столбцы реляционных таблиц содержат невысокий процент повторяющихся значений. Если обрабатываемые данные не избирательны, использование большинства видов индексов является неэффективным. Основной целью представленной работы является расширение возможностей технологий в среде MS SQL Server по индексированию данных и увеличению производительности поисковых запросов. Для реализации этой цели было создано Net-приложение на языке программирования высокого уровня C#, использующее алгоритм формирования битовых шкал для обработки столбцов реляционных таблиц с большим количеством дублированных значений. В статье сделан обзор основных существующих методов, повышающих эффективность выполнения запросов, а также видов индексных структур, используемых в различных системах управления базами данных. Продемонстрированы примеры работы приложения по выборке значений с использованием битовых индексов. Тестирование созданного программного продукта на таблицах с разной кардинальностью позволило сделать выводы о значительном сокращении времени обработки данных при применении битовых шкал по сравнению с другими алгоритмами поиска.

Ключевые слова: оптимизация запросов SQL, индексирование данных, двоичные индексы, словарь данных.

ВВЕДЕНИЕ

Практически во всех современных веб-приложениях эффективные способы доступа к обработке данных являются критически важными задачами. Как следствие, в проектах, взаимодействующих с базами данных, следует уделять внимание оптимизации запросов, иначе время отклика системы на запросы пользователей становится неприемлемым.

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ SQL-ЗАПРОСОВ

Вопросу оптимизации запросов к реляционным базам данных посвящено множество статей и обзоров [1-8]. На сегодняшний момент предложено достаточно большое количество методов, повышающих эффективность выполнения запросов. К самым распространенным из них относятся: изучение плана выполнения запроса, индексирование полей реляционных таблиц (РТ) и анализ степени избирательности индексов.

План запроса создается в фазе оптимизации обработки данных компонентом ядра базы данных, называемым оптимизатором запросов. Последний, принимая во внимание множество различных факторов, пытается подобрать наиболее эффективный алгоритм обработки данных [9].

Применение механизмов индексирования является ещё одним из основных способов сокращения времени выполнения запросов. Правильно построенные индексы могут значительно сократить время обработки данных. Кластеризованные и некластеризованные индексы помогают серверу баз данных находить результат значительно быстрее, используя для этого разные варианты сбалансированных В-деревьев и хеш-таблиц [10].

Многие источники рекомендуют правило форми-

рования оптимальных систем, регламентирующее представление индексов на внешних ключах табличных связей. Именно по этим полям система осуществляет поиск той или иной записи в разных таблицах [3].

Также следует проводить анализ запросов, используемых в подсистеме и индексировать именно те поля, которые используются для сортировки или поиска.

В большинстве случаев рекомендуется:

- Обновлять статистику для реляционных таблиц.
- Упрощать команду SELECT.
- Создавать индексы на столбцах, которые часто используются в разделе WHERE встроенных операторов SQL или запросов, используемых конечными пользователями.
- Индексировать столбцы, часто используемые в операторах SQL для соединения таблиц, применяя для этого не уникальные индексы на столбцах внешних ключей.

■ Использовать для индексирования только те столбцы, в которые входит небольшой процент строк с одним и тем же значением [2-6].

Следует учитывать, что индексы замедляют выполнение команд DML (язык манипулирования данными), а их сопровождение требует времени и увеличивает стоимость обработки. Многие СУБД блокируют использование индексов, если: индексное поле используется в вычисляемых выражениях, в качестве операнда сравнения со значениями неиндексированного поля, в операциях, использующих сравнение с неопределённым значением NULL, или является параметром встроенных или пользовательских функций [4].

Необходимо отметить, что в вопросе организации индексов у разработчиков различных СУБД имеются свои подходы.

Известные на сегодняшний момент СУБД используют разные виды индексов (табл. 1).

Таблица 1

Сводная таблица типов индексов в различных СУБД

Тип индекса	MySQL	Postgre SQL	MS SQL	Oracle
B-Tree index	Есть	Есть	Есть	Есть
Поддерживаемые пространственные индексы (Spatial indexes)	B-Tree index	Есть	Есть	Есть
Hash index	Только в таблицах типа Memory	Есть	Нет	Нет
Bitmap index	Нет	Есть	Нет	Есть
Reverse index	Нет	Нет	Нет	Есть
Inverted index	Есть	Есть	Есть	Есть
Partial index	Нет	Есть	Есть	Нет
Function based index	Нет	Есть	Есть	Есть

СУБД Microsoft SQL Server работает со следующими видами индексов: хэш, некластеризованные индексы с оптимизацией для памяти, кластеризованный, некластеризованный, уникальный, columnstore, индекс с включенными столбцами, индекс на вычисляемых столбцах, фильтруемый, пространственный, xml, полнотекстовый [11]. Данные в таблице хранятся в отсортированном виде только в случае, если создан кластеризованный индекс для этой таблицы.

В большинстве случаев индексирование полей, используемых в условиях отбора, повышает производительность запросов. Однако в действительности это определяется параметрами избирательности индекса и коэффициента повторяющихся значений.

Коэффициент повторяющихся значений (плотность распределения значений) – это информация о числе дубликатов в анализируемом столбце или комбинации столбцов. Он вычисляется как:

$$1/(\text{число различающихся значений}).$$

Если плотность распределения значений превышает 10%, то индекс можно считать бесполезным.

Избирательность (селективность) индекса – это показатель того, сколько строк от общего числа приходится на одно ключевое значение индекса. Это оценочное количество строк, которые могут быть выбраны при поиске по каждому значению индекса.

Селективность (selectivity) индекса (Индексная селективность, S) вычислялась как:

$$S = n / \text{количество строк в таблице},$$

где n – количество различных экземпляров значения индекса в таблице. Уникальный индекс имеет максимально возможную селективность, равную 1, в то вре-

мя как индекс, например для столбца с типом данных BOOLEAN, имеет практически самую низкую селективность.

Оптимизаторы большинства СУБД отыскивает коэффициент для вычисления селективности при первом обращении к таблице и сохраняет его в памяти для использования при вычислении планов при последующих запросах к этой таблице [12].

Наиболее полезными для оптимизатора являются критерии запроса по индексированным полям с высокой избирательностью (соответственно низкой плотностью), т.к. позволяют надежно предсказать, какое количество операций ввода-вывода потребуется при выполнении запроса [13].

В общем случае, чем больше дубликатов в индексированном столбце, тем хуже работает индекс. Поэтому все вышеперечисленные рекомендации по увеличению производительности запросов не подходят для поиска данных по полям с низкой избирательностью.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Основной целью представленной работы является расширение возможностей технологий в среде MS SQL Server по индексированию данных и увеличению производительности поисковых запросов.

Для реализации этой цели было разработано программное средство, обрабатывающее запросы к реляционным таблицам, содержащим поля с большой долей повторяющихся значений, и использующее для этого битовые индексы.

Малоуникальные значения традиционно содержат такие поля таблиц, как: пол, должность сотрудника, область и город местонахождения, категории товара или сотрудника, учебный семестр, оценка, место издания литературы и т.п. Но такие столбцы часто используются в простых или составных предикатах отбора SQL-запросов.

Для решения проблемы поиска данных в РТ по полям с низкой избирательностью было разработано приложение для платформы Net на языке программирования C#, реализующее эффективный механизм поисковых запросов, использующий битовые индексы.

Обычно в B*-дереве имеется однозначное соответствие между записью индекса и строкой таблицы. Битовая карта используется для ссылки на большое количество строк таблицы одновременно. Такие индексы подходят для данных с небольшим количеством различных значений, подвергающихся нечастому изменению.

Объектом исследования являлись двоичные (bitmap)-индексы как средство повышения эффективности обработки поисковых запросов в СУБД MS SQL Server.

Метод битовых индексов заключается в создании отдельных битовых карт (последовательностей 0 и 1) для каждого возможного значения столбца, где каждому биту соответствует строка с индексированным значением, а его значение равное 1 означает, что запись, соответствующая позиции бита, содержит индексированное значение для данного столбца или свойства [14].

Программа тестировалась на примере реляционной таблицы «Сотрудники», описать структуру которой позволяет следующая инструкция SQL.

```
CREATE TABLE Employees
(Id_Empl AS Id INTEGER PRIMARY KEY,
LastName AS ФИО VARCHAR(30) NOT NULL,
Sex AS Пол VARCHAR(10) CHECK (Sex='м' OR 'ж'),
Position AS Должность VARCHAR(25) CHECK
IN('программист', 'дизайнер', 'администратор'),
Group_Experience AS Стаж_группа
VARCHAR(10) CHECK IN('I', 'II', 'III')
);
```

Заполнение таблицы данными может производиться из одного из нескольких подключаемых к проекту файлов, что позволяет варьировать количество записей в таблице и изменять значения атрибутов (рис. 1).

Приведенная выше инструкция SQL демонстрирует, что только столбец Id имеет уникальные значения и для него системой Microsoft SQL Server будет построен кластеризованный индекс.

Для увеличения скорости выполнения запросов по другим полям таблицы общей рекомендацией является создание некластеризованного индекса по одному или совокупности столбцов. В действительности такой подход к сокращению времени выполнения запроса не приводит, так как избирательность индекса по полям: должность, пол, стажевая группа, должность – низкая. В тестовом примере поле «Должность» содержит всего три уникальных значения, «Пол» – два.

Как следует из табл. 1, в MS SQL Server не представлены индексы на основе битовых карт, следовательно, разработанное приложение расширяет встроенные средства СУБД по решению задач оптимизации запросов.

Разработанный Net-проект содержит несколько статических методов класса Program, последовательно реализующих механизм битовых шкал (карт) для рассматриваемой таблицы (рис. 2).

Статический метод Ccreate_Bit_Map() предназначен для создания битовой шкалы заданного поля таблицы (рис. 3). Принимает в качестве параметров ссылку на массив сотрудников, строковый массив встречающихся в столбце уникальных значений и номер столбца, для которого создается битовая карта.

id	ФИО	Должность	Стаж_группа
101	Иванов	программист	I
102	Петров	дизайнер	II
103	Грушин	программист	I
104	Слива	администратор	III
105	Сирчук	дизайнер	I
106	Соколов	программист	I
107	Симонов	администратор	I
108	Якунин	дизайнер	I
109	Игнатко	программист	II
111	Мохов	администратор	I

Рис. 1. Тестовый пример заполнения таблицы десятью записями

Таблица 2

Плотность распределения значений в полях таблицы «Employees»

Название поля таблицы	Плотность распределения данных = 1/число уникальных значений
Sex	0,5
Position	33,33
Group_Experience	33,33

Рис. 2. Структура проекта DB_BitMaps

Рис. 3. Реализация алгоритма составления битовой шкалы для заданного поля таблицы

Метод возвращает готовый bitmap-индекс заданного поля таблицы, программно реализованный с использованием встроенного класса Dictionary – словаря данных.

Dictionary – аналог ассоциативных массивов в других языках программирования, работающих с парами {Key->Value}[15].

В нашем случае это набор {string, int[] }, где ключом Key будет являться очередное уникальное значение поля, представленное в виде строки; в качестве Value используется целочисленный одномерный массив, содержащий 0 и 1. Единица на очередной позиции массива соответствует совпадению у очередной записи значения поля с очередным уникальным значением.

Для тестового примера для таблицы размером в 10 строк результат работы программы следующий (рис. 4):

Рис. 4. Результат работы программы по формированию битовых шкал для двух полей реляционной таблицы

Следующий метод побитового умножения `public static void Bit_Devison()` предназначен для реализации запроса с составными критериями отбора по полям с малым процентом уникальных значений.

Принимает в качестве параметров ссылку на таблицу, ссылки на один или несколько битовых индексов и критерии поиска, представленных в виде текстовых строк.

```
public static void Devison_BitMaps(string[ ], Dictionary<string, int[ ]> , string , Dictionary<string, int[ ]> , string)
{
    ...
}
```

Подпрограмма реализует алгоритм побитового умножения для нескольких битовых шкал и выводит на печать те строки таблицы, для которых выполняется заданный набор критериев отбора (рис. 5).

Для поддержки реализации запросов с составными условиями отбора предусмотрено несколько перегружаемых методов для поиска по двум и трем заданным критериям. Процесс перегрузки методов использован для реализации возможности применения одноимённых подпрограмм, различающихся набором передаваемых параметров.

Тестирование созданного приложения на таблицах разного размера показало существенное сокращение времени выполнения запроса при использовании `BitMap`-индексов по сравнению с построчным просмотром таблицы. Для подтверждения этого тезиса в программу добавлен программный код, осуществляющий поисковый запрос полным сканированием таблицы.

Результаты работы программы для таблицы размером 100 и 1000 записей приведены в табл. 3.

Следует отметить, что некоторые ресурсы тратятся на составление и хранение самой битовой карты, поэтому двоичный индекс максимально эффективен в таблицах с нечастым изменением значений.

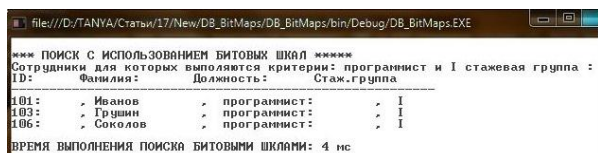


Рис. 5. Результат выполнения запроса с двумя критериями отбора

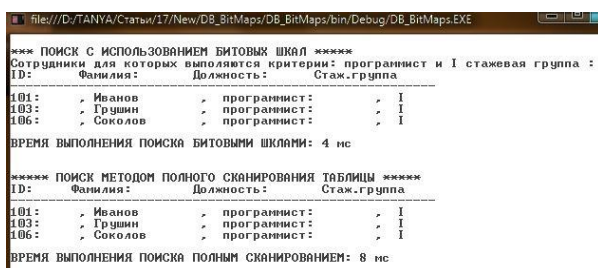


Рис. 6. Сравнение скорости выполнения запроса при использовании битовых шкал и полного сканирования таблицы

Таблица 3

Сравнение времени (мс) выполнения поискового запроса с использованием разных подходов

Использованный алгоритм поиска	Количество записей таблицы	
	100	1000
Полное сканирование таблицы	5	23
Использование битовых индексов	2	12

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Результатом применения разработанного программного продукта является повышение быстродействия поиска при обработке данных в реляционных таблицах.

2. Разработанное программное приложение расширяет встроенные возможности СУБД MS SQL Server по индексированию данных и оптимизации поисковых запросов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные виды индексов достаточно эффективны применительно к полям реляционных таблиц с уникальными значениями, либо с низкой плотностью значений.

Применение бинарных индексов оправдано для полей с большой долей повторяющихся значений в том случае, если имеется достаточное количество ресурсов дискового пространства и модификация таблиц не является интенсивной.

Разработанное программное средство, использующее алгоритм битовых шкал, позволяет повысить производительности поисковых запросов в реляционных таблицах по полям с малой долей уникальных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стаин Д.А., Часовских В.П. Методы оптимизации и повышения эффективности доступа к данным в информационных системах управления организацией // Фундаментальные исследования. 2014. № 12-10. С. 2114-2119.
2. Оптимизация производительности выполнения запросов (SQL Server Compact) // Microsoft. Developer Network [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms172984.aspx>.
3. Фролов К.М., Князев В.Н. Оптимизация запросов к базам данных на основе механизма индексирования // Сборник научных статей XII международной научно-технической конференции «Новые информационные технологии и системы». 2015. С. 201-204.
4. Типичные причины неоптимальной работы запросов и методы оптимизации // IC: ИТС. Информационно-технологическое сопровождение пользователей IC: Предприятие [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://its.1c.ru/db/metod8dev#content:5842:hdcc>. Заглавие с экрана. (Дата обращения: 10.10.2017).
5. Optimizing Database Structure [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dev.mysql.com/doc/refman/5.7/en/optimizing-database-structure.html>. Заглавие с экрана. (Дата обращения: 10.09.2017).
6. Петухов И.С. Алгоритм определения необходимых индексов для оптимизации запросов с соединением двух таблиц в СУБД MySQL (INNODB) // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2017. № 16. С. 98-107.
7. Ригс С., Кросинг Х. Администрирование PostgreSQL 9. Книга рецептов / пер. с англ. Самохвалова Е.В. М.: ДМК Пресс, 2013. 368 с.
8. Тарасов С.В. СУБД для программиста. Базы данных изнутри. М.: Солон-Пресс, 2015. 320 с.
9. Туманов В.Е. Проектирование хранилищ данных для приложений систем деловой осведомленности (Business Intelligence Systems). М.: Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2016. 958 с.
10. SQL Server 2000 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.intuit.ru/studies/courses/68/68/lecture/2016?page=3>. Заглавие с экрана. (Дата обращения: 10.10.2017).
11. Microsoft. Developer NetWork [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms175049\(v=sql.120\).aspx](https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms175049(v=sql.120).aspx). Заглавие с экрана. (Дата обращения: 10.09.2017).
12. Борри Х. Firebird: руководство разработчика баз данных. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 1104 с.

13. Хендерсон К. Профессиональное руководство по SQL Server: структура и реализация. М.: Вильямс, 2006. 1044 с.
14. Академия Microsoft: Распределенные базы и хранилища данных [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.intuit.ru/studies/courses/1145/214/lecture/5523?page=2> intuit. Заглавие с экрана. (Дата обращения: 10.10.2017).
15. Скит Д. C# для профессионалов: тонкости программирования. М.: Вильямс, 2014. 610 с.

Поступила в редакцию 26 октября 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MAKING USE OF ALGORITHM OF BITMAP INDEXES TO INCREASE EFFICIENCY OF THE SEARCH QUERIES PROCESSING LOW SELECTIVITY DATA

Tat'yana N. Nosova

Assistant Professor, the Institute of Power engineering and automated systems, the Department of Informatics and information security, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Ol'ga B. Kalugina

Ph.D. in Engineering, Assistant Professor, the Institute of Power engineering and automated systems, the Department of Informatics and information security, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Query optimization is an important part of operation of any application interacting with databases. The most effective method to accelerate the search queries is to use index structures of different kinds. It is known that queries, which use the indexes (clustered and not clustered), are effective, in this case, when columns contain low percentage of repeating values. If indexable data are not selective, use of the majority of types of indexes is not effective. The main objective of the performed work is to extend the opportunities of technologies in the environment of SQL Server MS for creation of indexes and to increase the productivity of search queries. To achieve this purpose, the research group developed a Net-application in a programming language of the high level C# using an algorithm of formation of bit scales for processing of columns of relational tables with a large count of the duplicated values. The article offers a review of the main existing methods increasing the efficiency of execution of requests and also the types of the index structures used in different database management systems. The article contains some examples of application actions in selection of values with bit indexes. Testing of the created software product on tables with different cardinality makes it possible to draw a conclusion about the considerable saving of time of data handling in case of using bit indexes in comparison with other search algorithms.

Keywords: SQL query optimization, index of data, binary index, dictionary of data.

REFERENCES

1. Stain D.A., Hasovskih V.P. Methods of optimization and increase in access efficiency to data in management information systems of organization. *Fundamentalnyie issledovaniya* [Fundamental research], 2014, no. 12-10, pp. 2114-2119. (In Russian)
2. Optimization of productivity of execution of queries (SQL Server Compact). Microsoft. Developer Network [Digital resource]. Access mode: <https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms172984.aspx>. The title from the screen. (Date of the address: 10.10.2017).
3. Phrolov K.M., Knjazev V.N. Query tuning to databases on the basis of the index mechanism. *Sbornik nauchnykh statey XII mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Novye informatsionnye tekhnologii i sistemy»* [Collection of scientific articles of the XII international scientific and technical conference "New Information Technologies and Systems"], 2015, pp. 201-204. (In Russian)
4. Typical reasons of no optimal operation of queries and methods of optimization // Information and technological attending of users 1C: Enterprise [Digital resource]. Access mode: <https://its.1c.ru/db/metod8dev#content:5842:hdoc>. The title from the screen. (Date of the address: 10.10.2017).
5. Optimizing Database Structure [Digital resource]. Access mode: <https://dev.mysql.com/doc/refman/5.7/en/optimizing-database-structure.html>. The title from the screen. (Date of the address: 10.09.2017).
6. Petuhov I.S. Algorithm of determination of necessary indexes for query tuning with connection of two tables in MySQL (INNODB) DBMS. *Nauchnyy vestnik GosNII GA*. [Scientific bulletin of the state scientific research institute of civil aviation (GosNII GA)], 2017, no. 16, pp. 98-107. (In Russian)
7. Riggs S., Krossing X. PostgreSQL 9: Administration Cookbook. BIRMINGHAM – MUMBAI, Packt Publ., 2013, 368 p.
8. Tarasov C.V. *SUBD dlya programmista. Bazy dannykh iznutri* [The DBMS for the programmer. Databases from within.] Moscow, Solomon-Press Publ., 2015, 320 p. (In Russian)
9. Tumanov V.E. *Proektirovanie khranilishch dannykh dlya prilozheniy system delovoy osvedomlennosti* [Design of data stores for applications of systems of business awareness] (Business Intelligence Systems). Moscow, Intuit Publ., 2016, 958 p. (In Russian)
10. SQL Server 2000 [Digital resource]. Access mode: <http://www.intuit.ru/studies/courses/68/68/lecture/2016?page=3>. The title from the screen. (Date of the address: 10.10.2017).
11. Microsoft. Developer NetWork [Digital resource]. Access mode: [https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms175049\(v=sql.120\).aspx](https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms175049(v=sql.120).aspx). The title from the screen. (Date of the address: 10.09.2017).
12. Barrie X. The Firebird Book: A Reference for Database Developers. Apress Publ., 2004, 1128 p.
13. Henderson K. The Guru's Guide to SQL Server Architecture and Internals. Addison – Wesley Publ., 2003, 685 p.
14. Microsoft academy: The distributed bases and data stores [Digital resource]. Access mode: <http://www.intuit.ru/studies/courses/1145/214/lecture/5523?page=2> intuit. The title from the screen. (Date of the address: 10.10.2017).
15. Skit J. C# for professionals: programming subtleties. Moscow, Williams Publ., 2014, 610 p.

Носова Т.Н., Калугина О.Б. Использование алгоритма битовых шкал для увеличения эффективности поисковых запросов, обрабатывающих данные с низкой избирательностью // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 63-67. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-63-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-63-67)

Nosova T.N., Kalugina O.B. Making Use of Algorithm of Bitmap Indexes to Increase Efficiency of the Search Queries Processing Low Selectivity Data. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 63-67. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-63-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-63-67)

Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф.

Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ)

ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ ДИСКОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ

Дисковые электромеханические преобразователи энергии находят широкое применение в электрических транспортных средствах, насосах, центрифугах, подъемниках и робототехнике. Они широко используются в низкоскоростных и высокоскоростных системах. Применение дисковых электромеханических преобразователей энергии в качестве генераторов оправдано в ветроэнергетических установках, микротурбинах, портативных генераторных установках, буровых установках, приводах лифтов и электромобилях. Диапазон мощности дисковых электромеханических преобразователей энергии в настоящее время варьируется от долей ватт до нескольких мегаватт.

В статье приведен анализ научно-технической литературы по дисковым электрическим машинам. Дан сравнительный анализ характеристик дисковых и цилиндрических преобразователей энергии, в результате которого выявлено, что дисковые машины с аксиальным магнитным потоком наиболее подходят для применения в качестве сервоприводов и генераторов, где их свойства обладают преимуществами по сравнению с цилиндрическими машинами. При этом дисковые электрические машины, в отличие от электрических машин с цилиндрическим ротором, при одинаковых массогабаритных показателях обладают минимальными аксиальными размерами, что позволяет интегрировать их в различные элементы существующих систем, то есть в ряде случаев дисковая конструкция обладает более высокой эргономичностью.

Рассмотрены основные конструктивные схемы дисковых машин, такие как односторонние и двухсторонние, пазовые и беспазовые, с магнитопроводами и без, с внутренними или внешними роторами, с поверхностными или внутренними постоянными магнитами, как одиночные или модульные машины, представлены их основные достоинства и недостатки. Приведено описание конструктивных узлов дисковых машин, применяемых в различных областях, а также примеры их коммерческой реализации. Приведено обоснование выбора материалов, применяемых дисковых электрических машинах.

Ключевые слова: дисковая электрическая машина, аксиальный магнитный поток, постоянные магниты, обзор конструкций.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной научно-технической задачей является создание новых и совершенствование существующих конструктивных схем электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ). Главной тенденцией в совершенствовании ЭМПЭ является минимизация массогабаритных показателей с одновременным увеличением энергетических характеристик и функциональных возможностей.

Одним из решений данной задачи является создание высокоскоростных ЭМПЭ с высококоэффициентными постоянными магнитами (ВПМ), что определяется рядом их преимуществ, таких как высокие энергетические характеристики, отсутствие необходимости во внешних источниках для возбуждения энергии, простота конструкции и минимальные габариты. Значительный прогресс в создании ВПМ с высокой плотностью энергии, снижение их стоимости и прогресс в силовой электронике сыграли важную роль в развитии и применении ЭМПЭ с ВПМ во многих областях.

При этом одной из перспективных конструкций ЭМПЭ с ВПМ является электрическая машина с аксиальным магнитным потоком, также называемая дисковой (ДЭМПЭ). Данный тип ЭМПЭ является привлекательной альтернативой стандартным цилиндрическим ЭМПЭ с радиальным магнитным потоком благодаря их основным преимуществам: улучшенным массогабаритным показателям, малым аксиальным размерам, малой мощности возбуждения, удобной компоновке с приводом или исполнительным механизмом.

В связи с обозначенными преимуществами в настоящее время ведется активная работа по исследованию и разработке конструкций ДЭМПЭ, повышению их надежности и отказобезопасности как в двигательном, так и в генераторном режимах. Данная работа посвящена анализу различных конструктивных схем, а также обзору примеров реализации ДЭМПЭ.

СРАВНЕНИЕ ДИСКОВОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИЙ

С высокими темпами развития новых материалов и улучшением технологий охлаждения стало возможным дальнейшее увеличение удельной мощности электрических машин. Однако для машин цилиндрической конструкции увеличение данного параметра имеет некоторые ограничения [1-5]. Эти ограничения связаны с использованием радиального магнитного потока и не могут быть устранены без существенного изменения в конструкции. Машины с аксиальным магнитным потоком имеют более высокую удельную мощность и меньшие габариты, чем машины с радиальным магнитным потоком и цилиндрической конструкцией [2-4, 6].

В общем преимущества дисковых электрических машин с аксиальным магнитным потоком по сравнению с цилиндрическими машинами можно резюмировать следующим образом [3, 7]:

- дисковые машины имеют гораздо больший диаметр, чем цилиндрические, что сказывается на улучшении охлаждения;
- дисковые машины имеют плоский и несколько регулируемый воздушный зазор;
- меньший объем магнитопроводов, применяемых в дисковых машинах, позволяет сконструировать их с меньшей удельной массой;

- топология дисковой машины позволяет создавать модульные конструкции, в которых количество модулей регулируется по необходимой выходной мощности;

- чем больше внешний диаметр сердечника, тем большее количество полюсов можно расположить, что повышает частоту в дисковых машинах.

Таким образом, дисковые машины с аксиальным магнитным потоком наиболее подходят для применения в качестве сервоприводов и генераторов, где их свойства обладают преимуществами по сравнению с цилиндрическими машинами.

В работах [2, 8-10] были рассмотрены количественные исследования машин радиальным и аксиальным магнитным потоком с точки зрения габаритных размеров и удельной мощности. Сравнение производительности цилиндрической машины и ряда дисковых машин различных конфигураций с различными номинальными мощностями [11] показывает, что дисковая машина имеет меньший объем и меньшую массу активных материалов при заданной номинальной мощности, чем цилиндрическая машина.

В работе [12] (табл. 1) сравниваются проектные данные и рабочие характеристики дискового электродвигателя без магнитопровода на статоре мощностью 10 кВт, 750 об/мин и эквивалентного электродвигателя с постоянными магнитами цилиндрической конструкции с шихтованным статором. В обоих двигателях количество фаз равно 3, число полюсов $2p=16$ и входная частота 100 Гц.

Как видно из табл. 1, КПД дискового электродвигателя мощностью 10 кВт на 1,2% выше, а удельная мощность выше на 82%, поскольку масса активных материалов в дисковой конструкции на 45% ниже, чем в цилиндрической. При отсутствии тока в обмотках нормальные силы между статором и ротором не возникают, однако нормальные силы между роторами с ВПМ достаточно велики.

Дисковые ЭМПЭ с ВПМ, в отличие от ЭМПЭ с цилиндрическим ротором, при одинаковых массогабаритных показателях обладают минимальными аксиальными размерами, что позволяет интегрировать их в различные элементы существующих систем, то есть в ряде случаев ДЭМПЭ обладают более высокой эргономичностью, что определяет перспективы их применения в летательных аппаратах. Кроме того, динамические перегрузки и усилия, воздействующие на ротор ЭМПЭ, в ДЭМПЭ могут оказаться несколько ниже, чем у ЭМПЭ с цилиндрическим ротором, что также определяет применение ДЭМПЭ.

Таблица 1

Сравнение электродвигателей дисковой и цилиндрической конструкции

Параметр	Дисковая конструкция	Цилиндрическая конструкция
Входное линейное напряжение, [В]	227	220
Момент на валу, [Нм]	131	133
КПД	0,925	0,960
Коэффициент мощности	0,991	0,96
Индукция в воздушном зазоре, [Тл]	0,58	0,78
Масса ВПМ, [кг]	12,4	1,6
Масса активных материалов, [кг]	22,5	41,1

КОНСТРУКЦИИ ДИСКОВЫХ ЭМПЭ

С точки зрения конструкции ДЭМПЭ могут быть сконструированы как односторонние или двухсторонние, пазовые и беспазовые, с магнитопроводами и без них, с внутренними или внешними роторами, с поверхностными или внутренними ВПМ, как одиночные или модульные машины.

В случае двухсторонних топологий возможно использование либо внешнего статора, либо внешнего ротора, при этом наибольшими преимуществами обладает топология с внешним ротором [13]. Различные конструкции ДЭМПЭ можно классифицировать следующим образом:

- односторонние дисковые машины:
 - с пазовым статором (рис. 1, а);
 - с беспазовым статором;
 - с явнополюсным статором;
- двухсторонние дисковые машины:
 - с внутренним статором (рис. 1, б):
 - с пазовым статором;
 - с беспазовым статором;
 - с магнитопроводом на статоре;
 - без магнитопровода на статоре (рис. 1, г);
 - без магнитопровода на роторе и статоре:
 - с явнополюсным статором;
 - с внутренним ротором (рис. 1, в):
 - с пазовым статором;
 - с беспазовым статором;
 - с явнополюсным статором;
- многоступенчатые (модульные) дисковые машины (рис. 3).

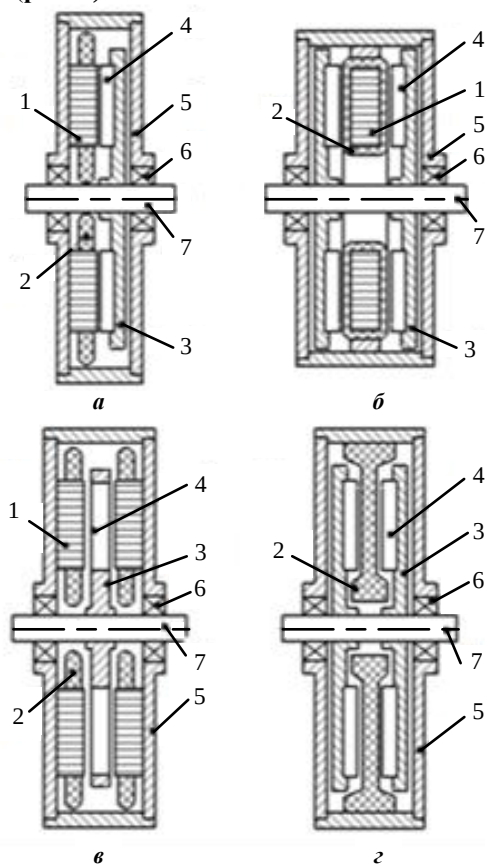


Рис. 1. Основные конструкции дисковых машин:
1 – магнитопровод статора; 2 – обмотка статора;
3 – ротор; 4 – ВПМ; 5 – корпус; 6 – подшипники; 7 – вал

Воздушный зазор пазовой дисковой машины относительно мал. Средняя плотность магнитного потока в воздушном зазоре уменьшается из-за влияния открытых пазов. Для оценки этого изменения существует понятие фиктивного увеличения воздушного зазора. Связь между фиктивным и физическим воздушным зазором выражается с помощью коэффициента Картера, который больше единицы [14].

Для дисковых машин с беспазовым статором зазор намного больше и равен сумме воздушного зазора и толщины всех немагнитных материалов (обмоток, изоляции), через которые проходит основной магнитный поток. Поскольку нет пазов, коэффициент Картера равен единице. Беспазовый статор имеет такие преимущества, как простота сборки статора, уменьшение потерь в роторе, магнитного насыщения и акустического шума. Из недостатков следует отметить использование большего количества материала ВПМ и значительные потери на вихревые токи в проводниках обмотки [15].

В двухсторонней дисковой машине с явнополюсным статором катушки наматываются на полюса, шихтованные в осевом направлении. Для получения трехфазного дискового двигателя с самозапуском количество полюсов статора должно отличаться от числа полюсов ротора, например 12 полюсов статора и 8 полюсов ротора [16-18].

В зависимости от области применения и условий эксплуатации беспазовые статоры могут иметь ферромагнитные сердечники или быть полностью безжелезными. В конфигурации статора без магнитопровода снижаются потери на вихревые токи и гистерезис. Кроме того, исключаются осевые магнитные силы притяжения между статором и ротором при отсутствии тока в обмотке [15, 19, 20].

Односторонняя конструкция дисковой машины проще, чем двухсторонняя, однако выходная мощность ниже.

В двухсторонней машине с внутренним ротором, собранным из ВПМ, обмотка якоря расположена на двух статорах с ферромагнитным сердечником. Диск с ВПМ вращается между двумя статорами. Двухсторонняя дисковая машина с параллельным соединением обмоток статора может работать, даже если одна обмотка выйдет из строя [21-23].

Двухсторонняя машина с внутренним кольцевым сердечником статора имеет многофазную беспазовую обмотку (тороидального типа), намотанную на поверхность ферромагнитного сердечника статора [16, 24-26]. В этой машине кольцевой сердечник статора собран из стальной ленты. Двухсторонний ротор с ВПМ расположен по двум сторонам статора (рис. 2).

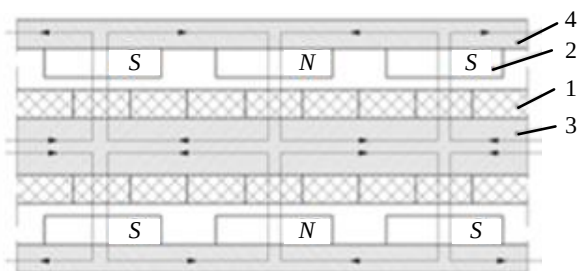


Рис. 2. Двухсторонняя дисковая машина с внутренним беспазовым статором: 1 – обмотки; 2 – ВПМ; 3 – ядро статора; 4 – ядро ротора

Кольцевой сердечник статора также может быть выполнен пазовым (рис. 3). В случае пазового статора воздушный зазор мал и магнитная индукция в воздушном зазоре выше, чем в беспазовой конструкции [24].

Дисковые машины с безжелезными статорами имеют обмотку, расположенную на немагнитной и изолированной конструкции (рис. 4). Для обеспечения необходимой величины магнитного потока в воздушном зазоре требуется значительно больший объем ВПМ по сравнению с ферромагнитной конструкцией статора. При работе на относительно высокой частоте могут возникать значительные потери вихревых токов в проводниках обмотки статора [27].

Существует ограничение на увеличение выходной мощности дисковой машины, которое может быть достигнуто путем увеличения диаметра. Для решения данной задачи создаются модульные дисковые машины. На рис. 5 представлена конструкция многодисковой машины, состоящей из 4 модулей. Статоры в данной машине могут быть соединены последовательно или параллельно [28-33].

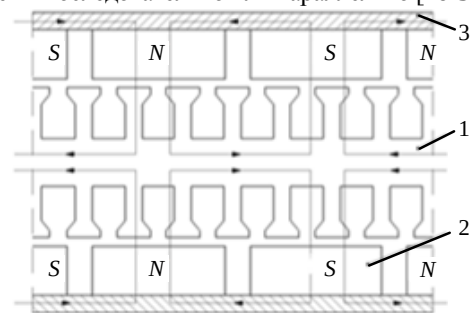


Рис. 3. Двухсторонняя дисковая машина с внутренним пазовым статором: 1 – пазовый статор; 2 – ВПМ; 3 – спинка ротора

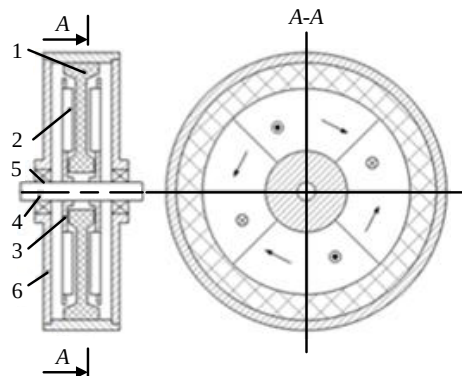


Рис. 4. Двухсторонняя дисковая машина без магнитопроводов на статоре и роторе: 1 – обмотка беспазового безжелезного статора; 2 – ВПМ; 3 – двойной ротор; 4 – вал; 5 – подшипники; 6 – корпус

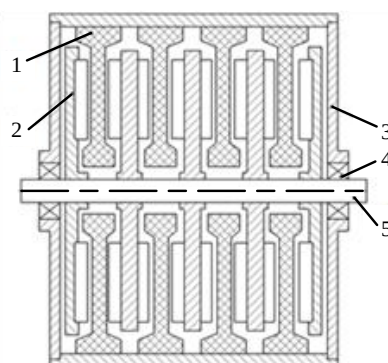


Рис. 5. Модульная дисковая машина: 1 – обмотка статора; 2 – роторный узел; 3 – корпус; 4 – подшипники; 5 – вал

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСКОВЫХ ЭМПЭ

Дисковые ЭМПЭ находят применение в электрических транспортных средствах, насосах, центрифугах, подъемниках и робототехнике. Они широко используются в низкоскоростных и высокоскоростных системах. Применение ДЭМПЭ в качестве генераторов оправдано в ветроэнергетических установках, микротурбинах, портативных генераторных установках, буровых установках, приводах лифтов и электромобилях. Диапазон мощности ДЭМПЭ в настоящее время варьируется от долей ватт до нескольких мегаватт.

Генерирование электроэнергии

ДЭМПЭ являются компактными, высокоэффективными и надежными генераторами. В высокоскоростных генераторах минимизация аэродинамических потерь требует создание роторов с малыми диаметрами, в ДЭМПЭ эта проблема решается применением модульной конструкции, состоящей из нескольких статоров и роторов, при этом отсутствие магнитопроводов на статорах повышает массоэнергетические показатели, снижает синхронное реактивное сопротивление, упрощает регулирование напряжения и повышает эффективность. Такой генератор имеет компактную конструкцию, низкую массу и высокую эффективность. По данным компании Turbo Genset, Великобритания, 100 кВт, 60 000 об/мин модульный дисковый генератор с внешним диаметром 180 мм и длиной 300 мм, имеет массу в 12 кг, при этом генератор полностью охлаждается воздухом [34].

Миниатюрный портативный генератор военного применения, показанный на **рис. 6**, используется в микротурбинах для зарядки переносных батарей. При частоте вращения от 150000 до 250000 об/мин и наружном диаметре ротора 50 мм генератор может генерировать около 1 кВт электроэнергии.

Применение низкоскоростных дисковых генераторов наиболее оправдано в ветроэнергетических установках. В **табл. 2** приведены технические характеристики пятифазных дисковых генераторов производства компании Kestrel Wind Turbines, ЮАР. Все три типа генераторов Kestrel используют шихтованные сердечники.

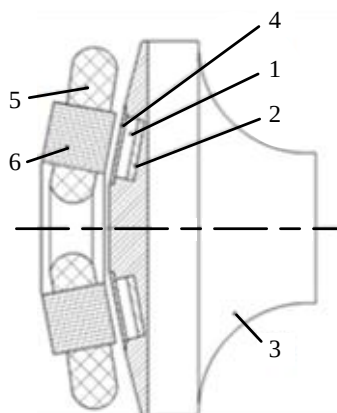


Рис. 6. Высокоскоростной дисковый генератор, интегрированный в микротурбинную установку:
1 – ВПМ; 2 – магитопровод ротора; 3 – ротор микротурбинной установки; 4 – немагнитное бандажное кольцо; 5 – обмотка статора; 6 – магнитопровод статора

Таблица 2

Технические характеристики пятифазных дисковых генераторов

Тип генератора	Kestrel 600	Kestrel 800	Kestrel 2000
Мощность, [Вт]	400	800	2000
Максимальная мощность, [Вт]	600	850	2200
Число полюсов (2p)	48	48	200
Частота вращения, [об/мин]	1100	1010	925
Диаметр ротора, [м]	1,2	2,1	3,6
Номинальная скорость ветра, [м/с]	12,5	11,5	10,5
Масса, [кг]	23	35	80

Привод для электромобилей

Электромобили подразделяются на две основные категории: гибридные и аккумуляторные. Приводные электродвигатели для электромобилей должны соответствовать следующим требованиям:

- высокая удельная мощность;
- широкий диапазон частот вращения и крутящего момента;
- высокая надежность и прочность при различных условиях эксплуатации, например, при высоких и низких температурах, дожде, снеге, вибрациях и т.д;
- низкая стоимость.

Гибридные электромобили сочетают двигатель внутреннего сгорания обычного автомобиля с приводным электродвигателем, что ведет к экономии топлива. Электрический мотор/генератор обычно расположен между двигателем внутреннего сгорания и коробкой передач (**рис. 7**).

Номинальная мощность электродвигателей, применяемых в гибридных электромобилях, составляет от 10 до 75 кВт. Из-за ограниченного пространства между двигателем внутреннего сгорания и коробкой передач, электродвигатели для гибридных электромобилей имеют малую аксиальную длину и большие диаметры. Дисковые электродвигатели, имеющие высокий крутящий момент, идеально подходят под требования гибридных автомобилей [35].

В аккумуляторном электромобиле энергия, хранящаяся в аккумуляторной батарее, преобразуется в механическое движение и обратно при рекуперативном торможении.

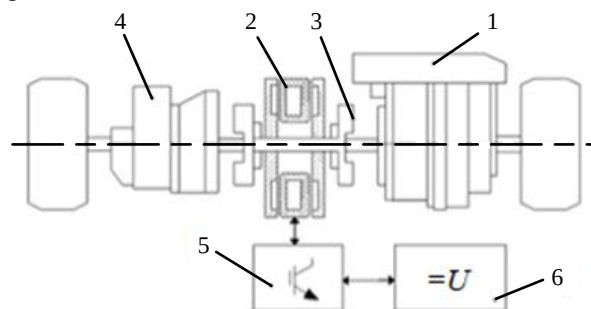


Рис. 7. Схема привода гибридного электродвигателя:
1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – дисковый мотор-генератор; 3 – муфта; 4 – коробка передач; 5 – инвертор; 6 – аккумулятор

В аккумуляторных электромобилях дисковые электродвигатели встроены в колеса транспортного средства (рис. 8) [36, 37]. С помощью дискового электродвигателя дифференциальный механизм может быть заменен электронной дифференциальной системой [24].

Электромеханическая приводная система значительно упрощается, когда двигатель установлен в колесе, поскольку отпадает необходимость в приводных валах и шарнирах равных угловых скоростей [24].

Судовые силовые установки

Конструкция высокогабаритного двухстороннего дискового электродвигателя, разработанного Kamap Aerospace, США, показана на рис. 9 [38]. Технические характеристики высокогабаритных двигателей с аксиальным магнитным потоком производства Kamap приведены в табл. 3.

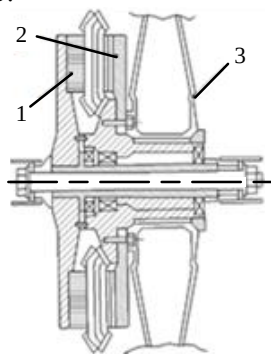


Рис. 8. Односторонняя дисковая машина, встроенная в колесо: 1 – узел статора; 2 – узел ротора; 3 – диск колеса

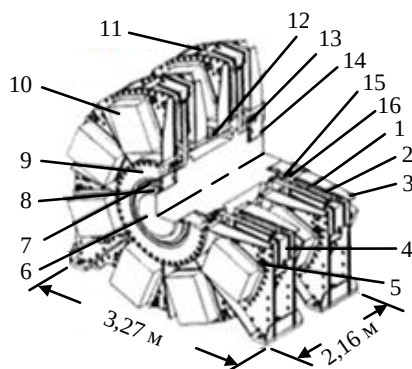


Рис. 9. Высокогабаритный двухсторонний дисковый электродвигатель: 1 – ВПМ; 2 – статорный узел; 3 – корпус; 4 – ударный демпфер; 5 – амортизатор; 6 – вал ротора; 7 – зажим диска ротора; 8 – уплотнительный узел вала; 9 – держатель подшипника; 10 – сегмент статора; 11 – центральный каркас; 12 – распорка; 13 – диск ротора; 14 – подшипниковый узел; 15 – уплотнитель ротора; 16 – уплотнительный узел ротора

Таблица 3

Технические характеристики высокогабаритных двигателей с аксиальным магнитным потоком

Характеристики	PA44-5W-002	PA44-5W-001	PA57-2W-001
Число полюсов, 2р	28	28	36
Мощность, [кВт]	336	445	746
Фазное напряжение, [В]	700	530	735
Частота вращения, [об/мин]	3600	6000	4000
КПД, %	0,95	0,96	0,96
Масса, [кг]	195	195	340
Диаметр корпуса, [м]	0,648	0,648	0,787
Длина корпуса, [м]	0,224	0,224	0,259

Электродвигательные установки для подводных лодок требуют высокой выходной мощности, высокой эффективности, бесшумности и малых габаритов [39, 40]. Дисковые электродвигатели могут отвечать этим требованиям и работать без сбоев более 100 000 ч, при охлаждении морской водой. Эти двигатели практически бесшумны и работают с минимальным уровнем вибрации. Удельная выходная мощность при номинальных рабочих условиях может превышать 2,2 кВт/кг, а удельный момент 5,5 Нм/кг [40].

Дисковый электродвигатель может быть спроектирован с использованием двух роторов [41]. Эта топология машины нашла свое применение в морских силовых установках, которые используют дополнительный противовращающийся ходовой винт [41]. Для достижения противоположного вращения двух роторов необходимо создать в статоре противовращающиеся магнитные поля. Каждый ротор имеет свой собственный вал, который вращает ходовой винт, то есть двигатель имеет два коаксиальных вала, которые разделены радиальным подшипником. Схема показана на рис. 10 [41].

Мобильные буровые установки

Габариты буровых установок варьируются от небольших электроприводных инструментов до крупных установок для нефтяных месторождений.

Дисковые двигатели большой мощности особенно подходят для переносного бурового оборудования благодаря своей компактной конструкции, низкой массе, точной регулировке скорости, высокой эффективности и надежности.

В приводе буровой системы ECI [42], изготовленном Tesco Corporation, Канада, применены дисковые электродвигатели с жидкостным охлаждением, что обеспечивает следующие основные преимущества:

- высокую точность в управлении частотой и моментом;
- модульную конструкцию, позволяющую продолжить бурение при необходимости увеличения мощности;
- прямое подключение к установкам по шинам переменного тока и интерфейсам с существующими источниками питания.

Технические характеристики буровой установки приведены в табл. 4.

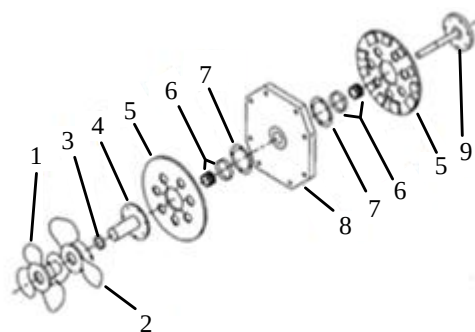


Рис. 10. Разобранный вид дисковой машины с противовращающимся ротором: 1 – основной винт; 2 – противовращающийся винт; 3 – радиальный подшипник; 4 – внешний вал; 5 – ротор с ВПМ; 6 – подшипники; 7 – монтажное кольцо; 8 – статор; 9 – внутренний вал

Таблица 4

Технические характеристики
мобильной буровой установки

Характеристики	ECI 670	ECI 1007
Масса, [кг]	5,9	6,3
Рабочий ход, [м]	4,34	4,34
Момент, [Нм]	7,6	11,4
Частота вращения, [об/мин]	187	187
Длина, [м]	6,4	6,4

Приводы лифтов

Концепция безредукторного электромеханического привода для лифтов была введена в 1992 году компанией Kone Corporation в Финляндии [43]. С помощью дискового электродвигателя (табл. 5) машинный зал управления лифтами может быть заменен компактным прямым электромеханическим приводом [43].

В табл. 6 перечислены характеристики двухдискового двигателя мощностью от 58 до 315 кВт [43].

Миниатюрные дисковые электродвигатели

Миниатюрные двигатели находят применение в приводах жестких дисков, сотовых телефонах, мобильных сканерах и бытовой электронике [44].

Миниатюрные бесколлекторные дисковые двигатели хорошо адаптированы к большому объему производства с низкой стоимостью. Чтобы получить жесткость, катушки статора выполняют наплавлением. Статор монтируется на односторонней печатной плате. Каждая деталь может быть изготовлена с использованием стандартных методов отливки, штамповкой со специальной конструкцией для простой и эффективной сборки.

Миниатюрные поворотные приводы, разработанные для применения в автомобильной промышленности, обеспечивают вращательное движение в ограниченном диапазоне. Основными особенностями таких типов приводов являются:

- бесконтактный принцип действия;
- постоянный крутящий момент, не зависящий от углового положения;
- линейная характеристика крутящего момента;
- два направления вращения;
- высокий удельный момент.

Таблица 5

Технические характеристики дисковых приводов лифтов

Параметры	MX05	MX06	MX10
Мощность, [кВт]	2,8	3,7	6,7
Момент, [Нм]	240	360	800
Частота вращения, [об/мин]	113	96	80
КПД	0,83	0,85	0,91
Диаметр шкива, [м]	0,34	0,4	0,48
Скорость лифта, [м/с]	1	1	1

Таблица 6

Характеристики двухдисковых электродвигателей для
безредукторных подъемников

Параметры	MX32	MX40	MX100
Мощность, [кВт]	58	92	315
Момент, [Нм]	3600	5700	14000
Частота вращения, [об/мин]	153	153	214
КПД	0,92	0,93	0,95
Скорость лифта, [м/с]	6	8	13,5

Приводы жестких дисков компьютеров

Основными требованиями к приводным двигателям компьютерных жестких дисков являются: высокий пусковой момент, ограниченный ток питания, низкая вибрация и шум, физические ограничения по объему и форме, защита от загрязнений.

Электродвигатели дисковой конструкции (рис. 11) могут развивать более высокий пусковой момент, чем двигатели радиальным магнитным потоком. Недостатком одностороннего дискового электродвигателя, показанного на рис. 11, а, является высокая сила притяжения между статором с ферромагнитным сердечником и ротором с установленными на нем ВПМ. В двухсторонних дисковых электродвигателях привода жестких дисков статор не имеет ферромагнитного сердечника, и при нулевом токе сила притяжения не создается. Статор имеет трехфазную обмотку, изготовленную методом литографии. Чтобы уменьшить воздушный зазор и увеличить плотность магнитного потока, в роторе и в нижней части ступицы создаются конструкционные изгибы, в направлении к центрам катушек статора (рис. 11, б). Согласно [45] для дискового привода жестких дисков с наружным диаметром статора 51 мм, 180 витков на фазу и коэффициентом крутящего момента 0,00659 Нм/А, потребление составляет 0,09 А при 13900 об/мин.

Акустический шум привода жестких дисков с шарикоподшипниками обычно ниже 30 дБ (А) и прогнозируемое среднее время между отказами 100 000 ч. Шпиндели жесткого диска в настоящее время переходят от шарикоподшипников к жидкостным динамическим подшипникам. Такие подшипники производят меньше шума и исправны в течение более длительного периода времени.

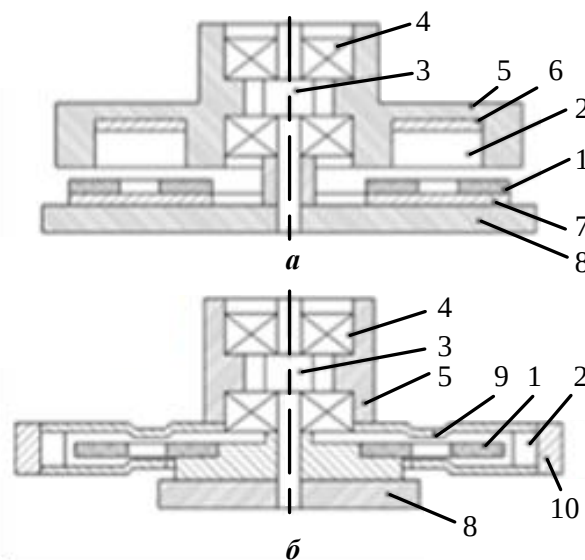


Рис. 11. Конструкция дискового привода жесткого диска компьютера: 1 – катушки статора; 2 – ВПМ; 3 – вал; 4 – подшипники; 5 – ступица; 6 – ядро ротора; 7 – ядро статора; 8 – основание; 9 – конструкционные изгибы; 10 – немагнитное кольцо

ПРИМЕРЫ КОММЕРЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ТОПОЛОГИЙ ДИСКОВЫХ ЭМПЭ

С сердечником на статоре

Примером коммерческого применения двухстороннего дискового электродвигателя с ВПМ и ферромагнитным сердечником является продукт производства компании Mavilor, Испания [46]. Внешние статоры имеют пазовые кольцевые сердечники из электротехнической стальной ленты. Внутренний ротор не имеет ферромагнитного сердечника и ВПМ устанавливаются на немагнитном вращающемся диске.

Более низких массогабаритных показателей можно добиться применением аморфных сплавов. Так, например, двухсторонний синхронный дисковый генератор с сердечником статора, собранным из ленты аморфного сплава производства компании LE Incorporated, США [47], имеет оюем на 60% ниже, чем у классических синхронных генераторов при одинаковой мощности.

Дисковые машины с ферромагнитными сердечниками на статоре и роторе имеют более высокие значения синхронных реактивных сопротивлений, чем машины без ферромагнитных сердечников. Они отрицательно влияют на регулирование напряжения в генераторном режиме.

Основными потерями в таких машинах являются, среди прочего, потери в стали, которые зависят от частоты и плотности магнитного потока. Частота изменения потока в сердечнике, в свою очередь, определяется частотой вращения и числом пар полюсов. Поскольку дисковые машины имеют большое количество полюсов (минимум $2p=6$), то частоты вращения ограничены, чтобы держать в пределах потери в стальных сердечниках. Для высоких частот обычно используется шихтованная электротехническая сталь толщиной менее 0,2 мм, или магнитопроводы из аморфной стали.

Без сердечника на статоре

Компания Bodine Electric Company, США [48] производит дисковые электродвигатели e-TORQ диаметрами 178 и 356 мм с обмотками на безжелезном статоре и двойными стальными роторами с ВПМ (рис. 12, а). Конструкция безжелезного статора улучшает управление на низких частотах вращения, обеспечивает линейные характеристики момента, из-за отсутствия магнитного насыщения, и позволяет создать максимальный крутящий момент, до десяти раз превышающий номинальный. Данные двигатели могут работать бесперебойно на чрезвычайно низких частотах вращения, даже если они питаются от стандартного преобразователя, кроме того, высокий крутящий момент позволяет в некоторых случаях устранять дорогостоящие редукторы.



Рис. 12. Дисковая машина без магнитопровода на статоре: а – основной вид; б – дисковая машина, интегрированная в колесо автомобиля

Двигатели e-TORQ диаметром 356 мм успешно использовались для прямого привода автомобиля, питаемого от солнечных панелей, участвовавшего в 2003 году в American Solar Challenge (рис. 12, б).

В зависимости от применения и условий эксплуатации статор дисковой машины может не иметь магнитопровода. Данная топология дисковой машины имеет внутренний статор и двойной внешний ротор с ВПМ, которые установлены в стальные диски ротора.

Ввиду отсутствия стальных участков на статоре устраняются потери на вихревые токи и гистерезис. Из-за отсутствия потерь в стали данная дисковая машина может работать с большей эффективностью, чем обычная. С другой стороны, благодаря увеличенному немагнитному воздушному зазору, используется больший объем ВПМ, чем эквивалентная машина с ферромагнитным сердечником на статоре.

Без магнитопроводов на статоре и роторе

Конструкция безжелезного дискового ЭМПЭ была предложена Lynx Motion Technology, США, для применения в качестве электродвигателя и генератора, имеющих высокую удельную мощность и высокий КПД [49]. Конструкция безжелезной дисковой машины находит применение в системах генерирования электроэнергии и в безредукторных электромеханических приводах, где требуются электродвигатели с высоким моментом, что в целом уменьшает шум и ошибки позиционирования.

Конструкция ДЭМПЭ без сердечника на статоре и безпазовое исполнение не только устраняет момент от зубцовых гармоник, но также увеличивает область, занятую проводниками, что повышает крутящий момент и позволяет более эффективно использовать ВПМ [49]. Обмотки статора залиты в высокопрочную, теплопроводную эпоксидную резину. Такая конструкция обеспечивает целостность конструкции машины и эффективно ослабляет высокочастотную вибрацию, когда двигатель подвергается работе с широтно-импульсной модуляцией.

Компания CSIRO Telecommunications and Industrial Physics, Австралия, производит встроенные в колеса дисковые электродвигатели без магнитопроводов для автомобилей, питаемых солнечными панелями [37]. Кроме того, в CSIRO делают безжелезные дисковые электродвигатели как с ВПМ, приклеенными к поверхностям стальных дисков, так и с ВПМ, образующими массив Халбаха без стальных конструкций на роторе. Структура двигателя, диск с ВПМ и обмотка статора показаны на рис. 13 [37].

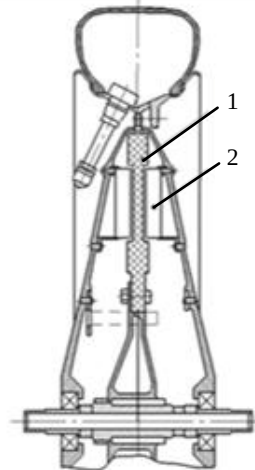


Рис. 13. Двухсторонняя дисковая машина без магнитопроводов на статоре и роторе, интегрированная в колесо автомобиля: 1 – обмотки; 2 – ВПМ

Компания LaunchPoint Technologies (США) разрабатывает электрические машины для применений, связанных с электрическими беспилотными летательными аппаратами. Данные электродвигатели имеют воздушное охлаждение и создают собственный поток воздуха, поэтому не требуется дополнительная система охлаждения или вентилятор. Наибольший интерес представляет дисковый электродвигатель мощностью 5 кВт и массой 0,625 кг с массивами Халбаха на двухстороннем роторе и безжелезном статоре для применения в качестве привода винтов беспилотных летательных аппаратов и наземного применения в колесах шасси [50].

Высокая удельная мощность, обеспечиваемая этой конструкцией двигателя, позволяет увеличить время автономной работы от аккумуляторных батарей и производить больший момент в широком диапазоне частот вращения.

Благодаря применению ВПМ статоры и роторы дисковых машин могут быть изготовлены без ферромагнитных сердечников [12, 37, 51, 52]. При этом ВПМ образуют массив Халбаха и крепятся к ротору, выполненному из немагнитного материала. Конструкция с полностью безжелезным исполнением позволяет уменьшить массу и повысить КПД машины.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ УЗЛЫ И МАТЕРИАЛЫ ДЭМПЭ

Конструкция ротора

Магнитные цепи роторов дисковых машин обеспечивают магнитный поток возбуждения и могут быть спроектированы:

- ВПМ установлены на ферромагнитном кольце или диске, который служит в качестве магнитопроводящего ядра (**рис. 14**);
- ВПМ образуют массив Халбаха без ферромагнитного сердечника (**рис. 15**).

Формы ВПМ в дисковых машинах обычно выполняются трапецидальными, круглыми или полукруглыми (**рис. 16**). Форма ВПМ влияет на распределение магнитного поля в воздушном зазоре и на содержание высших гармоник. Качество выходного напряжения (гармоники ЭДС) дисковых генераторов зависит от формы ВПМ и расстояния между соседними магнитами [53].

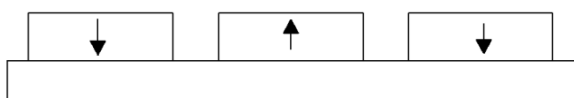


Рис. 14. Односторонняя конструкция ротора с чередующимися полюсами

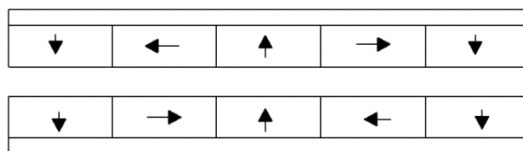


Рис. 15. Двухсторонняя конструкция ротора с ортогональным распределением ВПМ, образующими массив Халбаха

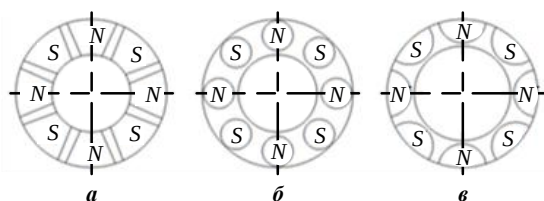


Рис. 16. Формы ВПМ в дисковых машинах: а – трапецидальные; б – круглые; в – полукруглые

Поскольку магнитный поток ротора неподвижен, то используются сердечники в виде колец или дисков из магнитомягкой стали толщиной от 4 до 6 мм.

В двухсторонних дисковых машинах с двойными роторами ВПМ могут образовывать массив Халбаха [54-56]. Ключевая концепция массива Халбаха заключается в том, что направление вектора намагниченности ВПМ изменяется в функции расстояния вдоль массива (**рис. 17**) [54-56]. На практике угол между векторами намагниченности соседних магнитов может быть равен 90, 60 или 45°.

При этом характерно, что магнитное поле с одной стороны (на рабочей поверхности сборки) удваивается, а на другой – практически равно нулю.

Массив Халбаха имеет следующие преимущества:

- индукция магнитного поля в 1,4 раза больше, чем в обычной сборке с чередующимися полюсами;
- не требует магнитопровода для замыкания магнитного потока, и ВПМ могут быть размещены непосредственно на неферромагнитной опорной конструкции (алюминий, пластик, титан);
- магнитное поле имеет более синусоидальное распределение, чем в обычной сборке с чередующимися полюсами;
- массив Халбаха имеет очень слабое магнитное поле на обратной стороне.

Материал ВПМ

Благодаря высоким энергетическим характеристикам ВПМ (SmCo, NdFeB) находят широкое применение в электромеханических системах [29, 30, 57]. При выборе материала ВПМ следующие факторы являются определяющими:

- магнитные характеристики (B_r , H_c , BH_{max});
- устойчивость к высоким температурам (SmCo до 3500С; NdFeB до 2500С);
- стоимость (материал ВПМ из SmCo дороже, чем материал NdFeB);

С учетом вышеперечисленных факторов, материал ВПМ из SmCo представляется более эксплуатационно оправданным выбором.

Число пар полюсов

Число полюсов оказывает влияние на конструкцию и энергоэффективность электрических машин. В высокоскоростных системах прослеживается тенденция использования малого числа полюсов ($2p=2$, $2p=4$), что позволяет снизить потери в стали на перемагничивание. Однако ДЭМПЭ в основном выполняются многополюсными, минимум $2p=6$ [12]. Применение большого числа полюсов позволяет уменьшить высоту магнитопровода ротора [55], что соответственно снижает его массу. Кроме того, возможность создания конструкций ДЭМПЭ без стальных сердечников устраняет необходимость в использовании малого числа полюсов.

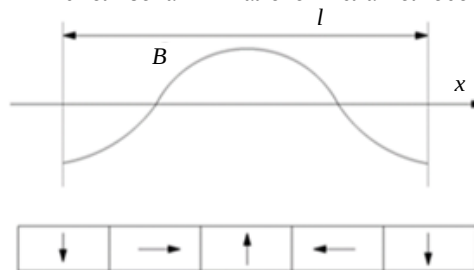


Рис. 17. Распределение магнитного поля в массиве Халбаха

Конструкция статора

Как было указано выше, статор дисковой машины может быть выполнен с магнитопроводом и без магнитопровода.

При наличии магнитопровода сердечник статора дисковой машины выполняется шихтованным. Большинство шихтованных сердечников для статоров дисковых машин изготовлены из лент изотропной электро-технической стали со стандартной толщиной от 0,12 до 0,64 мм. Для минимизации потерь в сердечнике при высоких частотах перемагничивания изотропные электро-технические стали заменяют аморфными сплавами.

Конструкция статора без магнитопровода предполагает закрепление обмотки на дисковой несущей конструкции (ступице), выполненной из немагнитного и непроводящего материала. Для минимизации потерь от вихревых токов обмотка статора выполняется из большого числа многожильных проводников малого диаметра.

В дисковых машинах применяются распределенные, сосредоточенные или тороидальные типы обмоток.

Тороидальные обмотки дисковых машин наматываются на кольцевые сердечники и применяются в конструкциях с двойным ротором. К достоинствам тороидальной обмотки относятся малый вылет лобовых частей, что обеспечивает низкие массогабаритные показатели, простота конструкции сердечника статора, а также простота создания любого количества фаз. Недостатком данного типа обмотки является ее сложная технология укладки, а также увеличение воздушного зазора на величину высоты обмотки.

Сосредоточенные (зубцовые) обмотки характеризуются малым вылетом лобовых частей, простой технологией укладки, однако имеют недостатки в виде пространственных гармоник, искажающих форму ЭДС.

В распределенных обмотках амплитуды высших гармоник значительно меньше, чем в сосредоточенных обмотках и тем самым форма кривой ЭДС менее искажена, кроме того данный тип обмотки наиболее легко использовать в конструкции статора без магнитопровода. Недостатками распределенных обмоток являются большие вылеты лобовых частей, а также сложность технологии укладки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог вышесказанному, необходимо отметить, что дисковые электромеханические преобразователи энергии находят широкое применение в электрических транспортных средствах, насосах, центрифугах, подъемниках и робототехнике. Они широко используются в низкоскоростных и высокоскоростных системах. Применение дисковых электромеханических преобразователей энергии в качестве генераторов оправдано в ветроэнергетических установках, микротурбинах, портативных генераторных установках, буровых установках, приводах лифтов и электромобилях. Диапазон мощности дисковых электромеханических преобразователей энергии в настоящее время варьируется от долей ватт до нескольких мегаватт.

Представленный анализ научно-технической литературы по дисковым электрическим машинам показывает перспективность конструкций дисковых электрических машин с аксиальным магнитным потоком. Показано, что данный тип электромеханических преоб-

разователей энергии является привлекательной альтернативой стандартным цилиндрическим машинам с радиальным магнитным потоком. К основным преимуществам дисковых электромеханических преобразователей энергии относят: улучшенные массогабаритные показатели за счет малых аксиальных размеров и высокие удельные характеристики.

Приведенный сравнительный анализ характеристик дисковых и цилиндрических преобразователей энергии показывает, что дисковые машины с аксиальным магнитным потоком наиболее подходят для применения в качестве сервоприводов и генераторов, где их свойства имеют преимущества по сравнению с цилиндрическими машинами. При этом дисковые электрические машины, в отличие от электрических машин с цилиндрическим ротором, при одинаковых массогабаритных показателях обладают минимальными аксиальными размерами, что позволяет интегрировать их в различные элементы существующих систем, то есть в ряде случаев дисковая конструкция обладает более высокой эргономичностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Campbell P. The magnetic circuit of an axial flux DC electrical machine, IEEE Trans. MAG-11(5): pp. 1541-1543. 1975.
2. Chan C.C. Axial-field electrical machines: design and application, IEEE Trans. EC-2(2): pp. 294-300. 1987.
3. Gieras J.F., Wing M. Permanent magnet motor technology: design and applications. 2nd ed., Marcel Dekker, New York. 2002. 661 p.
4. Leung W.S., Chan C.C. A new design approach for axial-field electrical machine, IEEE Trans. PAS-99(4): pp. 1679-1685. 1980.
5. Miti G.K., Renfrew A.C. Field weakening performance of the TORUS motor with rectangular current excitation, Int. Conf. on Electr. Machines IECM'98, Istanbul, Vol. 1, pp. 630-633. 1998.
6. Campbell P. Principle of a PM axial field DC machine, Proceedings of IEE, vol. 121, no. 1, pp. 1489-1494. 1974.
7. Chan C.C. Axial-field electrical machines with yokeless armature core. PhD Thesis, University of Hong Kong. 1982.
8. Amaratunga G.A.J., Acarnley P.P., McLaren P.G. Optimum magnetic circuit configurations for PM aerospace generators, IEEE Trans on AES, Vol. 21(2): pp. 230-255. 1985.
9. Huang S., Luo J., Leonardi F., Lipo T.A. A comparison of power density for axial flux machines based on general purpose sizing equations, IEEE Trans. EC-14(2): pp. 185-192. 1999.
10. Zhang Z., Profumo F., Tonconi A. Axial flux versus radial flux permanent magnet motors, Electromotion, vol. 3, pp. 134-140. 1996.
11. Sitapati K., Krishnan R. Performance comparisons of radial and axial field permanent magnet brushless machines, IEEE Trans. IA-37(5): pp. 1219-1226. 2001.
12. Gieras J.F., Gieras I.A. Performance analysis of a coreless permanent magnet brushless motor, IEEE 37th IAS Meeting, Pittsburgh, PA, U.S.A. 2002.
13. Caricchi F., Crescimbeni F., Fedeli E., Noia G. Design and construction of a wheel-directly-coupled axial-flux PM motor prototype for EVs, IEEE-IAS Annual Meeting, IAS-29, part 1, pp. 254-261. 1994.
14. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах / пер. с англ. под ред. З.Г. Каганова. М.: Энергия, 1981. 352 с.
15. Chalmers B.J., Hamed S.A., Baines G.D. Parameters and performance of a high-field permanent magnet synchronous motor for variable-frequency operation, Proc IEE Pt B

- 132(3): pp. 117-124. 1985.
16. Lukaniszyn M., Wrobel R., Mendrela A., Drzewoski R. Towards optimization of the disc-type brushless d.c. motor by changing the stator core structure, *Int. Conf. on Electr. Machines ICEM'2000*, vol. 3, Espoo, Finland, pp. 1357-1360. 2000.
17. Lukaniszyn M., Mendrela E., Jagiello M., Wrobel R. Integral parameters of a disc-type motor with axial stator flux, *Zesz. Nauk.Polit. Slaskiej*, Vol. 200, Elektryka, No. 177, pp. 255-262. 2002.
18. Mendrela E., Lukaniszyn M., Macek-Kaminska K. Electronically commutated d.c. brushless disc motors (in Polish). Warsaw: Gnome. 2002.
19. Caricchi F., Crescimbeni F., Fedeli E., Noia G. Design and construction of a wheel-directly-coupled axial-flux PM motor prototype for EVs, *IEEE-IAS Annual Meeting, IAS-29*, part 1, pp. 254-261. 1994.
20. Evans P.D., Easham J.F. Slot-less alternator with ac-side excitation, *Proc. of IEE*, Vol. 130, No. 6, pp. 399-406. 1983.
21. Hrabovcova V., Brslica V. Disk synchronous machines with permanent magnets – electric and thermal equivalent circuits, *Electr. Drives Symp.*, Capri, Italy, pp. 163-169. 1990.
22. Klug L. Axial field a.c. servomotor, *Electr. Drives and Power Electronics Symp. EDPE'90*, Kosice, Slovakia, pp. 154-159. 1990.
23. Klug L., Guba R. Disc rotor a.c. servo motor drive, *Electr. Drives and Power Electronics Symp. EDPE'92*, Kosice, Slovakia, pp. 341-344. 1992.
24. Gair S., Eastham J.F., Profumo F. Permanent magnet brushless d.c. drives for electric vehicles, *Int. Aeagean Conf. on Electr. Machines and Power Electronics ACEMP'95*, Turkey, pp. 638-643. 1995.
25. Spooner E., Chalmers B., El-Missiry M.M. A compact brushless d.c. machine, *Electr. Drives Symp. EDS'90*, Capri, Italy, pp. 239-243. 1990.
26. Zhang Z., Profumo F., Tenconi A. Axial flux interior PM synchronous motors for electric vehicle drives, *Symp. on Power Electronics, Electr. Drives, Advanced Electr. Motors SPEEDAM'94*, Taormina, Italy, pp. 323-328. 1994.
27. Wang R., Kamper M.J. Evaluation of eddy current losses in axial flux permanent magnet (AFPM) machine with an ironless stator, *IEEE 37th IAS Meeting*, Pittsburgh, PA, U.S.A. 2002.
28. Афонин А.А. Дисковые электрические машины с вращающимися векторами намагниченности постоянных магнитов // *Доп. НАН України*, 2004. №2. С. 94-101.
29. Афонин А.А., Гребеников В.В. Структура электрических машин дискового типа // *Праці ІЕД НАНУ*. 2002. №1. С. 56-70.
30. Ahmed A.B., de Cachan L.E. Comparison of two multidisc configurations of PM synchronous machines using an elementary approach, *Int. Conf. on Electr. Machines ICEM'94*, Vol. 1, Paris, France, pp. 175-180. 1994.
31. Chillet C., Brissonneau P., Yonnet J.P. Development of a water cooled permanent magnet synchronous machine. *Int. Conf. on Synchronous Machines SM100*, Vol. 3, Zürich, Switzerland, pp. 1094-1097. 1991.
32. Eastham, J.F., Profumo, F., Tenconi, A., Hill-Cottingham R., Coles, P., Gianolio, G. Novel axial flux machine for aircraft drive: design and modeling, *IEEE Trans. MAG-38(5)*: pp. 3003-3005. 2002.
33. El-Hasan T.S., Luk P.C.K., Bhinder, F.S., Ebaid M.S. Modular design of high-speed permanent-magnet axial-flux generators. *IEEE Trans. MAG-36(5)*: pp. 3558-3561. 2000.
34. ULEV-TAP URL: <http://www.ulev-tap.org>
35. Acarnley P.P., Mecrow B.C., Burdett J.S., Fawcett J.N., Kelly J.G., Dickinson P.G. Design principles for a flywheel energy store for road vehicles, *IEEE Trans. IA-32(6)*: pp. 1402-1408. 1996.
36. Patterson D., Spee R. The design and development of an axial flux permanent magnet brushless d.c. motor for wheel drive in a solar powered vehicle, *IEEE Trans. IA-31(5)*: pp. 1054-1061. 1995.
37. Ramsden V.S., Mecrow B.C., Lovatt H.C. Design of an in wheel motor for a solar-powered electric vehicle, *Proc. of EMD'97*, pp. 192-197. 1997.
38. Cascio A.M. Modeling, analysis and testing of orthotropic stator structures, *Naval Symp. on Electr. Machines*, Newport, RI, USA, pp. 91-99. 1997.
39. Coilgun research spawns mighty motors and more. *Machine Design 9*: pp. 24-25, 1993.
40. Mongeau P. High torque/high power density permanent magnet motors, *Naval Symp. on Electr. Machines*, Newport, RI, USA, pp. 9-16. 1997.
41. Caricchi F., Crescimbeni F., Santini E. Basic principle and design criteria of axial-flux PM machines having counter rotating rotors, *IEEE Trans. IA-31(5)*: pp. 1062-1068. 1995.
42. Top drives URL: <http://www.tescocorp.com/ProductSales/TopDrives/default.aspx>
43. Hakala H. Integration of motor and hoisting machine changes the elevator business, *Int. Conf. on Electr. Machines ICEM'2000*, Vol. 3, Finland, pp. 1242-1245. 2000.
44. Kleen S., Ehrfeld W., Michel F., Nienhaus M., Stolling H.D. Penny-motor: A family of novel ultraflat electromagnetic micromotors, *Int. Conf. Actuator'2000*, Bremen, Germany, pp. 193-196. 2000.
45. Jang G.H., Chang J.H. Development of an axial-gap spindle motor for computer hard disk drives using PCB winding and dual air gaps, *IEEE Trans. MAG-38(5)*: pp. 3297-3299. 2002.
46. Mavilor's motors are specially suited for high response servo drives. URL: <http://www.mavilor.es>
47. GenSmart, High-efficiency, high power density, variable speed electric motors, generators and drive systems. URL: <http://www.lightengineering.com>
48. e-TORQ Motors URL: <http://www.bodine-electric.com/etorq/>
49. Kessinger R.L. Introduction to SEMA motor technology. *Kinetic Art and Technology*, Greenville, IN, U.S.A. 2002.
50. Electric machines for propulsion URL: <http://www.launchpnt.com>
51. Kessinger R.L., Robinson S. SEMA-based permanent magnet motors for high-torque, high-performance, *Naval Symp. on Electr. Machines*, U.S.A., pp. 151-155. 1997.
52. Kessinger R.L., Stahura P.A., Receveur P.E., Dockstader K.D. Interlocking segmented coil array. U.S. Patent No. 5, 744, 896. 1998.
53. El-Hasan T., Luk P.C.K. Magnet topology optimization to reduce harmonics in high speed axial flux generators, *IEEE Trans. MAG-39(5)*: pp. 3340-3342. 2003.
54. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare-earth cobalt material, *Nuclear Instruments and Methods*, Vol. 169, pp. 1-10. 1980.
55. Halbach K. Physical and optical properties of rare earth cobalt magnets, *Nuclear Instruments and Methods*, Vol. 187, pp. 109-117. 1981.
56. Halbach K. Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings, *J. Appl. Physics*, Vol. 57, pp. 3605-3608. 1985.
57. Sadeghirad M. Designing a coreless high-speed axial flux PM generator for microturbines // *Journal of computer & robotics №1*, pp. 63-67. 2011.

Поступила в редакцию 02 декабря 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

OVERVIEW OF DISK DESIGNS OF ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTERS FOR VARIOUS APPLICATIONS

Flur R. Ismagilov

D.Sc. (Eng.), Professor of the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Russia.

Viacheslav E. Vavilov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Russia.

Ildus F. Sayakhov

Postgraduate Student of the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Russia.

Disk electromechanical energy converters are widely used in electric vehicles, pumps, centrifuges, hoists and robotics. They are used in low-speed and high-speed applications. The use of disc electromechanical energy converters as generators is justified in wind power plants, microturbines, portable generator sets, drilling rigs, elevator drives and electric vehicles. The power range of disk electromechanical energy converters currently varies from watt to several megawatts.

The article considered analysis of the scientific and technical literature on disk electric machines. A comparative analysis of the characteristics of disk and cylindrical energy converters is made, as a result of which it was revealed that disk machines with an axial magnetic flux are most suitable for use as servomechanisms and generators where their properties have advantages over cylindrical machines. In this case, disk electric machines, unlike electric machines with a cylindrical rotor, have the same axial dimensions for the same weight and size parameters, which makes it possible to integrate them into various elements of existing systems, that is, in some cases, the disk structure has a higher ergonomics.

The basic design schemes of disk machines such as single-sided and double-sided, slotted and unrestricted, with and without magnetic cores, with internal or external rotors, with surface or internal permanent magnets, like single or modular machines, are presented. A description is given of the structural units of disk machines used in various fields, as well as examples of their commercial implementation. The substantiation of the choice of materials, applied disk electric machines is suggested.

Keywords: disk type electric machine, axial magnetic flux, permanent magnets, construction overview.

REFERENCES

- Campbell P. The magnetic circuit of an axial flux DC electrical machine, IEEE Trans. MAG-11(5): pp. 1541-1543. 1975. 661 p.
- Chan C.C. Axial-field electrical machines: design and application, IEEE Trans. EC-2(2): pp. 294-300. 1987.
- Gieras J.F., Wing M. Permanent magnet motor technology: design and applications. 2nd ed., Marcel Dekker, New York. 2002.
- Leung W.S., Chan C.C. A new design approach for axial-field electrical machine, IEEE Trans. PAS-99(4): pp. 1679-1685. 1980.
- Miti G.K., Renfrew A.C. Field weakening performance of the TORUS motor with rectangular current excitation, Int. Conf. on Electr. Machines IECM'98, Istanbul, vol. 1, pp. 630-633. 1998.
- Campbell P. Principle of a PM axial field DC machine, Proceedings of IEE, vol. 121, no. 1, pp. 1489-1494. 1974.
- Chan C.C. Axial-field electrical machines with yokeless armature core. PhD Thesis, University of Hong Kong. 1982.
- Amaratunga G.A.J., Acarnley P.P., McLaren P.G. Optimum magnetic circuit configurations for PM aerospace generators, IEEE Trans on AES, Vol. 21(2): pp. 230-255. 1985.
- Huang S., Luo J., Leonardi F., Lipo T.A. A comparison of power density for axial flux machines based on general purpose sizing equations, IEEE Trans. EC-14(2): pp. 185-192. 1999.
- Zhang Z., Profumo F., Tonconi A. Axial flux versus radial flux permanent magnet motors, Electromotion, vol. 3, pp. 134-140. 1996.
- Sitapati K., Krishnan R. Performance comparisons of radial and axial field permanent magnet brushless machines, IEEE Trans. IA-37(5): pp. 1219-1226. 2001.
- Gieras J.F., Gieras I.A. Performance analysis of a coreless permanent magnet brushless motor, IEEE 37th IAS Meeting, Pittsburgh, PA, U.S.A. 2002.
- Caricchi F., Crescimbeni F., Fedeli E., Noia G. Design and construction of a wheel-directly-coupled axial-flux PM motor prototype for EVs, IEEE-IAS Annual Meeting, IAS-29, part 1, pp. 254-261. 1994.
- Heller B. and Hamata V. *Vysshiyе garmoniki v asinkhronnykh mashinakh* [Harmonic Field Effect in Induction Machines]. Moscow: Energiya, 1981. 352 p. (In Russian)
- Chalmers B.J., Hamed S.A., Baines G.D. Parameters and performance of a high-field permanent magnet synchronous motor for variable-frequency operation, Proc. IEE Pt B 132(3): pp. 117-124. 1985.
- Lukaniszyn M., Wrobel R., Mendrela A., Drzewoski R. Towards optimization of the disc-type brushless d.c. motor by changing the stator core structure, Int. Conf. on Electr. Machines IECM'2000, vol. 3, Espoo, Finland, pp. 1357-1360. 2000.
- Lukaniszyn M., Mendrela E., Jagiello M., Wrobel R. Integral parameters of a disc-type motor with axial stator flux, Zesz. Nauk. Pol. Slaskiej, vol. 200, Elektryka, no. 177, pp. 255-262. 2002.
- Mendrela E., Lukaniszyn M., Macek-Kaminska K. Electronically commutated d.c. brushless disc motors (in Polish). Warsaw: Gnome. 2002.
- Caricchi F., Crescimbeni F., Fedeli E., Noia G. Design and construction of a wheel-directly-coupled axial-flux PM motor prototype for EVs, IEEE-IAS Annual Meeting, IAS-29, part 1, pp. 254-261. 1994.
- Evans P.D., Easham J.F. Slot-less alternator with ac-side excitation, Proc. of IEE, vol. 130, no. 6, pp. 399-406. 1983.
- Hrabovcova V., Brslica V. Disk synchronous machines with permanent magnets – electric and thermal equivalent circuits, Electr. Drives Symp., Capri, Italy, pp. 163-169. 1990.
- Klug L. Axial field a.c. servomotor, Electr. Drives and Power Electronics Symp. EDPE'90, Kosice, Slovakia, pp. 154-159. 1990.
- Klug L., Guba R. Disc rotor a.c. servo motor drive, Electr. Drives and Power Electronics Symp. EDPE'92, Kosice, Slovakia, pp. 341-344. 1992.
- Gair S., Eastham J.F., Profumo F. Permanent magnet brushless d.c. drives for electric vehicles, Int. Aeagean Conf. on Electr. Machines and Power Electronics ACEMP'95, Turkey, pp. 638-643. 1995.

25. Spooner E., Chalmers B., El-Missiry M.M. A compact brushless d.c. machine, Electr. Drives Symp. EDS'90, Capri, Italy, pp. 239-243. 1990.
26. Zhang Z., Profumo F., Tenconi A. Axial flux interior PM synchronous motors for electric vehicle drives, Symp. on Power Electronics, Electr. Drives, Advanced Electr. Motors SPEEDAM'94, Taormina, Italy, pp. 323-328. 1994.
27. Wang R., Kamper M.J. Evaluation of eddy current losses in axial flux permanent magnet (AFPM) machine with an ironless stator, IEEE 37th IAS Meeting, Pittsburgh, PA, U.S.A 2002.
28. Afonin A.A. Disk electric machines with rotating magnetization vectors for permanent magnets. Dop. NAS of Ukraine, 2004, no. 2, pp. 94-101.
29. Afonin A.A., Grebenikov V.V. The structure of electric machines of disk type. Prtsi IED NASU, 2002, no. 1, pp. 56-70.
30. Ahmed A.B., de Cachan L.E. Comparison of two multidisc configurations of PM synchronous machines using an elementary approach, Int. Conf. on Electr. Machines IECM'94, vol. 1, Paris, France, pp. 175-180. 1994.
31. Chiliet C., Brissonneau P., Yonnet J.P. Development of a water cooled permanent magnet synchronous machine. Int. Conf. on Synchronous Machines SM100, vol 3, Zürich, Switzerland, pp. 1094-1097. 1991.
32. Eastham, J.F., Profumo, F., Tenconi, A., Hill-Cottingham R., Coles, P., Gianolio, G. Novel axial flux machine for aircraft drive: design and modeling, IEEE Trans. MAG-38(5): pp. 3003-3005. 2002.
33. El-Hasan T.S., Luk, P.C.K., Bhinder, F.S., Ebaid M.S. Modular design of high-speed permanent-magnet axial-flux generators. IEEE Trans. MAG-36(5): pp. 3558-3561. 2000.
34. ULEV-TAP URL: <http://www.ulev-tap.org>
35. Acarnley P.P., Mecrow B.C., Burdett J.S., Fawcett J.N., Kelly J.G., Dickinson P.G. Design principles for a flywheel energy store for road vehicles, IEEE Trans. IA-32(6): pp. 1402-1408. 1996.
36. Patterson D., Spee R. The design and development of an axial flux permanent magnet brushless d.c. motor for wheel drive in a solar powered vehicle, IEEE Trans. IA-31(5): pp. 1054-1061. 1995.
37. Ramsden V.S., Mecrow B.C., Lovatt H.C. Design of an in wheel motor for a solar-powered electric vehicle, Proc. of EMD'97, pp. 192-197. 1997.
38. Cascio A.M. Modeling, analysis and testing of orthotropic stator structures, Naval Symp. on Electr. Machines, Newport, RI, USA, pp. 91-99. 1997.
39. Coilgun research spawns mighty motors and more. Machine Design 9: pp. 24-25, 1993.
40. Mongeau P. High torque/high power density permanent magnet motors, Naval Symp. on Electr. Machines, Newport, RI, USA, pp. 9-16. 1997.
41. Caricchi F., Crescimbini F., Santini E. Basic principle and design criteria of axial-flux PM machines having counter rotating rotors, IEEE Trans. IA-31(5): pp. 1062-1068. 1995.
42. Top drives URL: <http://www.tescocorp.com/ProductSales/TopDrives/default.aspx>
43. Hakala H. Integration of motor and hoisting machine changes the elevator business, Int. Conf. on Electr. Machines IECM'2000, Vol 3, Finland, pp. 1242-1245. 2000.
44. Kleen S., Ehrfeld W., Michel F., Nienhaus M., Stolling H.D. Penny-motor: A family of novel ultraflat electromagnetic micromotors, Int. Conf. Actuator'2000, Bremen, Germany, pp. 193-196. 2000.
45. Jang G.H., Chang J.H. Development of an axial-gap spindle motor for computer hard disk drives using PCB winding and dual air gaps, IEEE Trans. MAG-38(5): pp. 3297-3299. 2002.
46. Mavilor's motors are specially suited for high response servo drives. URL: <http://www.mavilor.es>
47. GenSmart, High-efficiency, high power density, variable speed electric motors, generators and drive systems URL: <http://www.lightengineering.com>
48. e-TORQ Motors URL: <http://www.bodine-electric.com/etorq/>
49. Kessinger R.L. Introduction to SEMA motor technology. Kinetic Art and Technology, Greenville, IN, U.S.A. 2002.
50. Electric machines for propulsion URL: <http://www.launchpnt.com>
51. Kessinger R.L., Robinson S. SEMA-based permanent magnet motors for high-torque, high-performance, Naval Symp. on Electr. Machines, U.S.A., pp. 151-155. 1997.
52. Kessinger R.L., Stahura P.A., Receveur P.E., Dockstader K.D. Interlocking segmented coil array. U.S. Patent No. 5, 744, 896. 1998.
53. El-Hasan T., Luk P.C.K. Magnet topology optimization to reduce harmonics in high-speed axial flux generators, IEEE Trans. MAG-39(5): pp. 3340-3342. 2003.
54. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare-earth cobalt material, Nuclear Instruments and Methods, Vol. 169, pp. 1-10. 1980.
55. Halbach K. Physical and optical properties of rare earth cobalt magnets, Nuclear Instruments and Methods, vol. 187, pp. 109-117. 1981.
56. Halbach K. Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings, J. Appl. Physics, vol. 57, pp. 3605-3608. 1985.
57. Sadeghirad M. Designing a coreless high-speed axial flux PM generator for microturbines // Journal of computer & robotics no. 1, pp. 63-67. 2011.

Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф. Обзор конструкций дисковых электромеханических преобразователей энергии для различных областей применения // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 68-79. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-68-79](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-68-79)

Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Sayakhov I.F. Overview of Disk Designs of Electromechanical Energy Converters for Various Applications. *Elektrotechnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 68-79. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-68-79](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-68-79)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Багметов Александр Александрович – лаборант каф. применения электрической энергии, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина», г. Краснодар, Россия. E-mail: aab.1990@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6847-9658>

Богачева Ирина Юрьевна – ст. преп. каф. физики, институт естествознания и стандартизации, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: bogachevirina@yandex.ru.

Богданов Дмитрий Юрьевич – аспирант, каф. электроснабжения и электропривода, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск, Россия. E-mail: Bogdanov_dmitr@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7851-6045>

Вавилов Вячеслав Евгеньевич – канд. техн. наук, доц. каф. электромеханики, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-6974>

Вечеркин Максим Викторович – канд. техн. наук, доц. каф. физики, институт естествознания и стандартизации, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: vecherkin@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8679-9831>

Вострокнутова Ольга Николаевна – ст. преп. каф. физики, институт естествознания и стандартизации, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: olvos@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8980-5865>

Газизова Ольга Викторовна – канд. техн. наук, доц. каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: logan_b_7@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>

Гасияров Вадим Рашитович – канд. техн. наук, зав. каф. мехатроники и автоматизации, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия. E-mail: gasiyarovvr@gmail.com

Исмаилов Флюр Рашитович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. электромеханики, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-9815>

Калугина Ольга Борисовна – канд. техн. наук, ст. преп. каф. информатики и информационной безопасности, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: kalugina.olga@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0703-2331>

Кравченко Олег Александрович – д-р техн. наук, доц., зав. каф. электроснабжения и электропривода, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск, Россия. E-mail: mvk346428@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2974-448X>

Кудряков Александр Георгиевич – канд. техн. наук, доц., зав. каф. применения электрической энергии, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина», г. Краснодар, Россия. E-mail: agk61@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0890-4253>

Ларина Татьяна Петровна – ст. преп. каф. электроснабжения промышленных предприятий, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: tp_larina@mail.ru

Логинов Борис Михайлович – ведущий инженер по наладке и испытаниям, ЦЭТЛ, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: lb18@yandex.ru.

Маклакова Екатерина Андреевна – аспирант, каф. мехатроники и автоматизации, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия.

Малафеев Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доц. каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. <https://orcid.org/0000-0003-1471-9764>

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

Николаев Андрей Андреевич – мастер участка высоковольтных воздушных сетей ЦЭСИП, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: nikolaev.ana@mmk.ru

Николаев Артемий Андреевич – аспирант, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Носова Татьяна Николаевна – ст. преп. каф. информатики и информационной безопасности, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: ntn.mgtu@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8654-1232>

Петрякова Екатерина Сергеевна – магистрант, каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: petryakova-ekaterina@mail.ru

Петушков Михаил Юрьевич – д-р техн. наук, доц., проф. каф. электроники и микроэлектроники, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: petushkov_m@mail.ru

Сазыкин Василий Георгиевич – д-р техн. наук, проф. каф. применения электрической энергии, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина», г. Краснодар, Россия. E-mail: powel@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6479-3199>

Сарваров Анвар Сабулханович – д-р техн. наук, проф. каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Саяхов Ильдус Финатович – инженер, каф. электромеханики, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,

г. Уфа, Россия. E-mail: isayakhov92@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8545-9862>

Сибирцев Дмитрий Сергеевич – аспирант, каф. электропривода, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия. E-mail: sibirtevdm@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5998-0133>

Соколов Александр Павлович – студент, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Храмшина Екатерина Александровна – научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Шубин Андрей Григорьевич – начальник ЦЭТЛ, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: shag_05@mail.ru

Ячиков Игорь Михайлович – д-р техн. наук, проф. каф. вычислительной техники и программирования, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1562-7506>

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.

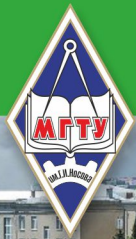
Статьи, направленные в адрес журнала, проходят обязательное научное рецензирование и редактирование. Несоответствие материалов требованиям к статьям может служить поводом для отказа в публикации.

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).



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 автоматики. 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.