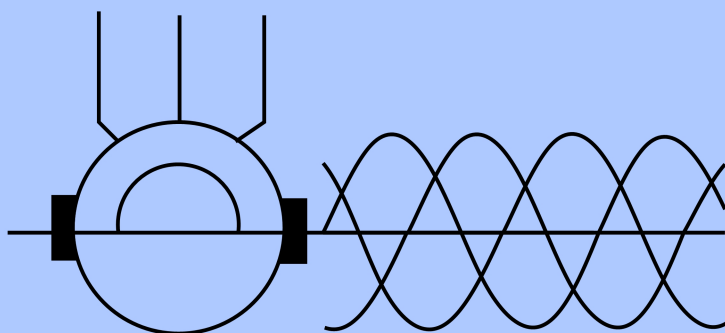
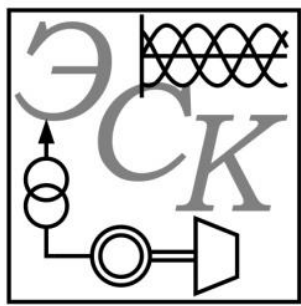


ISSN 2311-8318  
ISSN (online) 2658-3151

# Электротехнические Системы и Комплексы



№1(42), 2019



# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 1(42), МАРТ 2019

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. Храмушин** – 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. Агапатов** – 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,  
ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

### Секции промышленной электроники, автоматики и систем управления; информационного, математического и программного обеспечения технических систем:

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

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

**Е.Н. Ишиметьев** – д-р техн. наук,  
ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

### Секция электротехнологий в промышленности:

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

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

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

### Секция мониторинга, контроля и диагностики электрооборудования:

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

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

### Технические редакторы:

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

**Е.А. Храмушина** – МГТУ им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск, Россия.

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2019

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.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.10.

### Адрес редакции:

455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск,  
пр. Ленина, д. 38, ауд. 342а, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
e-mail: ecis.red@gmail.com

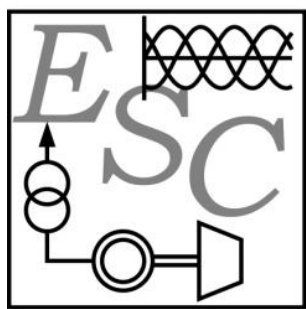
### Адрес издателя:

МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, Челябинская обл.,  
г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр.

### Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
участок оперативной полиграфии.

Выход в свет 25.03.2019. Заказ 75. Тираж 500 экз.  
Цена свободная.



# ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 1(42) MAR, 2019

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),  
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),  
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;

**E.A. Khramshina** – NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

© FSBEI HE NMSTU, 2019

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.

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)

16+ in accordance with Federal Law no. 436-FZ dated 29.12.10

### The publisher:

Nosov Magnitogorsk State Technical University  
455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia  
NMSTU publishing center

### The editorial office:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University  
e-mail: ecis.red@gmail.com

### The printing-office:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, printing section

Publication date: 25.03.2019. Order 75. Circulation: 500.

Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА .....</b>	<b>4</b>
<i>Панова Е.А., Ирихов А.С., Дубина И.А., Патишин Н.Т.</i> Расчет экономических составляющих целевой функции алгоритма определения оптимального варианта схемы распределительного устройства подстанции с высшим напряжением 35 кВ и более .....	4
<i>Паздерин А.В., Чусовитин П.В., Шабалин Г.С.</i> Поиск ближайшего предельного режима электроэнергетической системы на основе обобщенного метода Ньютона.....	12
<b>ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....</b>	<b>19</b>
<i>Богданов Д.Ю., Кравченко О.А.</i> Разработка и реализация адаптивного регулятора перемещения устройства обезвешивания полезного груза тренажера для подготовки космонавтов.....	19
<i>Мещерыков В.Н., Бойков А.И., Ласточкин Д.В.</i> Система плавного пуска асинхронного двигателя с фазным ротором .....	24
<i>Ермолаев А.И., Плехов А.С., Титов Д.Ю., Чернов Е.А.</i> Оценка мощности вибрации в электроприводе .....	30
<b>ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ .....</b>	<b>38</b>
<i>Радионов А.А., Маклаков А.С., Цзин Тао</i> Применение метода роя частиц для определения углов переключения в алгоритме широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник.....	38
<i>Абулвелеев И.Р., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П., Абдулвелеева Р.Р., Косматов В.И.</i> Формирование шаблонов переключений трехуровневого инвертора с векторной широтно-импульсной модуляцией.....	45
<b>МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ .....</b>	<b>53</b>
<i>Метельков В.П., Зюзев А.М., Черных И.В.</i> Система оценки остаточного ресурса изоляции обмотки асинхронного двигателя на основе емкостных токов утечки.....	53
<b>ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....</b>	<b>59</b>
<i>Ошурков В.А., Егорова Л.Г., Леднов А.В., Антипанов И.Д.</i> Человеко-машинная система насыпной плотности шихтовых материалов дуговой сталеплавильной печи: функция объёмной насыпной плотности и семфорная система.....	59
<b>ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ .....</b>	<b>67</b>
<i>Ишметьев Е.Н., Чистяков Д.В., Панов А.Н., Бодров Е.Э., Врabel М.</i> Системы виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики промышленного оборудования.....	67
<b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ .....</b>	<b>74</b>

## CONTENT

<b>POWER ENGINEERING.....</b>	<b>4</b>
<i>Panova E.A., Irikhov A.S., Dubina I.A., Patshin N.T.</i> Calculation of Economic Components of Target Function of the Algorithm for Determining the Optimal Option of Scheme of Substations Distribution Device with the High Voltage of 35 kV and Above.....	4
<i>Pazderin A.V., Chusovitin P.V., Shabalin G.S.</i> Search of a Closest Limit Load Operation Mode of a Grid on the Basis of Generalised Newton Method .....	12
<b>THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE .....</b>	<b>19</b>
<i>Bogdanov D.Yu., Kravchenko O.A.</i> Development and Realization of Adaptive Controller of Real Weight Unloading Motion Device of Simulator for Cosmonauts Training.....	19
<i>Meshcheryakov V.N., Boikov A.I., Lastochkin D.V.</i> System of Soft Start for Induction Motor with Phase Rotor.....	24
<i>Ermolaev A.I., Plekhov A.S., Titov D.Yu., Chernov E.A.</i> Vibration Power Estimation in Electric Drive .....	30
<b>POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS .....</b>	<b>38</b>
<i>Radionov A.A., Maklakov A.S., Jing Tao</i> Using of Particle Swarm Optimization for Selective Harmonic Elimination Technique.....	38
<i>Abdulveleev I.R., Khramshin T.R., Kornilov G.P., Abdulveleeva R.R., Kosmatov V.I.</i> Switching Patterns Formation of a Three-Level Inverter with Space Vector Width-Pulse Modulation .....	45
<b>MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ELECTRIC EQUIPMENT.....</b>	<b>53</b>
<i>Metelkov V.P., Ziuzev A.M., Chernykh I.V.</i> System for Estimating the Residual Resource of Induction Motor Winding Insulation Based on Capacitive Leakage Currents .....	53
<b>TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE AND SOFTWARE .....</b>	<b>59</b>
<i>Oshurkov V.A., Egorova L.G., Lednov A.V., Antipanov I.D.</i> Method of Metal Scrap Fragments Function Construction of the Poured Bulk Density in an Electric Arc Furnace.....	59
<b>REVIEW PAPERS .....</b>	<b>67</b>
<i>Ishmetiev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E., Vrabel M.</i> Vibration Protection, Control and Analysis Systems for Industrial Application.....	67
<b>INFORMATION ABOUT THE AUTHORS .....</b>	<b>74</b>



## РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА СХЕМЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ПОДСТАНЦИИ С ВЫСШИМ НАПРЯЖЕНИЕМ 35 кВ И БОЛЕЕ

Проектирование электрической части распределительных устройств подстанций в основном осуществляется без учета экономических составляющих, и проекты в данном случае должны соответствовать только нормативным документам. Исключение из рассмотрения экономических факторов при проектировании распределительных устройств подстанций также обусловлено отсутствием времени у инженера-проектировщика, занятого разработкой объемной проектной документации, а проведение дополнительных расчетов в условиях подходящих к концу сроков исполнения проекта полностью исключает возможность комплексного учета всех факторов при выборе схемы распределительного устройства. В работе предлагается подход, позволяющий определять некоторые экономические составляющие затрат на проектирование, сооружение, монтаж, наладку и эксплуатацию распределительных устройств подстанций напряжением 35 кВ и выше. Разработанный алгоритм адаптирован к условиям системы автоматизированного проектирования «ОРУ САД», позволяющей осуществлять разработку и формирование документации при проектировании распределительных устройств подстанций с возможностью учета экономических показателей. В данной статье приводятся алгоритмы расчета только экономических показателей (капитальных вложений, эксплуатационных издержек на ремонт и обслуживание) распределительных устройств подстанций. В дальнейшем планируется к разработке алгоритм определения экономического ущерба от перерыва электроснабжения внешних источников нагрузки, питающейся от проектируемой подстанции, и его внедрения в условия указанного САПР. Разрабатываемый алгоритм определения экономически целесообразного варианта схемы распределительного устройства подстанции отвечает требованиям норм и правил проектирования указанных объектов электроэнергетики. Результаты работы применимы в качестве автоматизированного рабочего места инженера-проектировщика электротехнического отдела проектной организации.

**Ключевые слова:** система автоматизированного проектирования, технико-экономический расчет, издержки, капитальные вложения, ущерб от перерыва электроснабжения, инфляция, целевая функция, оптимизация, приведенные затраты.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблемы экономики энергетики остро стоят перед учеными всего мира [1-2]. Одной из них является спрос на электроэнергию на рынках [3] и анализ тарифов на нее. Важным остается и распределение мощности в энергосистеме [4]. Кроме того, данные задачи решаются при проектировании электроэнергетического объекта и выборе наиболее целесообразного его варианта. Данное сравнение осуществляется на основе технических и экономических показателей, к первым относят удобство эксплуатации, надежность, долговечность сооружения, объем капитальных и текущих ремонтов, ко вторым – капитальные (первоначальные) вложения и текущие (ежегодные) расходы.

Сопоставление и анализ всех технико-экономических показателей позволяет произвести выбор наилучшего решения. Экономичность варианта должна оцениваться с учетом, как первоначальных вложений, так и текущих затрат. Поэтому при экономических расчетах рекомендуется в качестве оценки экономичности метод срока окупаемости, соизмеряющего капитальные вложения с будущими издержками производства.

Авторами в работе [5] приведена оценка эффективности капитальных вложений, для выявления которой используются показатели общей и сравнительной эффективности. Экономическим критерием, по которому определяют наивыгоднейший вариант, является минимум приведенных затрат.

В [6] приведены технико-экономические расчеты в электроснабжении. Наиболее экономичным решением электроснабжения является вариант, отвечающий техническим требованиям и имеющий наименьшие приведенные затраты, которые являются мерой стоимости.

В работах [7-11] приведена сравнительная эффективность вариантов развития электрической сети. Обоснование решений при проектировании электрических сетей осуществляется на основе технико-экономического сопоставления вариантов схем и параметров сети путем оценки их сравнительной эффективности.

Геркусовым А.А. в [9] разработана экономико-математическая модель, связывающая технические параметры, стоимостные характеристики и режимы работы ЛЭП любого класса напряжения и назначения.

В работе [10] проведено технико-экономическое сравнение вариантов трансформаторных подстанций традиционного и современного использования по показателю дисконтированных затрат на сооружение и эксплуатацию в течение срока службы.

В [11] приведены основные положения расчета приведенных затрат при проектировании или реновации объектов электроэнергетики. В статьях [12-13] представлены теоретические и практические положения по проведению технико-экономических расчетов распределительных электрических сетей.

Гулидовым С.С. в работе [14] рассмотрены технико-экономические характеристики сельских электрических сетей 10 и 0,4 кВ. При оценке были изучены линии электропередачи 10 кВ и 0,4 кВ, также трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ. При технико-экономической



оценке электросетевого хозяйства 0,4–10 кВ района выявлен износ сетей, их остаточная стоимость, степень надежности работы сетей.

В [15] рассмотрена технико-экономическая оценка трансформаторных подстанций напряжением 6-10/0,4 кВ. Разработана схема данных, которая может быть использована при составлении алгоритма компьютерной программы выбора типа ТП, имеющей распределительное устройство (РУ) первичного напряжения. Представлены результаты технико-экономического сравнения вариантов двухтрансформаторной подстанции с РУ высокого напряжения на базе камер типа КСО и КРУЭ.

В статье [16] приведены зависимости капитальных и приведенных затрат от генерируемой реактивной мощности. В работе [17] представлена многокритериальная оценка технико-экономического состояния распределительных электрических сетей. В качестве частных критериев оценки выбраны показатели качества электроэнергии, надежности электроснабжения, экономической эффективности и физического износа распределительных сетей.

В работе [18] сформулированы критерии технико-экономической оценки вариантов развития электрической сети, расчет которых осуществляется по блокам: капитальные вложения, годовые потери электроэнергии, ежегодные издержки, приведенные затраты, площадь отчуждаемой земли, расход алюминия на провода. В [19] выполнено технико-экономическое сравнение вариантов строительства линий электропередачи по укрупненным показателям.

Работа [20] содержит теоретические основы технико-экономического обоснования структурных схем и схем распределительных устройств электростанций. В статье [21] рассмотрены проблемы обоснования удельных показателей стоимости энергетического оборудования для ЛЭП и подстанций, возникающие при технико-экономическом сравнении вариантов.

Таким образом, существующие подходы технико-экономических расчетов в области электроэнергетики разработаны более 30 лет назад, и ими до сих пор вынуждены пользоваться специалисты-проектировщики.

В связи с этим актуальным является разработка экономико-математической модели, связывающей технические параметры реконструируемых или вновь сооружаемых электроэнергетических систем и режимы их работы с экономическими показателями; использование современных экономических критериев выбора оптимальных проектных решений.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАПИТАЛЬНЫХ ВЛОЖЕНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДСТАНЦИИ

Алгоритм автоматизированного расчета капитальных вложений в строительство подстанции адаптирован к условиям разработанной системы автоматизированного проектирования [22] и базе данных электрооборудования [23]. Блок-схема указанного алгоритма приведена на **рис. 1**. Алгоритм расчета построен на основании методики, приведенной в [5-6].

Капитальные вложения ( $K$ ), как и все экономические показатели сравниваемых вариантов, должны определяться в прогнозных ценах одного уровня и по источникам равной достоверности.

Расчеты капитальных вложений при отсутствии сметных данных могут приниматься по аналогам или укрупненным показателям стоимости (УСП) электрооборудования ПС [6] с использованием индексов пересчета на дату разработки проектных материалов.

Исходные данные для расчета (блок 1, **рис. 1**) предполагают:

- ручной ввод типа и количества силовых трансформаторов ( $n$ ) и ячеек выключателей ВН ( $m$ ) и НН ( $k$ ) в САПР [22];
- ручной ввод местоположения подстанции (региональная принадлежность), главной схемы РУ и номинального напряжения в САПР [22];
- ручной ввод индекса цен по капитальным вложениям объекта электроэнергетики на год проектирования ПС по отношению к уровню цен 2000 г. в САПР [22].

Определение стоимости силовых трансформаторов и ячеек выключателей ВН и НН (блок 2, 3 и 4, **рис. 1**) осуществляется по формулам (1)-(3), исходя из количества и типа оборудования. Источником стоимостных показателей является база данных электрооборудования [23]:

$$K_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^n K_i, \quad (1)$$

где  $K_{\text{тр}}$  – капитальные вложения в силовые трансформаторы;  $K_i$  – стоимость  $i$ -го силового трансформатора;  $n$  – количество силовых трансформаторов,

$$K_{\text{я.ВН}} = \sum_{j=1}^m K_j, \quad (2)$$

где  $K_{\text{я.ВН}}$  – капитальные вложения в ячейки выключателей стороны ВН;  $K_j$  – стоимость  $j$ -й ячейки выключателя стороны ВН;  $m$  – количество ячеек выключателей стороны ВН,

$$K_{\text{я.НН}} = \sum_{p=1}^k K_p, \quad (3)$$

где  $K_{\text{я.НН}}$  – капитальные вложения в ячейки выключателей стороны НН;  $K_p$  – стоимость  $p$ -й ячейки выключателя стороны НН;  $k$  – количество ячеек выключателей стороны НН.

Определение стоимости оборудования подстанции (блок 5, **рис. 1**) осуществляется сложением результатов блока 2, 3 и 4 по выражению

$$K_{\text{обор}} = K_{\text{тр}} + K_{\text{я.ВН}} + K_{\text{я.НН}}, \quad (4)$$

Для определения стоимости строительства подстанции напряжением 220 кВ и выше должны быть учтены затраты на организацию противоаварийной автоматики (блок 6, **рис. 1**). Источником стоимости противоаварийной автоматики является база данных УСП.

Стоимость постоянной части затрат по ПС (блок 7, **рис. 1**) учитывает подготовку и благоустройство территории, ОПУ, устройство собственных нужд ПС, систему оперативного постоянного тока, компрессорную, внутриплощадочное водоснабжение, канализацию и подъездные дороги, средства связи и телемеханики, наружное освещение и ограду. Постоянная часть затрат принимается с учетом схемы электрических соединений и высшего напряжения ПС. Источником стоимости постоянной части затрат является база данных УСП.

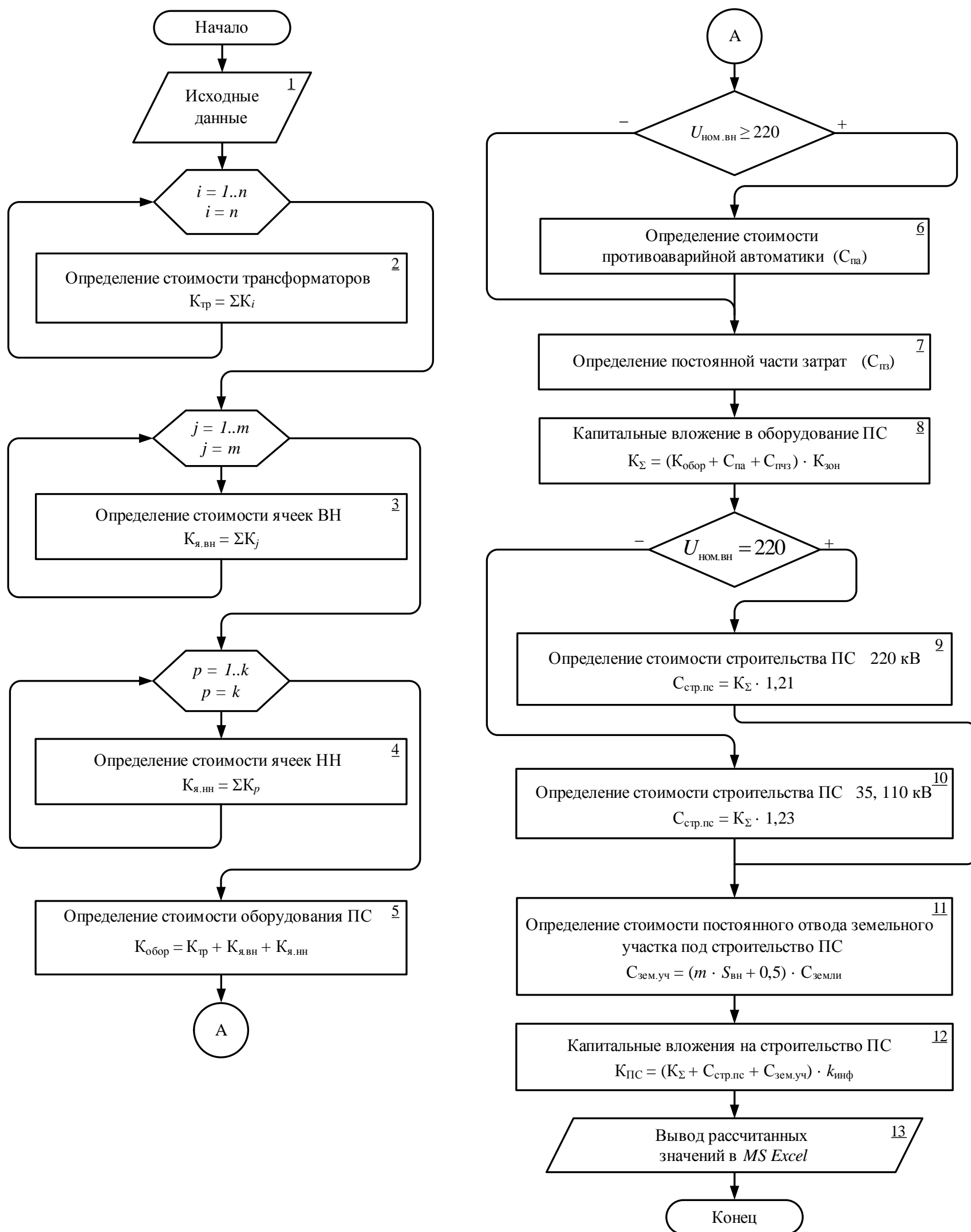


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета капитальных вложений в строительство подстанции напряжением 35 кВ и выше

Определение капитальных вложений в электрооборудование ПС (блок 8, **рис. 1**) осуществляется по (5) с учетом повышающего зонального коэффициента к базисной стоимости электросетевых объектов. Значение повышающего зонального коэффициента зависит от региональной принадлежности подстанции:

$$K_{\Sigma} = (K_{\text{обор}} + C_{\text{па}} + C_{\text{пчз}}) \cdot K_{\text{зон}}, \quad (5)$$

где  $K_{\Sigma}$  – капитальные вложения в оборудование подстанции;  $K_{\text{обор}}$  – стоимость оборудования подстанции;  $C_{\text{па}}$  – стоимость противоаварийной автоматики;  $C_{\text{пчз}}$  – стоимость постоянной части затрат;  $K_{\text{зон}}$  – повышающий зональный коэффициент.

Стоимость строительства подстанции (блок 9 и 10, **рис. 1**) зависит от уровня напряжения, на которое сооружается подстанция, и определяется по выражениям (6) и (7).

Для строительства подстанций на напряжение

220 кВ

$$C_{\text{стр.пс}} = K_{\Sigma} \cdot 1,21. \quad (6)$$

Для строительства подстанций на напряжение 35, 110 кВ

$$C_{\text{стр.пс}} = K_{\Sigma} \cdot 1,23. \quad (7)$$

Стоимость постоянного отвода земельного участка (блок 11, **рис. 1**) для ПС принимается с учетом расчетных значений площади земельного участка под ПС, определяется по формуле (8). Площадь постоянного отвода земельного участка зависит от схемы электрических соединений и напряжения сооружаемой подстанции. Стоимость отчуждаемых земельных участков принимается на основе «Нормативов стоимости освоения новых земель взамен изымаемых сельскохозяйственных угодий для несельскохозяйственных нужд», утвержденных постановлением Правительства РФ от 28.01.1993 г. №77 (с изменениями от 07.05.2003 г.). Источником является нормативная цена земли в субъектах РФ и примерная площадь постоянного отвода земли под подстанции, которая внесена в базу данных УСП:

$$C_{\text{зем.уч}} = (m \cdot S_{\text{вн}} + 0,5) \cdot C_{\text{земли}}, \quad (8)$$

где  $C_{\text{зем.уч}}$  – стоимость постоянного отвода земельного участка;  $S_{\text{вн}}$  – площадь постоянного отвода земельного участка;  $C_{\text{земли}}$  – стоимость отчуждаемых земельных участков.

Суммируя капитальные вложения в электрооборудование, стоимость строительства подстанции и стоимость постоянного отвода земельного участка под строительство, получаем необходимый объем капитальных вложений на строительство подстанции (блок 12, **рис. 1**). После чего производим пересчет стоимости затрат на строительство ПС в индексах цен текущего года по выражению

$$K_{\text{ПС}} = (K_{\Sigma} + C_{\text{стр.пс}} + C_{\text{зем.уч}}) \cdot k_{\text{инф}}, \quad (9)$$

где  $K_{\Sigma}$  – капитальные вложения в оборудование подстанции;  $C_{\text{стр.пс}}$  – стоимость строительства подстанции;  $k_{\text{инф}}$  – коэффициент инфляции относительно 2000 г.

#### АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ИЗДЕРЖЕК

Ежегодные эксплуатационные издержки производства представляют собой сумму всех отчислений и расходов, связанных с эксплуатацией данной электроустановки.

Алгоритм расчета эксплуатационных издержек подстанции приведен на **рис. 2**.

Методика расчета основана на данных, приведенных в [5-6]. Исходные данные для расчета (блок 1, **рис. 2**) предполагают:

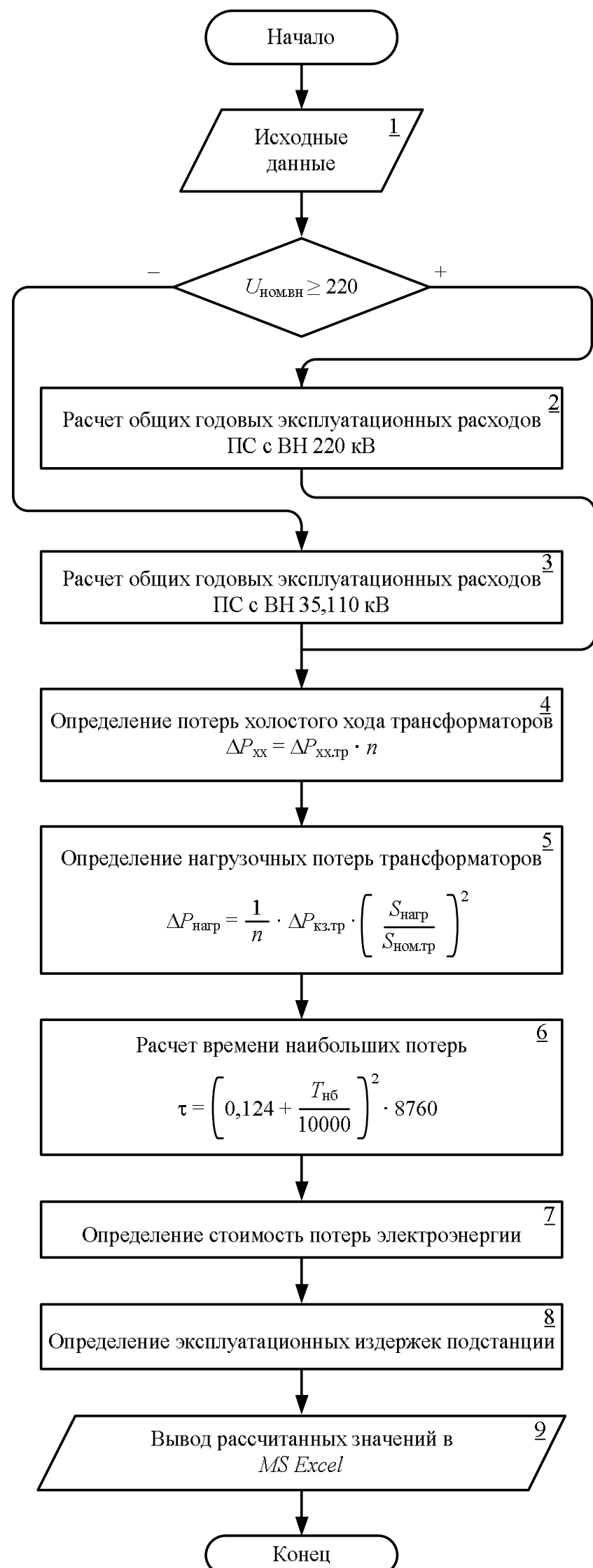
- ручной ввод типа и количества силовых трансформаторов ( $n$ );
- ручной ввод мощности нагрузки трансформатора;
- ручной ввод числа часов использования наибольшей нагрузки и стоимости потерь электроэнергии.

Определение общих годовых эксплуатационных расходов по ПС в зависимости от уровня напряжения (блоки 2 и 3, **рис. 2**) осуществляется по следующим формулам.

Для подстанций с высшим напряжением 220 кВ

$$I_{\text{эксп}} = K_{\text{обор}} \cdot (4,9 + 6,7) / 100, \quad (10)$$

где  $K_{\text{обор}}$  – капитальные вложения в оборудование ПС; 4,9 – отчисления на обслуживание и ремонт в процентах от первоначальных капитальных вложений в оборудование подстанции с высшим напряжением 220 кВ; 6,7 – отчисления на амортизацию в процентах от первоначальных капитальных вложений в оборудование подстанции.





**Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета эксплуатационных издержек подстанции напряжением 35 кВ и выше**

Для подстанций с высшим напряжением 35 и 110 кВ

$$I_{\text{экс}} = K_{\text{обор}} \cdot (5,9 + 6,7) / 100, \quad (11)$$

где 5,9 – отчисления на обслуживание и ремонт в процентах от первоначальных капитальных вложений в оборудование подстанции с высшим напряжением 35 и 110 кВ.

Определение стоимости годовых потерь электроэнергии (блок 7, **рис. 2**) осуществляется по формуле

$$\Delta I_9 = b \cdot (\Delta P_{\text{хх}} \cdot 8700 + \Delta P_{\text{нагр}} \cdot \tau), \quad (12)$$

где  $b$  – стоимость потерянной электроэнергии;  $\Delta P_{\text{хх}}$  – суммарные потери холостого хода трансформаторов;  $\Delta P_{\text{нагр}}$  – суммарные нагрузочные потери трансформаторов;  $\tau$  – время наибольших нагрузок.

Суммируя общие годовые эксплуатационные расходы по ПС и стоимость годовых потерь электроэнергии, получим эксплуатационные издержки (блок 8, **рис. 2**), которые определяются по выражению

$$I = I_{\text{экс}} + \Delta I_9. \quad (13)$$

#### РАСЧЕТ СТОИМОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДСТАНЦИИ С ВН 220 кВ

Осуществим расчет стоимости строительства подстанции по заданным исходным данным приведенным в **табл. 1**.

С использованием разработанным алгоритмов и системы автоматизированного проектирования [22] получим следующие результаты расчета (**табл. 2**).

Вывод результатов расчета осуществляется в среде MS Excel, что позволяет упростить дальнейшую обработку результатов расчетов при необходимости оценки всех возможных вариантов схем распределительного устройства (при условии если схема ВН не задана).

**Таблица 1**  
**Исходные данные для расчета**

Заданное условие	Значение согласно техническому заданию
Месторасположение ПС	Поволжье
Мощность трансформаторов	63 МВА
Тип и количество трансформаторов	2×ТРДЦН-63000/220
Главные схемы электрических соединений	Две рабочие с.ш.
Количество присоединений на стороне ВН	8
ЗРУ-10 кВ - 4-х секционное, рассчитанное на установку 38 ячеек вакуумных выключателей	
ПА принята при количестве присоединений 220 кВ более двух	
Индекс цен по капитальным вложениям на текущий год	5,2995
Стоимость потерь электроэнергии,	2,82

руб./кВт·ч	
Мощность нагрузки, МВА	86
Время наибольших потерь, ч	4600

**Таблица 2**  
**Расчет затрат на строительство подстанции 220 кВ**

Составляющие затрат	Номер блока	Расчет затрат	Величина затрат, тыс. руб.
Стоимость силовых трансформаторов	2, рис.1	2·9800	19600
Стоимость ячеек 110 кВ	3, рис.1	8·12500	100000
Стоимость ячеек 10 кВ	4, рис.1	38·85	3230
Стоимость оборудования ПС	5, рис.1		122830
Противоаварийная автоматика	6, рис.1		1200
Постоянная часть затрат	7, рис.1		52000
Капитальные вложения в оборудование ПС	8, рис. 1		176030
Стоимость строительства ПС с учетом сопутствующих затрат	9, рис. 1	1,21·176030	212996,3
Стоимость постоянного отвода земельного участка (ОРУ и ЗРУ)	11, рис. 1	(1,6·8+0,5)40	532
Капитальные вложения на строительство ПС	12, рис. 1		389558,3
С учетом коэффициента инфляции на 2019 г.		212996,3·5,29	2064464
Издержки на обслуживание и ремонт	2, рис. 2	(4,9+6,7) 2064464	239477,8
Издержки на потерю электроэнергии	7, рис. 2	2,82 (2 70 8760+4600 0,5 266(86/63) <sup>2</sup> )	6673,39
Эксплуатационные издержки	8, рис. 2	239477,8+ 6673,99	6912876,29

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные алгоритмы определения капитальных вложений в строительство и издержек на эксплуатацию подстанций напряжением 35 кВ и выше адаптированы к САПР «ОРУ САД» и к указанной базе данных электрооборудования и позволяют осуществлять автоматизированный расчет экономических показателей, необходимых при оценке инвестиций.

В перспективе разработанный подход позволит осуществлять технико-экономические сопоставление возможных, с точки зрения норм и правил проектирования объектов, вариантов схем распределительных устройств исследуемых электроустановок.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00115.**

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Belyaev L.S., Marchenko O.V., Filippov S.P., Solomin S.V., Stepanova T.B., Kokorin A.L. World energy and transition to sustainable development. Boston/Dordrecht/London, Kluwer Academic Publ., 2002. 276 p.
2. Häfele W., Program Leader. Energy in a finite world: a

- global systems analysis. Cambridge, Massachusetts: Ballinger Publ. Comp., 1981.
3. Stepanov V.S., Suslov K.V., Chebotnyagin L.M., Moskalenko N.S., Styczynski Z.A. The market approach of demand management in the power system. IEEE Pes Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2012, DOI: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465747.
4. Eroshenko S.A., Samoylenko V.O., Pazderin A.V., Bannykh P.Y. Power system zoning for distributed generation implementation forecasting. 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2016, 2016, DOI: 10.1109/RTUCON.2016.7763100.
5. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
6. Справочник по проектированию электрических сетей / Карапетян И.Г., Файбисович Д.Л., Шапиро И.М. М.: ЭНАС, 2012. 376 с.
7. Электрические сети и энергосистемы: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Караев Р.И., Волобринский С.Д., Ковалев Н.Н. М.: Транспорт, 1988. 326 с.
8. Герасименко, А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. М.: Феникс, 2008. 715 с.
9. Геркусов А.А., Макаров В.М. Техно-экономическое обоснование выбора параметров и режимов работы проектируемых линий электропередачи // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 2. С. 66-73.
10. Бурлов Ю.А. Техно-экономическое обоснование применения комплектных трансформаторных подстанций 6–220 кВ // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. 2017. № 3 (448). С. 341.
11. Варганова А.В. Техно-экономические расчеты в электроэнергетике: учеб. пособие. М.: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 57 с.
12. Техно-экономические расчеты распределительных электрических сетей: учеб. пособие / Хорольский В.Я., Таранов М.А., Петров Д.В. Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2010. 108 с.
13. Техно-экономическая эффективность модернизации распределительных электрических сетей: учеб. пособие / Хорольский В.Я., Таранов М.А., Петров Д.В. Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2010. 132 с.
14. Гулидов С.С. Техно-экономическая характеристика сельских электрических сетей // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». 2009. №8-1 (39). С. 100-101.
15. Сталович В.В., Радкевич В.Н. Техно-экономическая оценка трансформаторных подстанций напряжением 6-10/0,4 кВ с различными типами высоковольтных распределительных устройств // Энергетика. 2011. №3. С. 26-40.
16. Khrumshin T.R., Abdulvelev I.R., Kornilov G.P., Krubcov D.S. Electromagnetic compatibility of high power statcom in asymmetrical conditions. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON – Proceedings, 2015, DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7146966.
17. Лещинская Т.Б., Князев В.В. Многокритериальная оценка техно-экономического состояния распределительных электрических // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». 2010. № 2 (41). С. 14-19.
18. Лачков Г.Г. О критериях оценки вариантов развития системообразующей электрической сети // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. № 2 (133). С. 123-130.
19. Близнюк Д.И., Плясунов А.О., Халысмаа А.И. Экономическое сравнение электропередач для связи Урал – Сибирь // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2014. № 4. С. 27-30.
20. Трубицын В.Н., Неклепаев Б.Н. Техно-экономическое обоснование выбора структурных схем и схем распределительных устройств электростанций: монография. М.: МЭИ (ТУ), 2004. С. 46.
21. Малинина Т.В. Проблема выбора удельных показателей стоимости энергетического оборудования в условиях инфляции // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. №1-2 (163). С. 61-64.
22. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2018660517 Российская Федерация, ОРУ CAD / Варганова А.В., Панова Е.А., Хатюшина Т.В., Кононенко В.С., Багаева Х.М.; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2018618175; заявл. 30.07.2018; опубл. 23.08.2018.
23. Разработка базы данных электрооборудования 35-220 кВ для САПР "ОРУ CAD" / Варганова А.В., Панова Е.А., Хатюшина Т.В., Кононенко В.С., Багаева Х.М. // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2 (39). С. 28-33.

Поступила в редакцию 09 января 2019 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### CALCULATION OF ECONOMIC COMPONENTS OF TARGET FUNCTION OF THE ALGORITHM FOR DETERMINING THE OPTIMAL OPTION OF SCHEME OF SUBSTATIONS DISTRIBUTION DEVICE WITH THE HIGH VOLTAGE OF 35 kV AND ABOVE

Evgeniya A. Panova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ea.panova@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9392-3346>.

Aleksandr S. Irikhov

Student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: irihovalexandr@gmail.com.

Irina A. Dubina

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

Nikolay T. Patshin

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

The design of the electrical part of the switchgear of substations is mainly carried out without taking into account the economic components and the projects in this case must comply only with regulatory documents. The exclusion of economic factors from consideration when designing switchgears for substations is also due to the lack of time for a design engineer involved in the development of large-scale project documentation and additional calculations under the conditions suitable for the end of the project execution period completely exclude the possibility of integrated accounting of all factors when choosing a switchgear circuit. The paper proposes an approach to determine some of the economic components of the costs for the design, construction, installation, commissioning and operation of switchgears for substations of 35 kV and above. The developed algorithm is adapted to the conditions of computer-aided design "ORU CAD", which allows for the development and documentation of the design of switchgear substations with the possibility of taking into account economic indicators. This article provides algorithms for calculating only economic indicators (capital investment, repair and maintenance costs) of substation switchgears. In the future, it is planned to develop an algorithm for determining the economic damage from the interruption of the power supply to external sources of load, which is powered by the designed substation, and its implementation in the specified CAD system. The developed algorithm for determining the economically viable options for the substation switchgear scheme meets the requirements of the norms and rules for the design of these power industry facilities. The results of the work are applicable as an automated workstation of the electrical engineer of a design organization.

**Keywords:** computer-aided design, techno-economic justification, accounts, capital investment, supply interruption costs, escalation, objective function, optimization, discounted costs.

#### REFERENCES

1. Belyaev L.S., Marchenko O.V., Filippov S.P., Solomin S.V., Stepanova T.B., Kokorin A.L. World energy and transition to sustainable development. Boston/Dordrecht/London, Kluwer Academic Publ., 2002. 276 p.
2. Häfele W., Program Leader. Energy in a finite world: a global systems analysis. Cambridge, Massachusetts: Ballinger Publ. Comp., 1981.
3. Stepanov V.S., Suslov K.V., Chebotnyagin L.M., Moskalenko N.S., Styczynski Z.A. The market approach of demand management in the power system. IEEE Pes Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2012. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465747
4. Eroshenko S.A., Samoylenko V.O., Pazderin A.V., Bannykh P.Y. Power system zoning for distributed generation implementation forecasting. 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2016, 2016, DOI: 10.1109/RTUCON.2016.7763100.
5. Idelchik V.I. *Elektricheskie sistemy i seti: ucheb.dlya vuzov* [Electrical systems and networks: textbooks for universities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 592 p. (In Russian)
6. Karapetyan I.G., Fajbisovich D.L., Shapiro I.M. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setej* [Handbook of electrical network design]. Moscow, ENAS Publ., 2012, 376 p. (In Russian)
7. Karaev R. I., Volobrinskij S. D., Kovalev N.N. *Elektricheskie seti i energosistemy: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta* [Electrical networks and power systems: a textbook for universities of railway transport]. Moscow, Transport Publ., 1988, 326 p. (In Russian)
8. Gerasimenko, A.A., Fedin V.T. *Peredacha i raspredelenie elektricheskoy energii* [Transmission and distribution of electrical energy]. Moscow, Feniks Publ., 2008. 715 p. (In Russian)
9. Gerkusov A.A., Makarov V.M. Feasibility study of the choice of parameters and operating modes of the designed power lines. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. [Bulletin of the Ivanovo State energy University], 2016, no. 2, pp. 66-73. (In Russian)
10. Burlov YU.A. Feasibility study on the use of 6–220 kV package transformer substations. *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika* [Radio electronics, electrical engineering and power engineering], 2017, no. 3 (448), p. 341. (In Russian)
11. Varganova A.V. *Tekhniko-ekonomicheskie raschety v elektroenergetike: ucheb.posobie* [Technical and economic calculations in the electric power industry: textbook]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2016, 57 p.
12. Horolsky V.YA., Taranov M.A., Petrov D.V. *Tekhniko-ekonomicheskie raschety raspredelitelnykh elektricheskikh setej: ucheb.posobie* [Technical and economic calculations of distribution electrical networks: study guide.]. Stavropol, Stavropol State Agrarian University Publ., 2010, 108 p. (In Russian)
13. Horolsky V.YA., Taranov M.A., Petrov D.V. *Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost modernizatsii raspredelitelnykh elektricheskikh setej: ucheb.posobie* [Technical and economic efficiency upgrade of electricity distribution networks]. Stavropol, Stavropol State Agrarian University Publ., 2010, 132 p. (In Russian)
14. Gulidov S.S. Technological characteristics of agricultural electric networks. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo agroinzhenernogo universiteta im. V.P. Goryachkina* [Bulletin of the Moscow State Agro-engineering University named after V.P. Goryachkin], 2009, no. 8-1 (39), pp. 100-101. (In Russian)
15. Stalovich V.V., Radkevich V.N. Technical and Economic Assessment of 6-10/0.4 kV Transformer Sub-Stations with Various Types of High-Voltage Switchgear. *Energetika* [Power industry], 2011, no. 3, pp. 26-40. (In Russian)
16. Khramshin T.R., Abdulvelev I.R., Kornilov G.P., Krubcov D.S. Electromagnetic compatibility of high power statcom in asymmetrical conditions. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON – Proceedings, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7146966.
17. Leshchinskaya T.B., Knyazev V.V. Multicriteria estimation of a technical and economic status of distributive electrical networks. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo agroinzhenernogo universiteta im. V.P. Goryachkina* [Bulletin of the Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin], 2010, no. 2 (41), pp. 14-19. (In Russian)
18. Lachkov G.G. On evaluation criteria for backbone electrical network development variants. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2018, no. 2 (133), pp. 123-130.

- (In Russian)
19. Bliznyuk D.I., Plyasunov A.O., Khalyasmaa A.I. Economical comparison of power transmissions for Ural - Siberia connection. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2014, no. 4, pp. 27-30. (In Russian)
  20. Trubicyn V.N., Neklepaev B.N. *Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie vybora strukturnyh skhem i skhem raspredelitel'nyh ustroystv elektrostancij* [Feasibility study of the choice of structural diagrams and distribution devices of power plants]. Moscow, MEI (TU) Publ., 2004. 46 p. (In Russian)
  21. Malinina T.V. The problem of choice of the unit cost indicators of energy equipment in terms of inflation. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [St. Petersburg State Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology], 2013, no. 1-2 (163), pp. 61-64. (In Russian)
  22. Varganova A.V., Panova E.A., Hatyushina T.V., Kononenko V.S., Bagaeva H.M.; ORU CAD [ORU CAD]. Software registration RF, no. 2018618175, 2018.
  23. Varganova A.V., Panova E.A., Hatyushina T.V., Kononenko V.S., Bagaeva H.M. Development of Electrical Equipment Database of 35-220 kV for "ORU CAD". *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2 (39), pp. 28-33.

Панова Е.А., Ирихов А.С., Дубина И.А., Патшин Н.Т. Расчет экономических составляющих целевой функции алгоритма определения оптимального варианта схемы распределительного устройства подстанции с высшим напряжением 35 кВ и более // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 1(42). С. 4-11. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-4-11)

Panova E.A., Irikhov A.S., Dubina I.A., Patshin N.T. Calculation of Economic Components of Target Function of the Algorithm for Determining the Optimal Option of Scheme of Substations Distribution Device with the High Voltage of 35 kV and Above. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 4-11. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-4-11)

Паздерин А.В., Чусовитин П.В., Шабалин Г.С.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

## ПОИСК БЛИЖАЙШЕГО ПРЕДЕЛЬНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОГО МЕТОДА НЬЮТОНА

В статье представляется альтернативный подход для определения границ области существования режима. Определение границ области существования режима необходима для оценки минимального имеющегося запаса по устойчивости. Минимальный запас по устойчивости – это основной критерий, применяемый Системными Операторами, чтобы обеспечивать управляющие воздействия для поддержания устойчивости электроэнергетической системы. Предлагаемый в статье метод является прямым, но обладает преимуществом над традиционными прямыми методами. Он основан на оптимизационной процедуре и позволяет оценить расстояние до границы области существования режима. Описываемый подход основан на использовании обобщенного метода Ньютона и суммы квадратов невязок уравнений установившегося режима. В статье представлена концепция разработанного метода на простых моделях электроэнергетических систем (PV-узел – шины бесконечной мощности, 2 PV-узла – шины бесконечной мощности). Особое внимание в статье уделяется вопросу сходимости предложенного метода.

**Ключевые слова:** устойчивость электроэнергетических систем, критерии устойчивости, апериодическая статическая устойчивость, запас устойчивости, противоаварийное управление.

### ВВЕДЕНИЕ

Функционирование современной интеллектуальной электроэнергетической системы невозможно без выполнения требований по качеству и надежности. Одним из основных показателей надежности энергосистемы является обеспечение нормативных запасов по статической устойчивости в нормальных и послеаварийных режимах. Нормативные запасы используются Системными Операторами разных стран для оценки устойчивости энергосистемы и определения управляющих воздействий для ее обеспечения. Для оценки запасов необходимо определять ближайшие предельные режимы для каждого из исследуемых режимов.

Существующие методы для определения ближайшего предельного режима можно разделить на две группы: прямые методы, связанные с решением оптимизационной задачи [1, 2], подходы, основанные на использовании левого собственного вектора вырожденной матрицы Якоби в предельном режиме [3], и методы, основанные на последовательном утяжелении [4]. В мировой практике более широко распространен метод утяжеления [5, 6]. Кроме перечисленных выше методов для оценки устойчивости все активнее применяется модификация метода, основанного на анализе собственных чисел линеаризованной динамической модели энергосистемы [7-9]. Анализ динамической модели позволяет оценивать как апериодическую, так и колебательную устойчивость. Данный подход успешно применяется для анализа устойчивости распределенной генерации [10].

Прямые методы анализа статической устойчивости заключаются в решении оптимизационных задач. Существуют различные целевые функции, используя которые с различной степенью достоверности и точности можно найти ближайший предельный режим.

Метод утяжеления при поиске предельного режима заключается в изменении узловых мощностей в заданном режиме до достижения границы области суще-

ствования режима и зависит от экспертной оценки наиболее вероятного направления изменения мощностей. Зависимость от заданного направления изменения режима может привести к неточному определению запаса по статической устойчивости.

Методы, основанные на утяжелении, являются удобными для оценки устойчивости «офлайн», однако вычислительно «затратными» для их использования в противоаварийном управлении, требующем оценки статической устойчивости «онлайн». Конечно, существуют различные модификации метода утяжеления для ускорения процедуры оценки запаса по устойчивости онлайн [11, 12]. Эти методы основаны на использовании аппроксимации PV-кривых [11] или на применении нейронных сетей [12], однако они не всегда приемлемы для задач противоаварийного управления.

В этой связи можно предположить, что прямые методы будут лучшим инструментом решения задачи поиска ближайшего предельного режима, но обычные прямые методы [13, 14] не слишком надежны вследствие проблемы начальных приближений и других сложностей [4]. Поэтому необходимо предложить такую процедуру, которая позволит решить обозначенные выше проблемы, обеспечит надежное определение ближайшего предельного режима.

В статье предлагается метод поиска ближайшего предельного режима, основанный на использовании целевой функции – суммы квадратов невязок уравнений установившегося режима. Представляемый подход включает в себя определение начальных условий и использование усовершенствованного обобщенного метода Ньютона для надежного определения ближайшего предельного режима. Разрабатываемый метод может применяться для оценки запаса по устойчивости «онлайн» благодаря его высоким эксплуатационным качествам при поиске предельного режима. Метод был протестирован на моделях различных энергосистем для поиска установившегося и предельных режимов и продемонстрировал высокую сходимость к искомым режимам.



# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ

Авторским коллективом поиск ближайшего предельного режима предлагается осуществлять с помощью прямого метода решения оптимизационной задачи. Евклидово расстояние в пространстве мощностей от режимной точки до границы области существования режима используется для поиска предельного режима, на основании его величины делается вывод о близости границы к режимной точки. Представленные в статье исследования представляют собой развитие традиционного направления исследований Уральской электроэнергетической научной школы [15-17].

В качестве целевой функции используется сумма квадратов невязок уравнений установившихся режимов. То есть математически целевую функцию можно записать как

$$\Phi = \bar{F}(x, y)^T \cdot \bar{F}(x, y), \quad (1)$$

где  $\bar{F}(x, y)$  – вектор невязок уравнений установившегося режима (УУР);  $x$  – вектор параметров режима (действующих значений и углов напряжений);  $y$  – вектор заданных переменных (узловых мощностей и напряжения PV-узлов).

Для систем, состоящих из одних генераторов, используются только невязки по активной мощности, а в вектор параметров режима входят только углы. В случае системы с PQ-узлами целевая функция может быть записана в соответствии с (1); без учета постоянства тангенса  $\phi$  нагрузки целевая функция представляет собой квадрат невязок УУР по активной и по реактивной мощностям для всех PQ-узлов, а также по активной мощности для PV узлов.

**Рис. 1** иллюстрирует предельный режим (БПР) для трехузловой схемы, который можно определить с помощью данной функции, ближайший в евклидовой метрике. Как видно, БПР будет соответствовать ближайшей к установившемуся режиму точке касания окружностью равного уровня границы области существования режима.

Рассмотрим на примере простейшей схемы PV-узел – шины бесконечной мощности (балансирующий узел, далее – ШБМ) целевую функцию и экстремумы. Схема такой энергосистемы приведена на **рис. 2**. Параметры простейшей энергосистемы: напряжения PV-узла ( $U_{\text{ген}}$ ) и ШБМ ( $U_{\text{сист}}$ ) 110 кВ, индуктивное сопротивление связи  $x_{\text{св}}$  составляет 10 Ом, пределы по реактивной мощности у PV-узла отсутствуют.

Для данной схемы можно записать следующие уравнения узлового напряжения и целевой функции:

$$\bar{F} = \frac{U_{\text{сист}} U_{\text{ген}}}{x_{\text{св}}} \sin \delta - P_{\text{ген}}; \quad (2)$$

$$\Phi = \left( \frac{U_{\text{сист}} U_{\text{ген}}}{x_{\text{св}}} \sin \delta - P_{\text{ген}} \right)^2, \quad (3)$$

где  $\delta$  – угол между напряжениями генератора и системы.

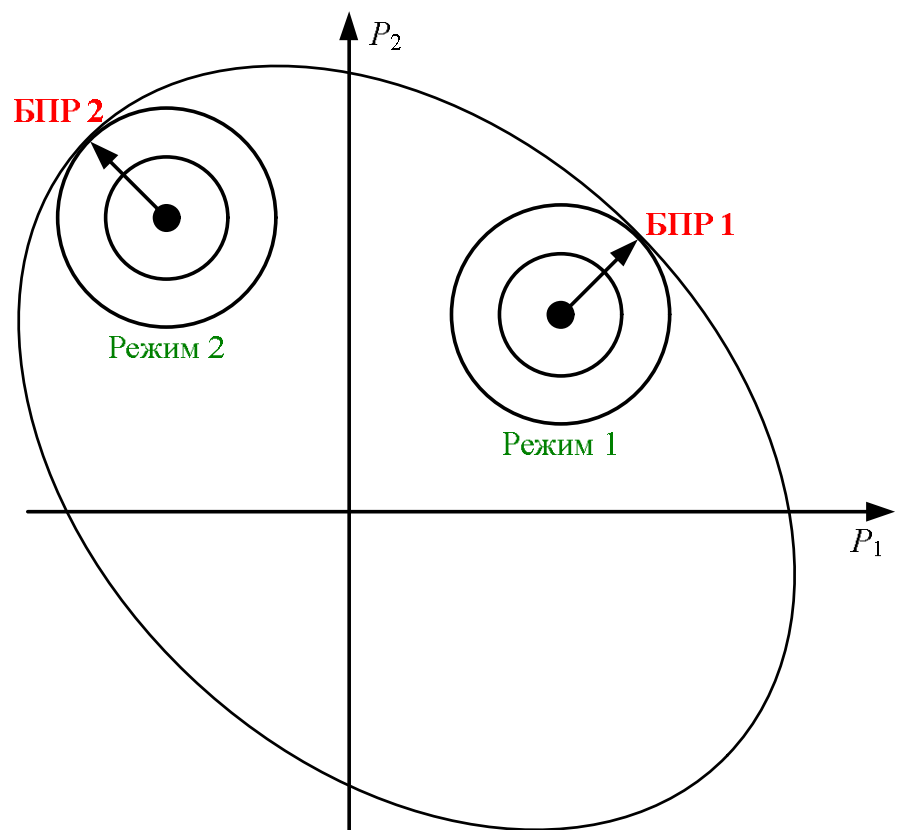


Рис. 1. Иллюстрация оценки БПР

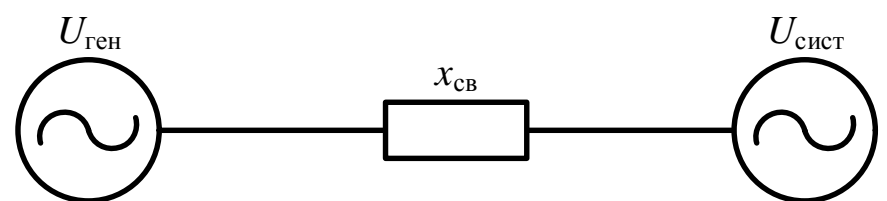


Рис. 2. Схема энергосистемы PV-узел – ШБМ

Задав в качестве генерации в PV-узле 400 МВт, были построены графики невязки УУР и целевой функции в зависимости от угла  $\delta$ , представленные на **рис. 3**. Как видно из него, точкам устойчивого и неустойчивого равновесия (1 и 3) соответствуют локальные минимумы целевой функции  $\Phi$ . Точка 2 (максимум пропускной способности сети) совпадает с одним из максимумов целевой функции.

Для нахождения интересующего экстремума, соответствующего максимуму пропускной способности сети, предполагается использовать обобщенный метод Ньютона. Рекуррентная процедура в рамках данного метода для обсуждаемой простейшей энергосистемы может быть записана следующим образом:

$$\Delta x_i f''^{(i-1)} = f'^{(i-1)}, \quad (4)$$

где изменение параметра на итерации  $\Delta x_i = x_{i-1} - x_i$ ;  $f'^{(i-1)}$  – первая производная целевой функции  $\Phi$ , вычисленная на итерации  $i-1$ ;  $f''^{(i-1)}$  – вторая производная целевой функции  $\Phi$ , вычисленная на итерации  $i-1$ .

Для рассматриваемой энергосистемы первая и вторая производные целевой функции  $\Phi$  можно записать в следующем виде:

$$f' = \left( \frac{U_{\text{сист}} U_{\text{ген}}}{x_{\text{св}}} \right)^2 \sin 2\delta - \frac{2P_{\text{ген}} U_{\text{сист}} U_{\text{ген}}}{x_{\text{св}}} \cos \delta; \quad (5)$$

$$f'' = 2 \left( \frac{U_{\text{сист}} U_{\text{ген}}}{x_{\text{св}}} \right)^2 \cos 2\delta + \frac{2P_{\text{ген}} U_{\text{сист}} U_{\text{ген}}}{x_{\text{св}}} \sin \delta. \quad (6)$$



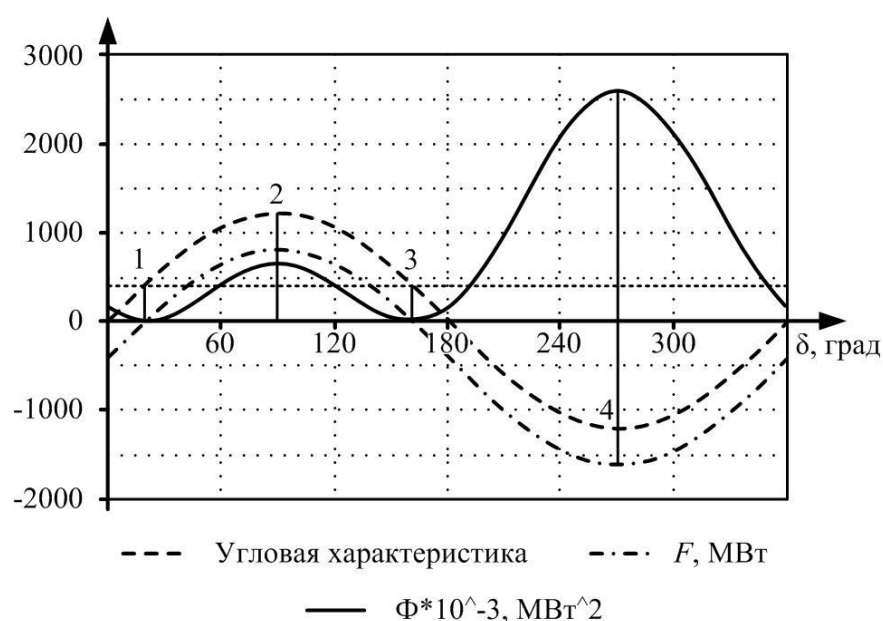


Рис. 3. Угловая характеристика и целевая функция для энергосистемы PV-узел – ШБМ

Графики первой и второй производной целевой функции от угла между векторами напряжений генератора и системы (при генерации 400 МВт) приведены на рис. 4. Также на нем приведены зоны сходимости к различным экстремумам в зависимости от знаков производных (зоны выделены черным цветом). Как можно увидеть, для достижения предельного с точки зрения возможной передачи мощности от генератора в систему режима в качестве начальных условий необходимо использовать угол из достаточно узкого диапазона, что значительно затрудняет задачу поиска предельного режима. Однако если в итерационную процедуру ввести контроль знака второй производной в форме

$$\begin{cases} f'' > 0, & x_i = x_{i-1} + \Delta x_i; \\ f'' < 0, & x_i = x_{i-1} - \Delta x_i, \end{cases} \quad (7)$$

то можно добиться значительного увеличения зоны сходимости к искомому экстремуму целевой функции. Из любого, незначительно утяжеленного по сравнению с исходными 400 МВт генерации, режима можно достичь предельного режима с точки зрения выдачи мощности генератором (новые зоны сходимости изображены на графике внизу).

Еще один способ достижения предельного режима, который не содержит контроля знака второй производной целевой функции  $f''$  в итерационной процедуре, заключается в использовании в качестве начальных условий параметров какого-либо установившегося режима для рассматриваемой системы, а в качестве заданной узловой мощности (хотя бы для одного узла) заведомо недостижимого значения (запредельного, то есть явно находящегося за границами области существования режима в пространстве мощностей). Для тестовой схемы PV-узел – ШБМ для наглядной демонстрации второго подхода зададим генерацию в узле PV 1400 МВт. При этом графики невязки УУР и целевой функции представлены на рис. 5. Как можно увидеть, у целевой функции остается только 2 экстремума: предельному режиму с точки генерации активной мощности соответствует минимум целевой функции, а потенциально возможному максимуму потребления соответствует максимум  $\Phi$ .

Для завышенного значения генерации графики первой и второй производной целевой функции будут выглядеть так, как показано на рис. 6. Как видно из представленных на нем областей сходимости, параметры, соответствующие установившимся режимам с выдачей генерации в сеть, попадают в область притяжения к пределу по выдаче генерирующей мощности.

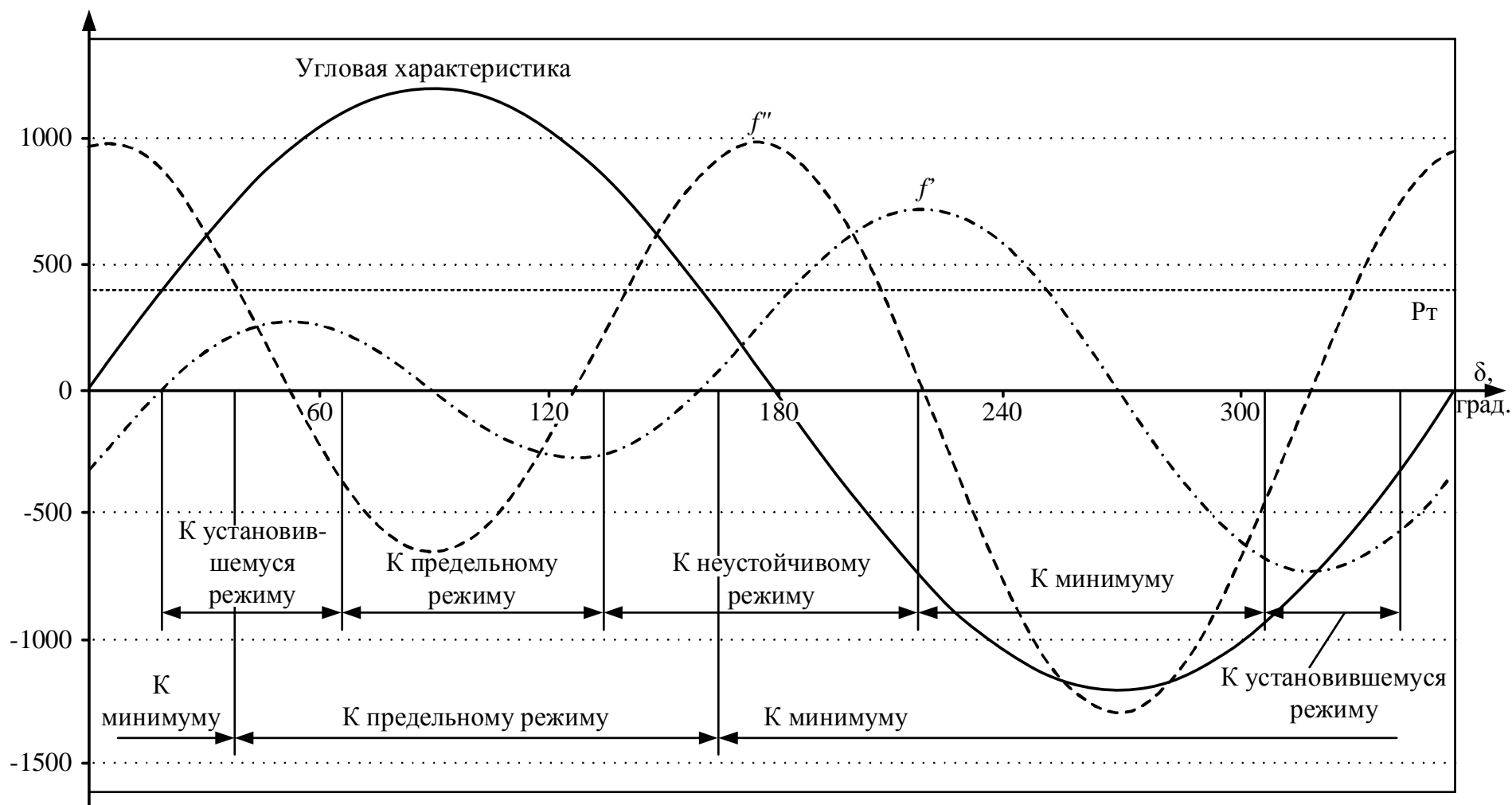


Рис. 4. Области сходимости с учетом и без учета контроля знака второй производной целевой функции

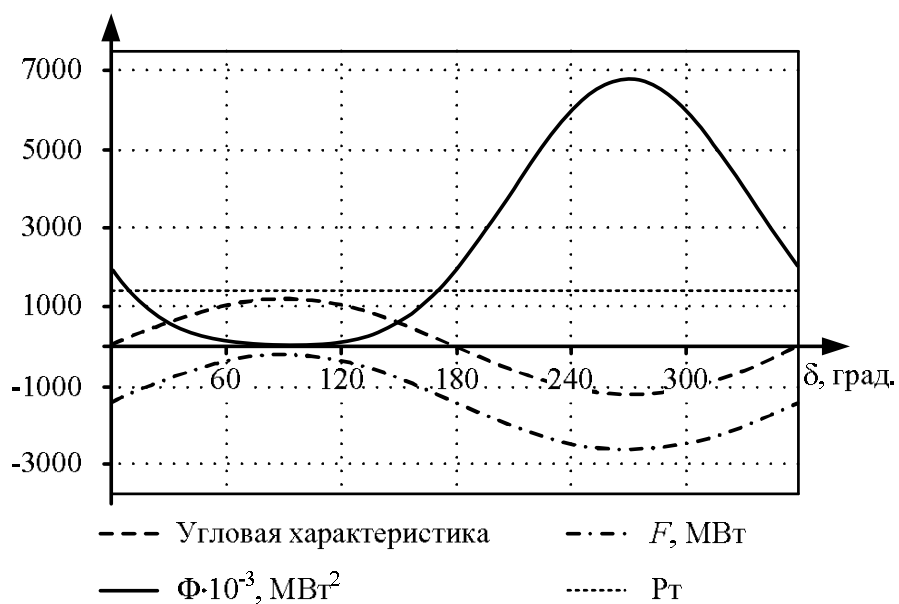


Рис. 5. Угловая характеристика и целевая функция для энергосистемы PV-узел – ШБМ с запредельной величиной мощности генерации

При оценке области сходимости к искомому экстремуму необходимо учитывать недопустимость чрезмерно больших шагов в ходе итерационного процесса, так как в их результате можно выйти за границы области притяжения интересующего экстремума даже при наличии подходящих начальных условий.

Предотвратить данную проблему можно с помощью использования ограничения по максимальной величине шага (сделать это можно, как ограничив абсолютную величину шага, так и относительную величину (за базу принимая величину параметров режима на шаге  $i-1$ )).

При переходе к многомерному случаю ближайшему предельному режиму целевой функции (1) будет соответствовать седловая точка, так как значение целевой функции будет возрастать до достижения границы области существования режима, а по ее достижению – убывать. При этом БПР будет соответствовать точке касания линии равного значения целевой функции гра-

нице области существования режима. При переходе к многомерному случаю по аналогии с (4) рекуррентная формула для итерационной процедуры поиска экстремума целевой функции, соответствующего ближайшему предельному режиму, будет выглядеть следующим образом:

$$\mathbf{H}^{(i-1)} \Delta \bar{\mathbf{x}}_i = \nabla^{(i-1)}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{H}$  – матрица вторых производных целевой функции по параметрам режима  $\bar{\mathbf{x}}_i$ ;  $\bar{\mathbf{x}}_i$  – вектор параметров режима (углов для всех PV и PQ-узлов, а также напряжения PQ-узлов);  $\nabla$  – градиент (вектор первых производных по параметрам режима  $\bar{\mathbf{x}}_i$ ) целевой функции.

Для обеспечения надежной сходимости итерационной процедуры, по аналогии с изменением итерационной процедуры для энергосистемы PV-узел-ШБМ, при заданных начальных узловых мощностях внутри области существования режима, предлагается использовать следующее выражение:

$$\begin{cases} X_{n+1} = X_n - \Delta X_{n+1}, \\ \text{если матрица } \mathbf{H} \text{ положительно или} \\ \text{отрицательно определена;} \\ X_{n+1} = X_n + \Delta X_{n+1}, \\ \text{если матрица } \mathbf{H} \text{ знаконеопределенная,} \end{cases} \quad (9)$$

то есть изменение вносится в итерационную процедуру на основании критерия Сильвестра. Этот критерий говорит о том, что в окрестности максимума матрица  $\mathbf{H}$  отрицательно определена, в окрестностях минимума эта же матрица положительно определена, а вблизи седловой точки матрица Гессе знаконеопределенная.

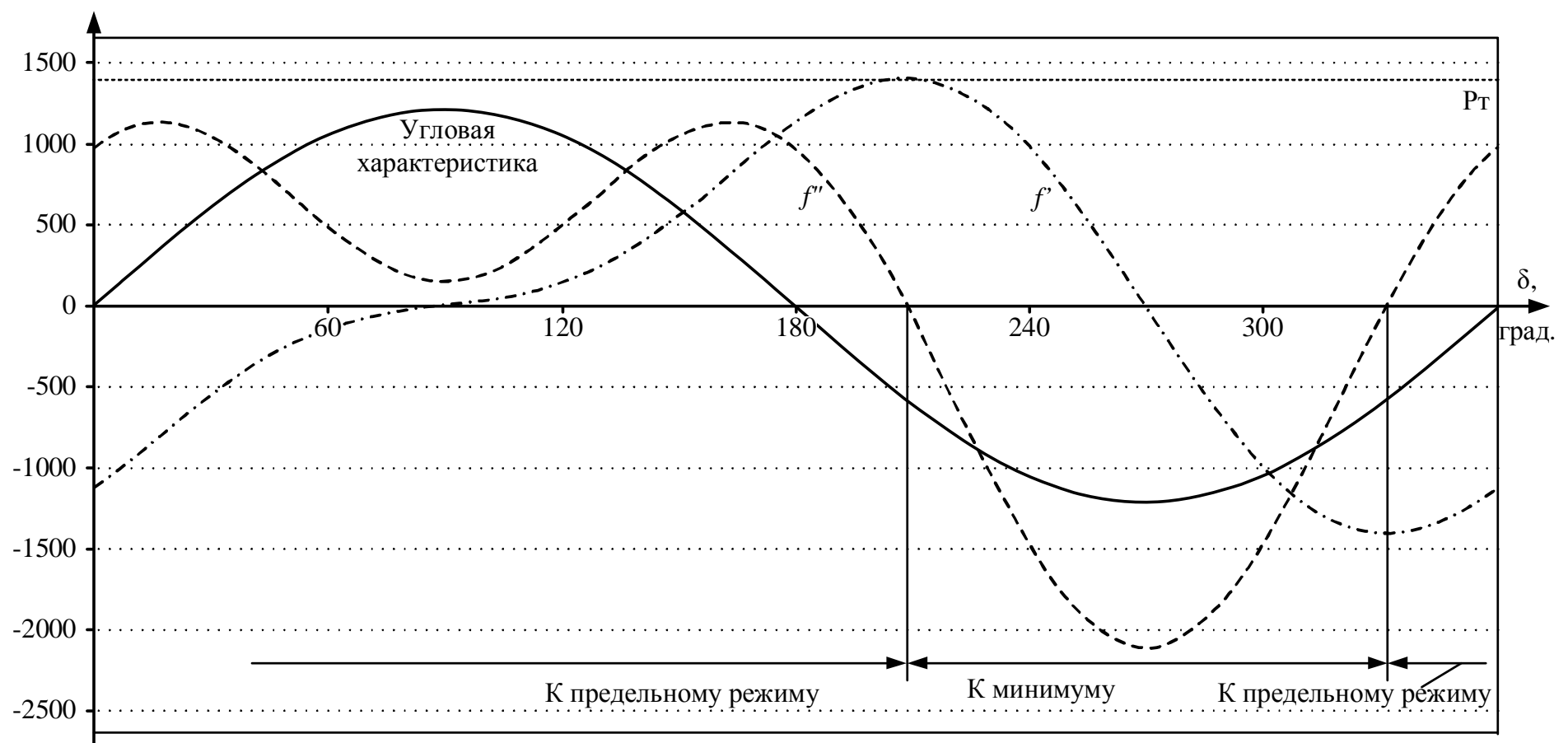


Рис. 6. Области сходимости для энергосистемы PV-узел – ШБМ с запредельной величиной мощности генерации

Также для обеспечения сходимости предлагается использовать укорочение шага итерации: либо ограничив абсолютную величину шага, либо относительную (за базу принимая величину параметров режима на шаге  $i-1$ ).

Рассмотренный выше подход исследовался на примере трехузловой энергосистемы и был представлен в статье [18]. Тестирование производилось для схемы, представленной на **рис. 7**. Параметры схемы следующие:  $z_{12} = z_{13} = z_{23} = 5 + j20$  Ом, емкостная проводимость каждой линии 130 мкСм, напряжения генераторов и системы – 231 кВ. При этом мощность первого генератора в установившемся режиме равна 300 МВт, а второго – 600 МВт. Для трехузловой схемы целевая функция  $\Phi$  может быть записана в виде

$$\Phi(\delta_1, \delta_2) = f_{Gen1}^2(\delta_1, \delta_2) + f_{Gen2}^2(\delta_1, \delta_2). \quad (10)$$

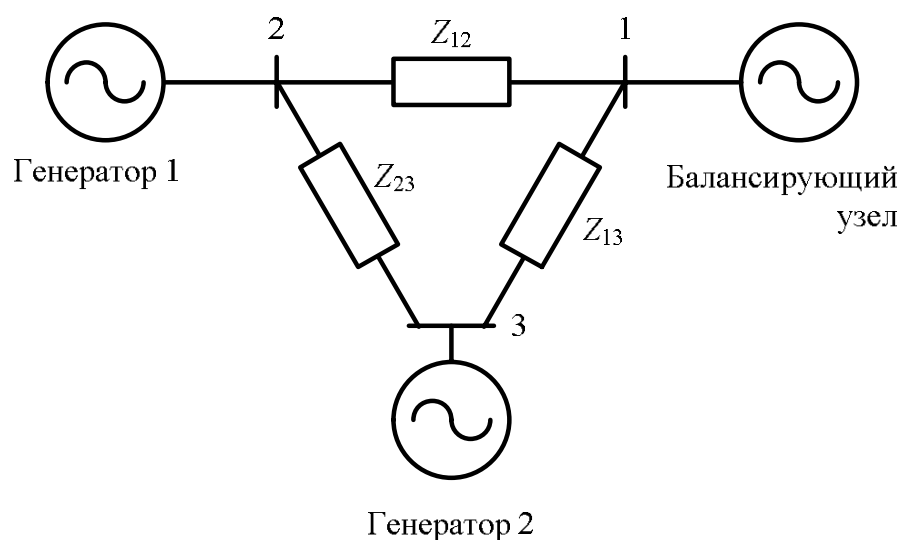


Рис. 7. Трехузловая система

Соответствующий целевой функции (10) при заданном начальном режиме контурный график показан на **рис. 8**. На нем легко можно увидеть, что минимум целевой функции соответствует точке установившегося режима, седловые точки соответствуют ближайшим точкам на границе области существования режима (с разных ее сторон), а два локальных максимума – это две наиболее удаленные от установившегося режима точки на границе области существования режима.

Данные свойства (экстремумы) указывают на возможность применения целевой функции для нахождения ближайшего предельного режима для сложных энергосистем. Главная проблема при этом поиске заключается в том, чтобы обеспечить сходимость к седловой точке, а не к минимуму или максимуму. Описанные ранее модификации обобщенного метода Ньютона позволяют добиться достаточно надежной сходимости к искомому ближайшему предельному режиму (седловой точке).

На **рис. 9** представлена область сходимости предлагаемого метода для трехузловой схемы. Любые начальные условия из нее будут приводить нас в седловую точку, которая соответствует ближайшему предельному режиму. Можно отметить, что область сходимости имеет достаточно большие размеры, охватывает заметную часть пространства углов. Другая важная деталь, которую нужно отметить: точка установившегося режима не входит в эту область. Однако даже небольшое смещение в сторону от этой точки обеспечивает надежную сходимость к точке ближайшего предельного режима, что подтверждает применимость разработанного подхода.

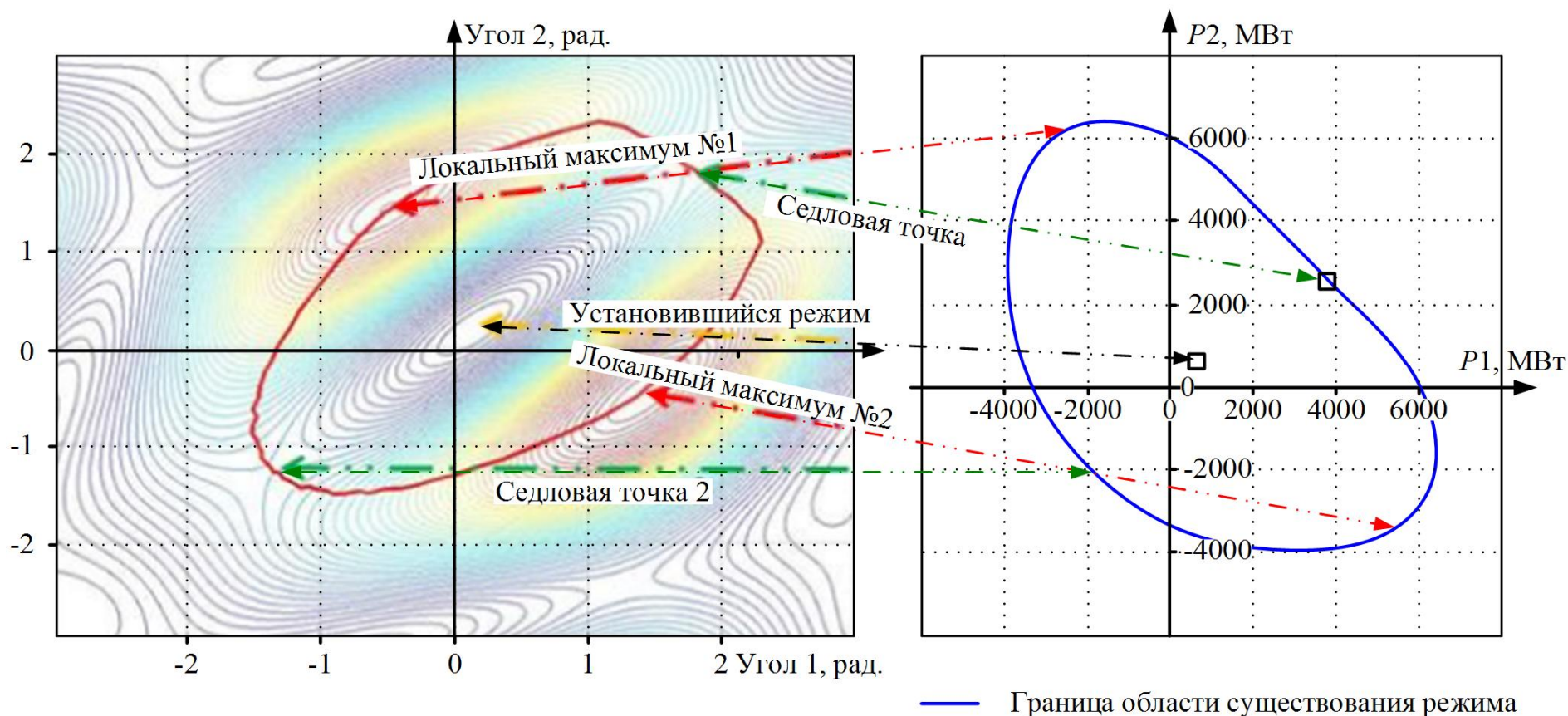


Рис. 8. Целевая функция для системы PV-узел-ШБ



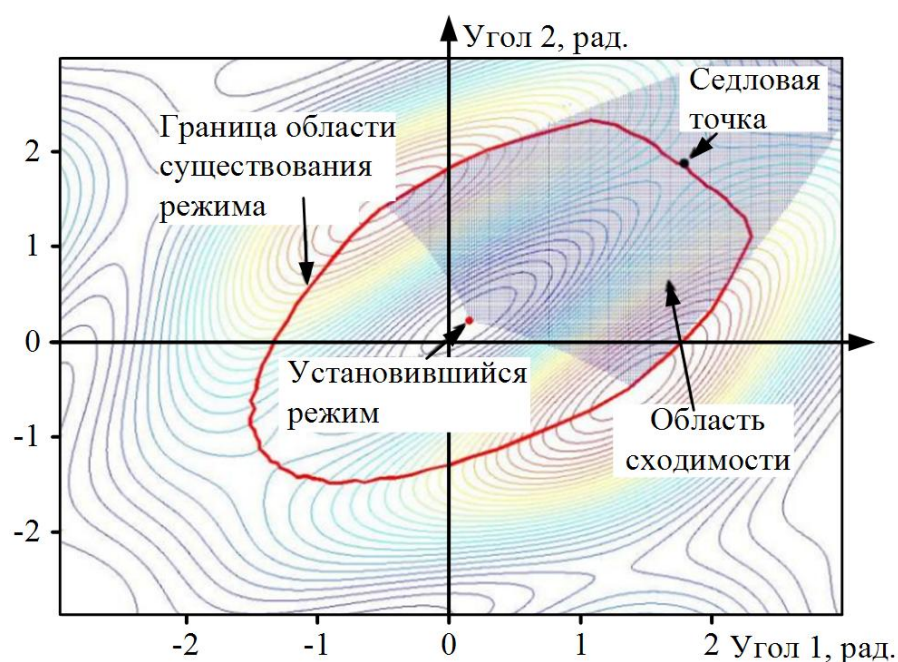


Рис. 9. Область сходимости предложенного метода для трехузловой схемы

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описан подход к расчету ближайшего предельного режима работы энергосистемы на основе поиска седловой точки функции, состоящей из суммы квадратов невязок уравнений установившегося режима. Анализируется область сходимости метода к предельному режиму при движении к пределу «изнутри» области существования решения. Исследования направлены на получение модели, которая позволит оптимизировать противоаварийное управление в электроэнергетике и более эффективно решать задачу мониторинга запасов устойчивости. Развитие описанного метода заключается в учете ограничений в форме равенств с помощью метода Лагранжа, а ограничений в форме неравенств с помощью метода Каруша-Куна-Таккера или метода штрафных функций.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00404 мол\_а.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ayuev Boris I., Davydov Viktor V., Erokhin Petr M. Models of Closest Marginal States of Power Systems in p-Norms // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. №33(2). P. 1195–1208.
2. Ayuev Boris I., Davydov Viktor V., Erokhin Petr M. Fast and Reliable Method of Searching Power System Marginal States // IEEE Transactions on Power Systems. 2016. №31(6). P. 4525–4533.
3. Dobson I., Lu L. New method for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse // IEEE Transactions on Power Systems. 1993. №8(3). P. 905–913.
4. Milano F. Power System Modeling and Scripting // Power Systems 2009: Springer. 2009.

5. Ajjarapu V., Christy C. The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis // IEEE Transactions on Power Systems. 1992. № 7(1). P. 416–423.
6. Chiang H.D., Flueck A.J., Shah K.S., Balu N. CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior due to Load and Generation Variations // IEEE Transactions on Power Systems. 1995. №10(2). P. 623–634.
7. Mendoza-Armentaa S., Fuerte-Esquivelb C.R., Becerril R. A numerical study of the effect of degenerate Hopf bifurcations on the voltage stability in power systems // Electric Power Systems Research. 2013. №101. P. 102–109.
8. Razmi H., Shayanfar H.A., Teshnehlab M. Steady state voltage stability with AVR voltage constraints // Electrical Power and Energy Systems. 2012. №43. P. 650–659.
9. Hongjie J., Xiaodan Y., Xiaodong C. Impact of the exciter voltage limit to small signal stability region of a three-bus power system // Electrical Power and Energy Systems. 2011. №33. P. 1598–1607.
10. Azadani E.N., Canizares C.A., Bhattacharya K. Modeling and Stability Analysis of Distributed Generation // IEEE Power and Energy Society General Meeting 2012. 2012. P. 1–8.
11. Pama A., Radman G. A new approach for estimating voltage collapse point based on quadratic approximation of PV-curves // Electric Power Systems Research. 2009. № 79. P. 653–659.
12. Gu X., Canizares C.A. Fast prediction of loadability margins using neural networks to approximate security boundaries of power systems // Generation, Transmission & Distribution, IET. 2007. № 1(3). P. 466–475.
13. Canizares C.A. Calculating Optimal System Parameters to Maximize the Distance to Saddle-Node Bifurcation // IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Fundamental Theory and Applications. 1998. № 45(3). P. 225–237.
14. Avalos R.J., Canizares C.A., Milano F., Conejo A.J. Equivalency of Continuation and Optimization Methods to Determine Saddle-Node and Limit-Induced Bifurcations in Power Systems // IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Regular Papers. 2009. №56(1). P. 210–223.
15. Pazderin A., Yuferev S. Power flow calculation by combination of Newton-Raphson method and Newton's method in optimization // Proceedings of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 200. 2009. P. 1693–1696.
16. Pazderin A.V., Yuferev S.V. Steady-state calculation of Electrical Power System by the Newton's method in optimization // Proceedings of the 2009 IEEE Bucharest Powertech: Innovative Ideas Toward the Electrical Grid Of the Future. 2009. P. 5281830.
17. Паздерин А.В., Юфеев С.В. Расчет установившегося режима электроэнергетической системы обобщенным методом Ньютона // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2008. № 5-6. С.68–77.
18. Определение запасов устойчивости и управляющих воздействий для обеспечения статической устойчивости в задаче противоаварийного управления на основе Обобщенного метода Ньютона / Чусовитин П.В., Паздерин А.В., Шабалин Г.С., Юфеев С.В. // Материалы Международной научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем 2017». 2017. С. 1–9.

Поступила в редакцию 25 декабря 2018 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

#### SEARCH OF A CLOSEST LIMIT LOAD OPERATION MODE OF A GRID ON THE BASIS OF GENERALISED NEWTON METHOD

Andrey V. Pazderin

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of Automated Electrical Systems Department, Ural Federal University (URFU), Yekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.pazderin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4826-2387>.

Pavel V. Chusovitin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Automated Electrical Systems Department, Ural Federal University (URFU), Yekaterinburg, Russia. E-mail: pvchus@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5885-4821>.

Grigoriy S. Shabalin

Engineer of 1<sup>st</sup> category, Assistant Professor, Automated Electrical Systems Department, Ural Federal University (URFU), Yekaterinburg, Russia. E-mail: g.s.shabalin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0776-011X>.

The paper presents an alternative approach to voltage stability boundaries evaluation. Voltage stability boundaries evaluation is necessary for assessment of minimum security margin. Minimum security margin is a basic criterion applied by System Operators to provide corrective actions for maintaining power system security. The proposed method is direct but has advantages over conventional direct methods. It is based on optimization technique and makes it possible to evaluate the distance to power system voltage stability boundary. The described approach is based on the use of the Newton's method and sum of square roots of power flow equations. The paper demonstrates the concept of the approach based on simple power system models (PV-node – swing-bus, 2PV-node – swing-bus). The issue of the proposed method convergence is given special attention to in the article.

**Keywords:** power systems stability, stability criteria, voltage stability, stability margin, emergency control.

#### REFERENCES

1. Ayuev Boris I., Davydov Viktor V., Erokhin Petr M. Models of Closest Marginal States of Power Systems in p-Norms. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, no.33(2), pp. 1195–1208.
2. Ayuev Boris I., Davydov Viktor V., Erokhin Petr M. Fast and Reliable Method of Searching Power System Marginal States. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, no. 31(6), pp. 4525–4533.
3. Dobson I., Lu L. New method for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1993, no. 8 (3), pp. 905-913.
4. Milano F. Power System Modeling and Scripting. *Power Systems 2009: Springer*, 2009.
5. Ajjarapu V., Christy.C. The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1992, no. 7(1), pp. 416–423.
6. Chiang H.D., Flueck.A.J., Shah K.S., Balu N. CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior due to Load and Generation Variations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995, no. 10(2), pp. 623–634.
7. Mendoza-Armentaa S., Fuerte-Esquivelb C.R., Becerril R. A numerical study of the effect of degenerate Hopf bifurcations on the voltage stability in power systems. *Electric Power Systems Research*, 2013, no. 101, pp. 102-109.
8. Razmi H., Shayanfar H.A., Teshnehlab M. Steady state voltage stability with AVR voltage constraints. *Electrical Power and Energy Systems*, 2012, no. 43, pp. 650-659.
9. Hongjie J., Xiaodan Y., Xiaodong C. Impact of the exciter voltage limit to small signal stability region of a three-bus power system. *Electrical Power and Energy Systems*, 2011, no. 33, pp. 1598-1607.
10. Azadani E. N., Canizares C.A., Bhattacharya K. Modeling and Stability Analysis of Distributed Generation. *IEEE Power and Energy Society General Meeting 2012*, 2012, pp. 1–8.
11. Pama A., Radman G. A new approach for estimating voltage collapse point based on quadratic approximation of PV-curves. *Electric Power Systems Research*, 2009, no. 79, pp. 653-659.
12. Gu X., Canizares C.A. Fast prediction of loadability margins using neural networks to approximate security boundaries of power systems. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, 2007, no. 1(3), pp. 466–475.
13. Canizares C.A. Calculating Optimal System Parameters to Maximize the Distance to Saddle-Node Bifurcation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Applications*, 1998, no. 45(3), pp. 225–237.
14. Avalos R.J., Canizares C.A., Milano F., Conejo A.J. Equivalency of Continuation and Optimization Methods to Determine Saddle-Node and Limit-Induced Bifurcations in Power Systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Regular Papers*, 2009, no. 56(1), pp. 210–223.
15. Pazderin A., Yuferev S. Power flow calculation by combination of Newton-Raphson method and Newton's method in optimization. *Proceedings of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2009*, 2009, pp.1693–1696.
16. Pazderin A.V., Yuferev S.V. Steady-state calculation of Electrical Power System by the Newton's method in optimization. *Proceedings of the 2009 IEEE Bucharest Powertech: Innovative Ideas Toward the Electrical Grid Of the Future*, 2009, pp. 5281830.
17. Pazderin A.V., Yuferev S.V. Steady-state calculation of Electrical Power System using Newton's method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki* [Proceedings of higher educational institutions. Energy issues], 2008, no. 5-6, pp.68-77.
18. Chusovitin P.V., Pazderin A.V., Shabalin G.S., Yuferev S.V. Determination of stability margins and controlling actions to ensure steady-state stability in the emergency control task using Newton's method. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Relejnaya zashhita i avtomatika ehnergosistem 2017* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Relay Protection and Automation of Power Systems 2017"], 2017, pp. 1-9.

Паздерин А.В., Чусовитин П.В., Шабалин Г.С. Поиск ближайшего предельного режима электроэнергетической системы на основе обобщенного метода ньютона // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 1(42). С. 12-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-12-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-12-18)

Pazderin A.V., Chusovitin P.V., Shabalin G.S. Search of a Closest Limit Load Operation Mode of a Grid on the Basis of Generalised Newton Method. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 12-18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-12-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-12-18)

## РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ УСТРОЙСТВА ОБЕЗВЕШИВАНИЯ ПОЛЕЗНОГО ГРУЗА ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ

Обоснована необходимость реализации адаптивного управления системой обезвешивания специализированного тренажерного комплекса «Выход-2», предназначенного для подготовки космонавтов к работе в условиях невесомости и пониженной гравитации. Приведены теоретические зависимости параметров корректирующего устройства от длины сходящего каната и текущего режима гравитации. Описана аппаратная реализация системы управления горизонтальными перемещениями. Обозначены ключевые особенности отдельных узлов системы. Представлены результаты экспериментальных исследований работы созданной системы управления.

**Ключевые слова:** стенды обезвешивания, тренажеры, имитация невесомости, система управления, корректирующее устройство, адаптация.

### ВВЕДЕНИЕ

Для современной пилотируемой космонавтики характерно повышенное требование к подготовке космонавтов. Важную роль в обучении космонавтов играют тренажерные комплексы позволяющие имитировать условия невесомости и пониженной гравитации на Земле [1, 2]. Одним из таких тренажеров является специализированный тренажер «Выход-2» [3, 4], в состав которого входит силокомпенсирующая система обезвешивания [5-8].

В 2018 году осуществлена глубокая модернизация системы обезвешивания тренажера «Выход-2», связанная в первую очередь с необходимостью увеличения скоростей перемещения с 0,2 до 2,0 м/с и ускорений с 0,2 до 1,6 м/с<sup>2</sup>. На рис. 1 представлен внешний вид модернизированного тренажера «Выход-2». Данная модернизация потребовала замены пассивной системы горизонтальных перемещений на активную, с разработкой соответствующей системы управления. Как было показано в [9], параметры математической модели подобных систем не являются постоянными и изменяются в зависимости от массы обезвешиваемого объекта, имитируемой гравитации, рабочей длины каната и положения объекта в рабочем пространстве.



Рис. 1. Внешний вид модернизированного тренажера «Выход-2»

Исходя из требуемых технических характеристик тренажера масса обезвешиваемого объекта может варьироваться от 3 до 250 кг, а длина сходящего каната изменяется с 0,5 до 5,0 м, что вызывает существенное изменение параметров, поэтому система управления горизонтальными перемещениями должна иметь адаптивный характер.

### РАСЧЕТ АДАПТИВНОГО КОРРЕКТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

В [10] показано, что систему управления горизонтальными перемещениями для каждого направления можно реализовать в виде обобщенной структуры, приведенной на рис. 2.

На рис. 2 обозначено: МЧС – механическая часть системы;  $T_O$ ,  $T_M$  – механические постоянные времени объекта и механизма;  $T_c$ ,  $T_d$  – постоянные времени, характеризующие эквивалентную жёсткость и демпфирующие свойства объекта управления;  $W_{зкт}$ ,  $W_{ку}$ ,  $W_{ду}$  – передаточные функции замкнутого контура тока, корректирующего устройства и датчика угла соответственно;  $M_d$ ,  $M_y$ ,  $M_B$  – моменты двигателя, упругого взаимодействия и внешнего воздействия;  $\Omega_O$  – скорость объекта обезвешивания, приведенная к валу двигателя;  $\alpha$  – угол отклонения каната от вертикали.

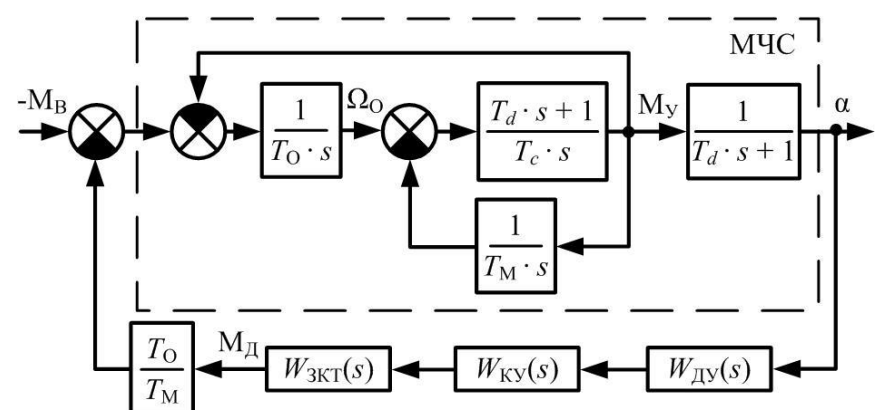


Рис. 2. Структурная схема системы управления горизонтальными перемещениями для одного из направлений



Данная структурная схема представлена в относительных единицах, где за базовые величины приняты номинальный момент двигателя  $M_H$ , скорость идеального холостого хода двигателя  $\Omega_0$  и базовый угол отклонения  $\alpha_0$ , равный углу отклонения объекта при зафиксированных тележке и мосте при действии внешнего усилия эквивалентному  $M_H$ :

$$\alpha_0 = M_H / \rho \mu P_0, \quad (1)$$

где  $\rho$  – радиус приведения;  $\mu$  – степень обезвешивания,  $P_0$  – вес объекта.

Согласно [5] передаточная функция корректирующего устройства должна иметь следующий вид:

$$W_{KV}(s) = k_{KV} \frac{T_D s + 1}{T_A s + 1}, \quad (2)$$

где  $k_{KV} = (T_M/T_0)k_{KPY}$  – коэффициент усиления корректирующего устройства;  $T_D = \sqrt{T_0 T_C / k_{KPY} k_\omega^{1/4}}$  – постоянная времени форсирующей составляющей;  $T_A = T_D / k_\omega$  – постоянная времени апериодической составляющей;  $k_{KPY} \approx \delta_y^{-1}$  – коэффициент усиления канала регулирования угла, определяемый требуемым статизмом по углу  $\delta_y$ ;  $k_\omega$  – коэффициент, выбираемый в зависимости от требуемого быстродействия и помехозащищенности, рекомендуется  $k_\omega = 4 - 8$ .

Данные выражения содержат переменные в относительных единицах, что неудобно при практической реализации регулятора. Кроме того, подобная запись не в полной мере раскрывает зависимость параметров регулятора от состояния системы. Поэтому целесообразно представить данные выражения в функции от абсолютных величин, воспользовавшись математическим описанием, полученным авторами в [9].

После преобразования зависимость постоянной времени форсирующей составляющей имеет вид

$$T_D = \sqrt{\frac{L \delta_y}{\mu g}} k_\omega^{1/4}, \quad (3)$$

где  $L$  – длина сходящего каната.

При практической реализации корректирующего устройства целесообразно объединить операции усиления сигнала и нормирования угла, тогда коэффициент корректирующего устройства будет равен

$$k_{KV\alpha_0} = \frac{k_{KV}}{\alpha_0} = \frac{\mu}{\delta_y} \frac{g J_M}{\rho M_H}, \quad (4)$$

где  $J_M$  – момент инерции приводного механизма.

Как видно из (3), значение постоянной времени зависит от длины сходящего каната и текущего режима гравитации. Во время тренировки режим гравитации меняется редко и лежит в диапазоне от 0,62 для марсианской гравитации до 1,0 для полной невесомости. Длина каната в свою очередь изменяется постоянно при вертикальных движениях объекта и лежит в диапазоне от 0,5 до 5,0 м. Как видно из (4), коэффициент усиления зависит только от режима гравитации и не требует непрерывной адаптации. Также можно сделать вывод об отсутствии необходимости адаптации корректирующего устройства горизонтальных перемещений от массы объекта обезвешивания.

На рис. 3 представлены частотные характеристики системы при различных ее состояниях.

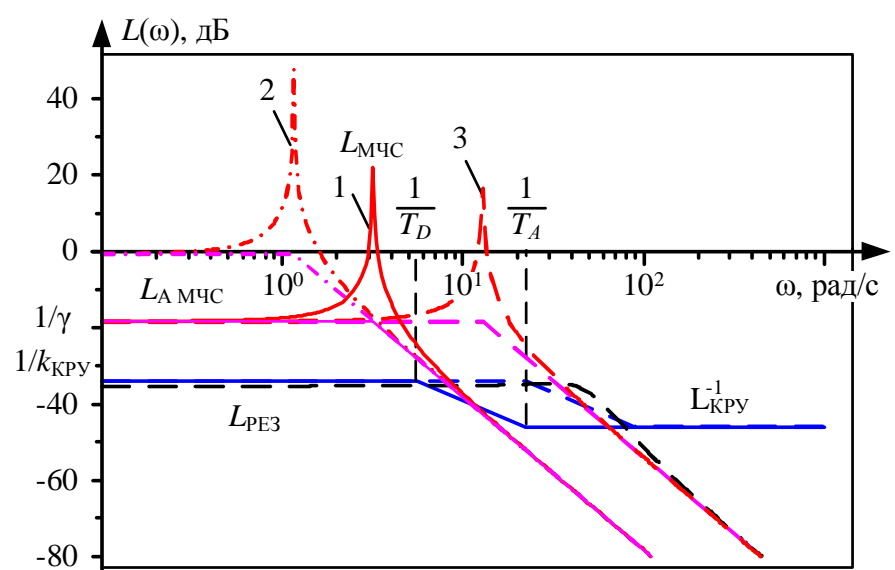


Рис. 3. Частотные характеристики синтеза корректирующего устройства: 1 –  $m=250$  кг,  $\mu=0,62$ ,  $L=5$  м; 2 –  $m=3$  кг,  $\mu=0,62$ ,  $L=5$  м; 3 –  $m=250$  кг,  $\mu=1,0$ ,  $L=0,5$  м

Из рис. 3 видно, что при изменении массы объекта обезвешивания с 250 до 3 кг точка пересечения ЛАЧХ механической части и обратной ЛАЧХ канала регулирования угла не изменилась. Это указывает на отсутствие необходимости адаптации корректирующего устройства от массы груза, что подтверждается расчетами авторов. Также из рис. 3 видно, что при изменении длины  $L$  или коэффициента обезвешивания  $\mu$  ЛАЧХ механической части смещается вдоль оси частот и для адаптации корректирующего устройства под это смещение достаточным является изменения постоянных времени  $T_A$  и  $T_D$ , что также подтверждено расчётами.

#### АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

На рис. 4 представлена структура аппаратной реализации контура регулирования угла. Система работает следующим образом. Сигналы с датчиков отклонения обрабатываются модулями датчиков SMC30 и передается на модуль управления приводами CU320-2 PN, откуда в свою очередь поступают на программируемый логический контроллер (ПЛК) CPU 1517T-3PN/DP. В контроллере происходит объединение сигналов и реализуется алгоритм корректирующего устройства, в результате чего формируется задание на момент электродвигателя. Далее задание через модуль управления приводами поступает на двигательный модуль SINAMICS S120, который согласно этому заданию формирует требуемый момент на валу электродвигателя.

Рассмотрим подробнее некоторые узлы системы.

Устройство обезвешивания обеспечивает три поступательные степени свободы и одну вращательную относительно вертикальной оси. Вертикальное перемещение объекта осуществляется при помощи канатно-блочной системы, имеющей две параллельные ветви. Во время вращения объекта обезвешивания возникает закручивание канатов, которое приводит к возникновению противоположно направленных углов отклонений параллельных ветвей каната. Для исключения влияния данного явления на работу системы нами используются два датчика угла отклонения каната установленных в параллельных ветвях, сигналы с которых в последующем усредняются.

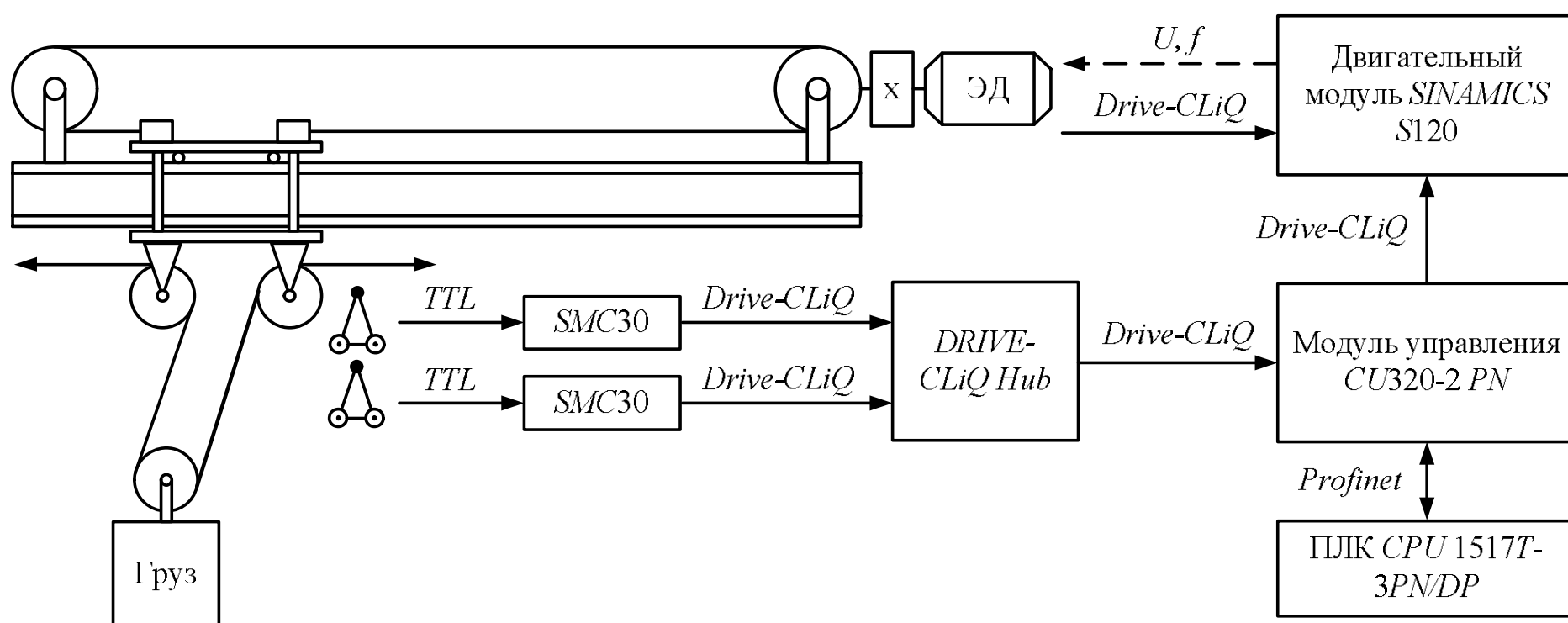


Рис. 4. Структура аппаратной реализации системы управления горизонтальными перемещениями

При измерении угла отклонения важно минимизировать инерционность и трение в механизме датчика, он должен обладать достаточным разрешением на рабочем диапазоне  $\pm 2^\circ$ , а его выходной сигнал должен быть нечувствительным к помехам. Поэтому в качестве чувствительного элемента датчика отклонения каната выбран фотоэлектрический инкрементальный датчик ЛИР238А с разрешением 720 000 дискрет на оборот и TTL выходным сигналом.

Необходимость адаптации параметров корректирующего устройства осложняет его реализацию в модуле управления CU320-2 PN, поэтому целесообразно все вычислительные операции, связанные с объединением сигналов с датчиков угла, расчетом параметров корректирующего устройства и его работой, осуществлять в ПЛК. При этом цикл обмена между модулем управления и ПЛК, а также цикл обработки алгоритмов должен быть достаточно коротким. В рассматриваемом случае он составил 1 мс.

Одним из важных элементов системы является приводной электродвигатель. Для обеспечения высокого качества регулирования и хороших энергетических показателей его инерционность должна быть минимальной. Кроме того, из-за особенности эксплуатации тренажерных комплексов для подготовки космонавтов используемый электродвигатель должен выдерживать длительную работу на малых скоростях ( $< 0,1\Omega_0$ ). Поэтому в качестве привода выбран синхронный электродвигатель с постоянными магнитами SIMOTICS S-1FK7 Compact.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для подтверждения эффективности адаптивного корректирующего устройства осуществлен следующий эксперимент. При разомкнутом контуре регулирования угла груз раскачивался до заданной амплитуды, после чего в момент покоя груза, соответствующий максимальному отклонению каната, контур регулирования замыкался. Полученные осциллограммы работы системы управления с и без адаптации приведены на рис. 5.

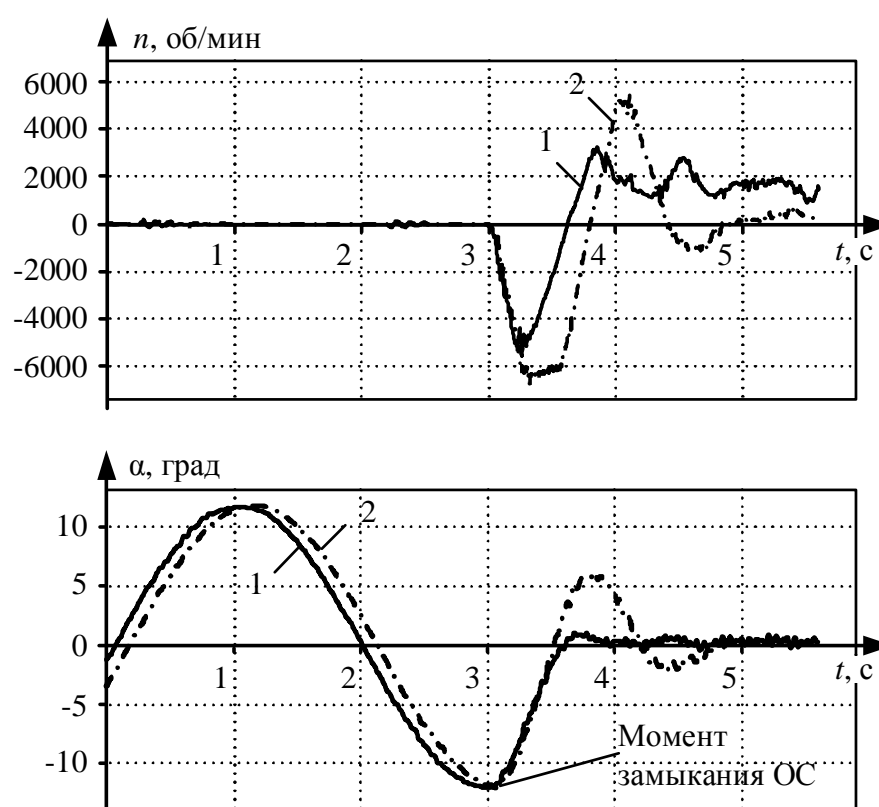


Рис. 5. Осциллограммы угла отклонения каната и частоты вращения двигателя: 1 – без адаптации; 2 – с адаптацией

Из рис. 5 видно, что в случае отсутствия адаптации график изменения угла отклонения каната затухает быстрее, однако при этом груз успевает развить значительную скорость в направлении противоположном отклонению каната. В случае адаптивного корректирующего устройства затухание колебаний осуществляется медленнее, но при этом объект (груз) остается в исходной точке в состоянии покоя. Таким образом, за счет адаптации можно достичь лучшего качества имитации условий невесомости.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Изменения параметров математической модели связанные с изменением длины сходящего каната в 10 раз и степени обезвешивания в 2 раза, требуют реализации адаптивного управления горизонтальными перемещениями.

2. При адаптации параметров корректирующего устройства необходимо использовать приведенные аналитические зависимости.

3. При практической реализации системы управления горизонтальными перемещениями рекомендуется использовать:

– два датчика угла, устанавливаемых в параллельных ветвях, для исключения влияния закручивания канатов;

– инкрементальные фотоэлектрические датчики для наилучшей чувствительности измерительной системы;

– внешний регулятор на базе быстродействующего программируемого логического контроллера;

– синхронный двигатель с постоянными магнитами для надежной работы на малых частотах вращения.

4. В случае отсутствия адаптивного регулирования система горизонтальных перемещений может некорректно обрабатывать возмущающие воздействия, снижая качество имитации условий невесомости и пониженной гравитации.

**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. Т. 66. № 1-2. С. 70-73.
2. Пятибратов Г.Я., Кравченко О.А., Папирняк В.П. Способы реализации и направления совершенствования трена-

жёров для подготовки космонавтов к работе в невесомости // Изв. вузов. Электромеханика. 2010. №5. С. 70-76.

3. Кравченко О.А., Пятибратов Г.Я. Создание и опыт эксплуатации силокомпенсирующих систем, обеспечивающих многофункциональную подготовку космонавтов к работе в невесомости // Изв. вузов. Электромеханика. 2008. №2. С. 42-47.
4. Pyatibratov G.Y., Kravchenko O.A., Kivo A.M. Design principles and implementation of advanced simulators for training astronauts to work in zero or low gravity conditions // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 1410-1414. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.337
5. 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: 10.1016/j.proeng.2015.12.006
6. Принципы построения и реализация систем компенсации силы тяжести / Кравченко О.А., Пятибратов Г.Я., Сухенко Н.А., Бекин А.Б. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2013. № 2 (171). С. 32-35.
7. Кравченко О.А. Принципы построения многокоординатных силокомпенсирующих систем // Изв. вузов. Электромеханика. 2008. №3. С. 43-47.
8. Барыльник Д.В., Пятибратов Г.Я., Кравченко О.А. Силокомпенсирующие системы с электроприводами переменного тока тренажерных комплексов подготовки космонавтов Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркасск: Ред. журн. «Изв. Вузов. Электромеханика»; «Лик», 2012. 176 с.
9. Богданов Д.Ю., Кравченко О.А. Математическая модель электромеханических стендов обезвешивания с учетом силовых взаимодействий в радиальной конструкции // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №1(38). С. 26-32. doi: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-26-32.
10. 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. P. 29-36. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.004

Поступила в редакцию 26 декабря 2018 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

### DEVELOPMENT AND REALIZATION OF ADAPTIVE CONTROLLER OF REAL WEIGHT UNLOADING MOTION DEVICE OF SIMULATOR FOR COSMONAUTS TRAINING

Dmitriy Yu. Bogdanov

Assistant, the department of Energy supply and electric drive, Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia. E-mail: bogdanov\_dmitr@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7851-6045>.

Oleg A. Kravchenko

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the department of Energy supply and electric drive, Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia. E-mail: mvk346428@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2974-448X>.

The realization relevancy of the unloading system with adaptive control of specialized training complex "Vyhod-2" for training of cosmonauts to work in zero gravity and low gravity is justified. The theoretical restrictions of the correcting device parameters on convergent rope length and current gravity mode are given. The hardware implementation of the horizontal movement control system is described. The key points of the separate unit of the system are designated. The experimental research results of the designated control system are presented.

**Keywords:** unloading test bench, simulators, weightlessness imitation, control system, correcting device, adaptive.

#### REFERENCES

1. Krikalev S.K., Kalery A.Yu., Sorokin I.V. Crew on the iss: creativity or determinism? // Acta Astronautica. 2010. Vol. 66, no. 1-2. pp. 70-73.
2. 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. [Proceedings of Universities. Electromechanics], 2010, no.5, pp. 70-76 (In Russian).
3. Kravchenko O.A., Pyatibratov G.Y. Creation and experience in the operation of force-compensating systems providing



- multifunctional training of cosmonauts to work in weightlessness. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Proceedings of Universities. Electromechanics], 2008, no. 2, pp.42–47 (In Russian).
4. Pyatibratov G.Y., Kravchenko O.A., Kivo A.M. Design principles and implementation of advanced simulators for training astronauts to work in zero or low gravity conditions. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150, pp. 1410-1414. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.337.
  5. 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: 10.1016/j.proeng.2015.12.006.
  6. 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).
  7. Kravchenko O.A. Principles of construction of multi-coordinate force compensating systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Proceedings of Universities. Electromechanics], 2008, no. 3, pp.43–47 (In Russian).
  8. Baryl'nik D.V., Pyatibratov G.Y., Kravchenko O.A. *Sil'kompensiruyushchie Sistemy s Elktroprivodami Peremennogo Toka Trenazhernykh Kompleksov Podgotovki Kosmonavtov* [Force Balancing Systems with AC Electric Drives of Cosmonauts' Training Complexes]; South Russian State Technical University (NPI). Novocherkassk, Publishing center of « Proceedings of Universities. Electromechanics», 2012, 176 pp. (In Russian).
  9. Bogdanov D.Yu., Kravchenko O.A. Mathematical Model of Electromechanical Weightlessness Simulators Taking Account of Force Interactions in Radial Construction. *Elektrotekhnicheskie 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).
  10. 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: 10.1016/j.proeng.2015.12.004.

Богданов Д.Ю., Кравченко О.А. Разработка и реализация адаптивного регулятора перемещения устройства обезвешивания полезного груза тренажера для подготовки космонавтов // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 1(42). С. 19-23. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-19-23](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-19-23)

Bogdanov D.Yu., Kravchenko O.A. Development and Realization of Adaptive Controller of Real Weight Unloading Motion Device of Simulator for Cosmonauts Training. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 19-23. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-19-23](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-19-23)

Мещеряков В.Н., Бойков А.И., Ласточкин Д.В.

Липецкий государственный технический университет

## СИСТЕМА ПЛАВНОГО ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

В электроприводе, выполненном на базе асинхронного двигателя с фазным ротором, предложено регулировать ток ротора с помощью выпрямительно-инверторного блока, при этом вход выпрямителя подключен к выводам обмотки ротора двигателя, а выход инвертора, выполненного на базе IGBT-транзисторов с обратными диодами, – к частотно-зависимому индуктивно-активному сопротивлению, в звено постоянного тока включен емкостный фильтр. В системе электропривода реализован плавный пуск асинхронного двигателя с фазным ротором с возможностью регулирования и поддержания постоянства пускового момента с обеспечением требуемого ускорения. Такую систему электропривода предложено использовать на конвейерах металлургических производств, зачастую не требующих регулирования скорости, но обеспечивающих пусковые режимы с заданным темпом разгона, в том числе и при полной загрузке конвейера. Система электропривода сочетает некоторые свойства асинхронного вентильного каскада и систем параметрического управления. Описана работа системы управления инвертором, реализующая стабилизацию тока ротора асинхронного электродвигателя за счет изменения частоты на выходе инвертора напряжения в функции выпрямленного тока ротора двигателя. Частотно-зависимое индуктивно-активное сопротивление, названное индукционным сопротивлением, содержит массивный магнитопровод с тремя трубчатыми стержнями, соединенными ярмом, на каждом из стержней размещена однослойная фазная обмотка. Толщина стенок трубчатых стержней не превышает глубины проникновения электромагнитного поля в массивный ферромагнитный материал. Приведены результаты экспериментальных исследований частотных характеристик индукционного сопротивления. Разработана математическая модель системы электропривода, проведено компьютерное моделирование динамических процессов с использованием пакета прикладных программ MATLAB Simulink. Доказана возможность реализации предложенного способа управления процессом пуска асинхронного двигателя со стабилизацией пускового момента.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель с фазным ротором, пусковой момент, выпрямитель, инвертор, фильтр, индукционное сопротивление.

## ВВЕДЕНИЕ

На конвейерах металлургических производств, в том числе и на механизмах, не требующих регулирования скорости, достаточно широко применяются системы электропривода на базе асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР). Это объясняется тяжелыми условиями пуска, поскольку электропривод должен обеспечить пуск нагруженного конвейера. Известные системы параметрического резисторного и импульсно-резисторного пуска АДФР обеспечивают ограничение пускового тока за счет рассеивания энергии скольжения на резисторных элементах, что определяет низкую энергоэффективность данных пусковых устройств [1–3].

Наиболее экономичный способ ограничения тока ротора в АДФР, основанный на введении противоЭДС в цепь ротора, реализуется в системе асинхронного вентильного каскада (АВК), имеющего выпрямительно-инверторный блок, передающий энергию скольжения через согласующий трансформатор в трехфазную питающую сеть. Однако этот хорошо изученный способ управления АДФР обеспечивает приемлемые технико-экономические показатели электропривода только при небольшом (20–25%) диапазоне изменении скорости и не в состоянии обеспечить необходимые пусковые характеристики [4, 5]. Системы АВК с последовательным возбуждением не обеспечивают требуемую для механизмов конвейерного типа повышенную перегрузочную способность [6–8].

В разработанной системе электропривода предложено ограничивать ток ротора, используя выпрями-

тельно-инверторный блок, содержащий конденсаторный фильтр в звене постоянного тока, полностью управляемый инвертор на базе IGBT-транзисторов с обратными диодами, к выходу которого подключено частотно-зависимое индукционное сопротивление [9].

## МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Силовая часть электропривода (рис. 1) содержит асинхронный двигатель с фазным ротором (М), обмотка статора которого подключена к питающей сети, выводы обмоток ротора подключены к входу трехфазного нерегулируемого мостового выпрямителя (В). Выход нерегулируемого выпрямителя, к которому также подключен конденсатор (С), соединен с входом регулируемого трехфазного инвертора (И). В звено постоянного тока включен датчик тока (ДТ). К выходу инвертора подключен индукционный резистор (ИР). Выход датчика тока соединен с входом блока управления (БУ) частотой выходного тока инвертора.

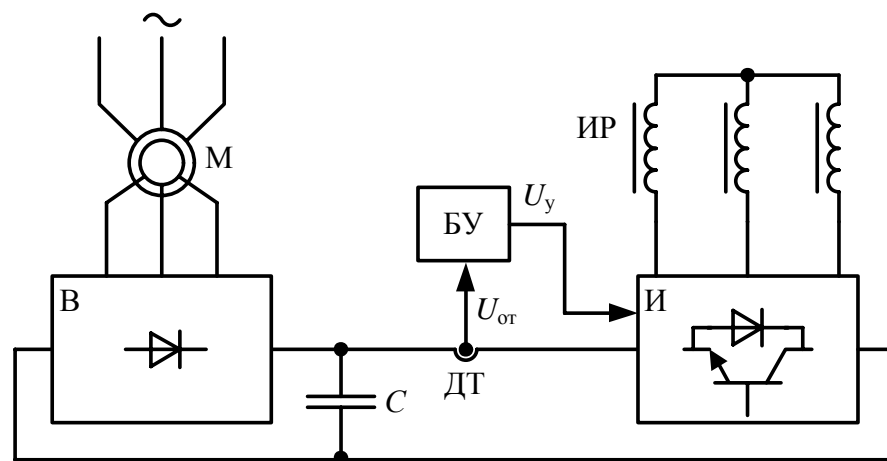


Рис. 1. Силовая часть электропривода

Представленный на **рис. 2** блок управления частотой выходного тока инвертора выполнен следующим образом: он содержит формирователь сигналов (Ф), имеющий количество выходных каналов, соответствующее количеству ключевых элементов инвертора, выход формирователя сигналов соединен с управляющим входом инвертора, вход формирователя сигналов соединен с выходом регулятора частоты (РЧ) переменного тока на выходе инвертора, вход которого соединен с выходом первого узла сравнения 1, положительный вход которого соединен с блоком задания максимальной частоты (БЗМЧ), а отрицательный вход первого узла сравнения 1 соединен с выходом блока ограничения (БО), вход которого соединен с выходом интегрального блока регулятора тока (И), вход которого соединен с выходом второго узла сравнения 2, положительный вход которого соединен с блоком задания выпрямленного тока (БЗТ), а отрицательный вход второго узла сравнения 2 соединен с выходом датчика тока.

Работа рассмотренной системы управления АДФР была исследована с помощью компьютерного математического моделирования в программном пакете MatLab Simulink [10]. Электропривод работает следующим образом.

При подаче напряжения на обмотку статора в обмотке ротора наводится ЭДС, выпрямленное напряжение ротора поступает на вход инвертора (**рис. 3**) и определяется выражением [11]:

$$E_{dp} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_{2k} s - \frac{3}{\pi} z_r I_d, \quad (1)$$

где  $E_{2k}$  – ЭДС роторной цепи АДФР;  $s$  – скольжение;  $z_r$  – полное сопротивление роторной цепи;  $I_d$  – ток, протекающий в звене постоянного тока.

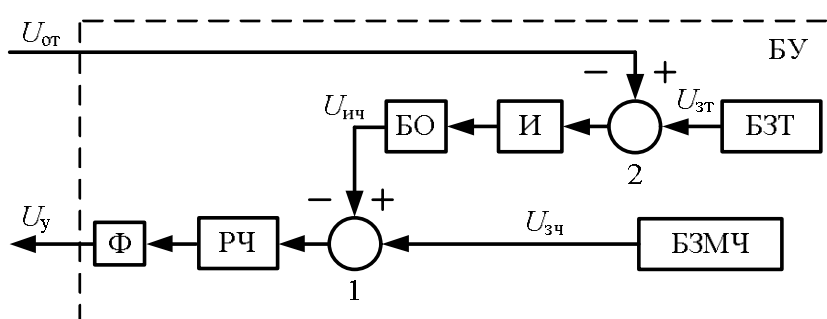


Рис. 2. Блок управления инвертором

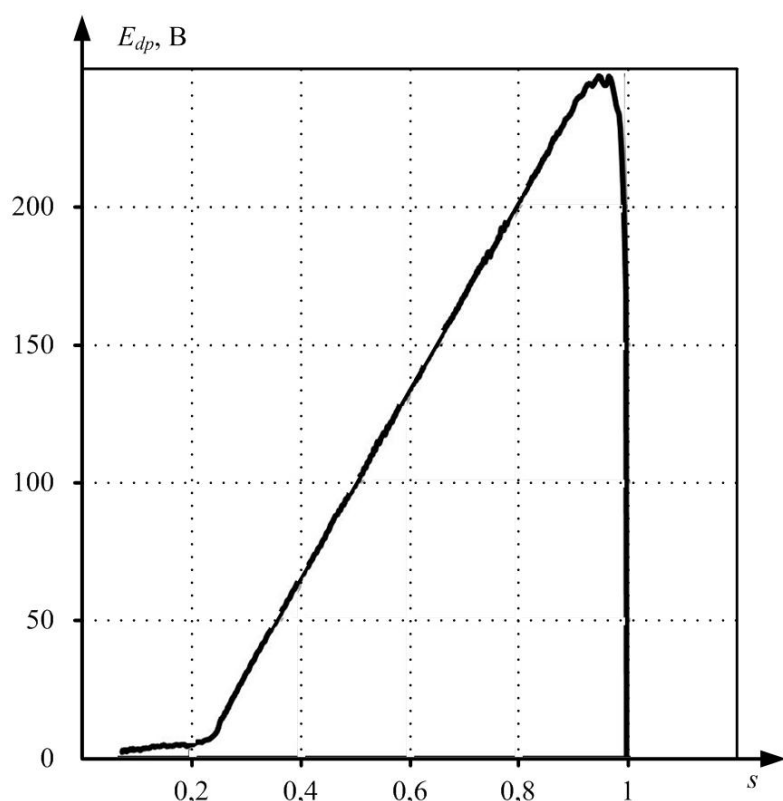


Рис. 3. Зависимость выпрямленного напряжения роторной цепи АДФР от скольжения

Система управления инвертором вырабатывает сигнал задания максимальной частоты, который сравнивается с сигналом, поступающим от интегрального блока (регулятора тока). Результирующий сигнал задания на частоту выходного тока обеспечит максимальную частоту тока на выходе открывшегося инвертора, при этом полное комплексное сопротивление индукционного резистора будет максимальным, согласно [12–14]:

$$\underline{Z}_M = Z_1 \frac{uw^2}{l_\Sigma} e^{j\varphi}, \quad (2)$$

где  $Z_1$  – модуль полного электрического сопротивления единичного квадрата поверхности магнитопровода;  $u$  – периметр стержня;  $w$  – число витков;  $l_\Sigma$  – эквивалентная длина фазного магнитопровода.

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_e \omega}{\gamma}}, \quad (3)$$

где  $\mu_e$  – магнитная проницаемость на поверхности магнитопровода;  $\omega$  – круговая частота поля;  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость материала.

Активная и индуктивная составляющие определяются с помощью соотношений [15–17]:

$$r_m = 0,86 Z_m; \quad (4)$$

$$x_m = 0,53 Z_m. \quad (5)$$

После открытия инвертора, по цепи, состоящей из обмотки ротора, нерегулируемого выпрямителя, датчика тока, регулируемого инвертора, индукционного резистора, начинает протекать ток. Одновременно происходит заряд фильтрующего конденсатора в звене постоянного тока. На **рис. 4** показана зависимость изменения полного комплексного сопротивления ИР от частоты выходного тока инвертора.

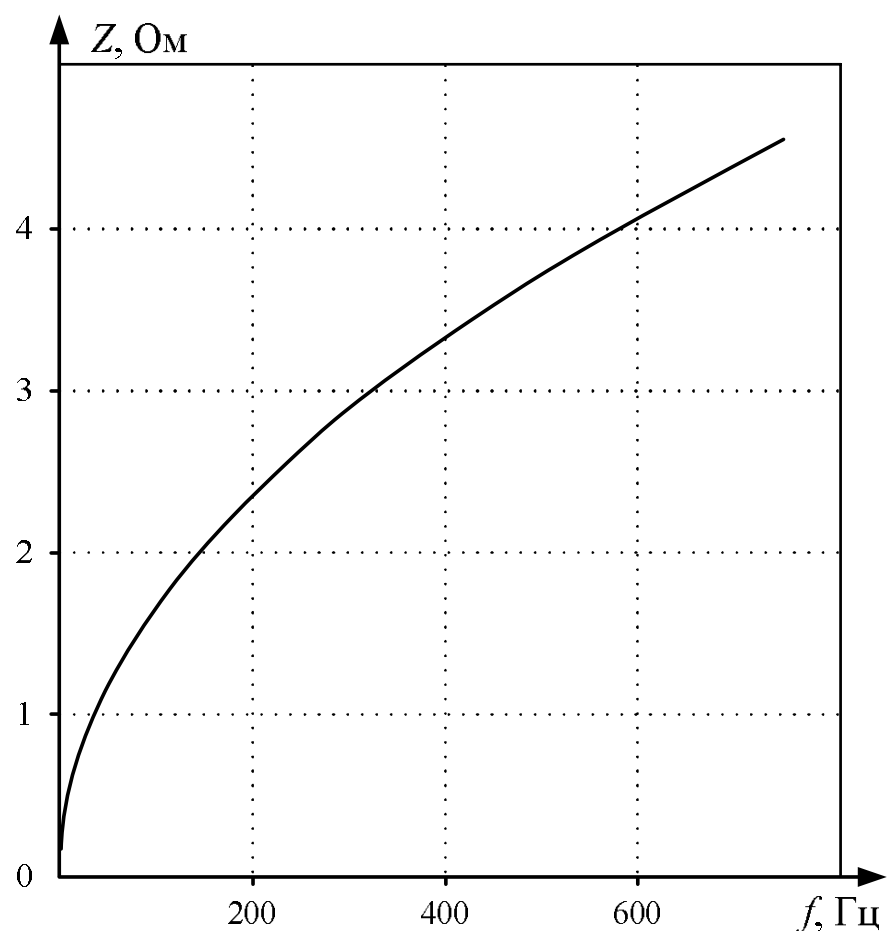


Рис. 4. Зависимость полного комплексного сопротивления ИР от частоты тока на выходе инвертора



Ток в выпрямленной цепи можно рассчитать по формуле

$$I_d = \frac{E_{dp} - E_{du} - \Delta U_{B\Sigma}}{R_{\text{ЭКВ}}}, \quad (6)$$

где  $E_{du}$  – противоЭДС инвертора в выпрямленной цепи;  $\Delta U_{B\Sigma}$  – суммарное падение напряжения на вентиллях схемы;  $R_{\text{ЭКВ}}$  – суммарное сопротивление, приведенное к цепи постоянного тока [18],

$$R_{\text{ЭКВ}} = r_2^* + x_p^* + x_{\text{ис0}}^* + x_\mu^* + r_\mu^*; \quad (7)$$

$$r_2^* = 2r_p; \quad (8)$$

$$x_p^* = \frac{3x_p s}{\pi}; \quad (9)$$

$$x_{\text{ис0}}^* = \frac{3x_{\text{ис0}}(f/f_6)}{\pi}; \quad (10)$$

$$x_\mu^* = \frac{3x_\mu \sqrt{f/f_6}}{\pi}; \quad (11)$$

$$r_\mu^* = 2r_\mu \sqrt{f/f_6}, \quad (12)$$

где  $r_2^*$  – приведенное активное сопротивление ротора;  $x_p^*$  – приведенное реактивное сопротивление ротора;  $x_{\text{ис0}}^*$  – приведенное индуктивное сопротивление обмотки индукционного реостата;  $x_\mu^*$  – приведенное индуктивное сопротивление магнитопровода индукционного реостата;  $r_\mu^*$  – приведенное активное сопротивление магнитопровода индукционного реостата;  $f$  – текущая частота на выходе инвертора;  $f_6$  – максимальная частота на выходе инвертора.

ПротивоЭДС инвертора, в первом приближении, численно равна падению напряжения на индукционном сопротивлении:

$$E_{du} = Z_{\text{ис}} \cdot k_{\text{сх}} \cdot I_d, \quad (13)$$

где  $Z_{\text{ис}}$  – полное комплексное сопротивление ИР;  $k_{\text{сх}}$  – коэффициент приведения напряжения мостовой схемы к цепи постоянного тока.

При прохождении тока в выпрямленной цепи через датчик тока, сигнал  $U_{OT}$  с датчика тока поступает на отрицательный вход второго узла сравнения 2, а от блока задания выпрямленного тока поступает сигнал  $U_{3T}$  на положительный вход узла сравнения 2. Сигнал рассогласования  $\Delta U_T = U_{3T} - U_{OT}$  поступает на вход интегрального блока, который вырабатывает сигнал желаемого изменения частоты  $U_{ИЧ}$ , этот сигнал ограничивается блоком ограничения.

При изменении скорости асинхронного двигателя в процессе пуска на первом узле сравнения 1 производится сравнение сигнала задания максимальной частоты  $U_{3МЧ}$  и сигнала желаемого изменения частоты  $U_{ИЧ}$ , определяется рассогласование  $\Delta U_{\text{ч}} = U_{3МЧ} - U_{ИЧ}$ . Блок ограничения сигнала  $U_{ИЧ}$  настраивают так, чтобы сигнал  $\Delta U_{\text{ч}}$  на входе блока регулятора частоты был всегда положительным. На **рис. 5** показана зависимость тока в выпрямленной цепи от скольжения ротора АДФР, из

которой видно, что система управления инвертором обеспечивает его поддержание на заданном уровне.

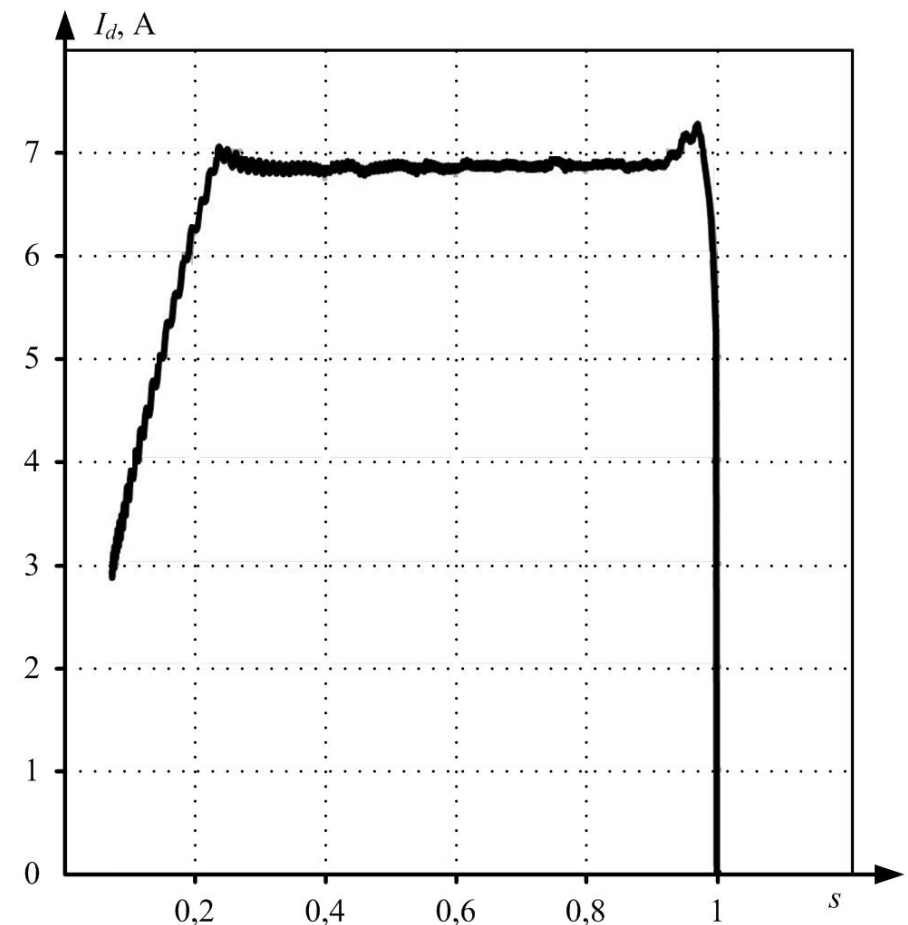


Рис. 5. Зависимость тока в выпрямленной цепи от скольжения

По мере разгона асинхронного двигателя происходит уменьшение ЭДС ротора, поэтому для поддержания постоянства тока ротора необходимо уменьшать вводимую противоЭДС инвертора. Это достигается путем уменьшения частоты тока на выходе инвертора, вследствие чего уменьшается сопротивление магнитной системы индукционного резистора [12-17], влияющее на результирующий ток в цепи ротора. После достижения двигателем скорости, близкой к скорости на естественной механической характеристике, частота тока на выходе инвертора устанавливается минимальной или равной нулю, для этого открывают только два ключевых вентильных элемента – один в анодной, а другой в катодной, группах вентилей инвертора, и по двум фазным обмоткам индукционного реостата будет протекать постоянный ток. В этом случае добавочное сопротивление, введенное в цепь ротора асинхронного двигателя, будет минимальным. Необходимый темп уменьшения частоты на выходе инвертора в процессе пуска задают исходя из желаемого темпа разгона электропривода путем соответствующей настройки постоянной времени интегрального блока. Для получения пониженной скорости вращения асинхронного двигателя необходимо устанавливать соответствующую частоту тока на выходе инвертора. На **рис. 6** показано изменение выходной частоты инвертора в зависимости от скольжения ротора асинхронного электродвигателя.

Была построена динамическая механическая характеристика (**рис. 7**), отображающая зависимость момента на валу электродвигателя от его скорости. Пуск электродвигателя производился под нагрузкой ( $M_{\text{нагр}} = M_{\text{над}}$ ). Видно, что разгон электродвигателя происходит при постоянном значении пускового момента.

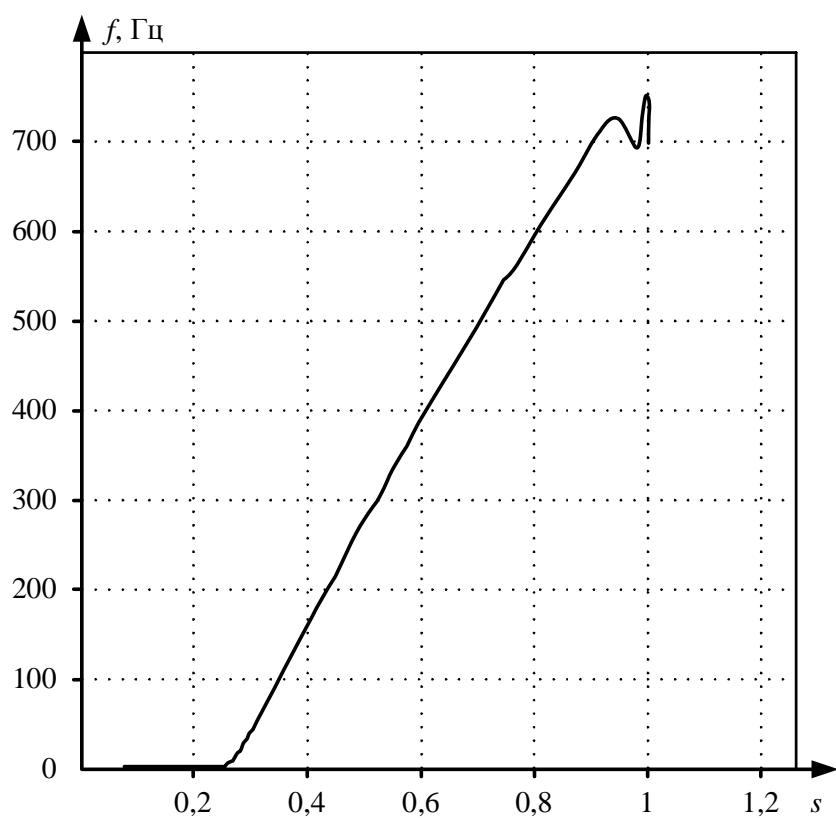


Рис. 6. Зависимость частоты выходного тока инвертора от скольжения

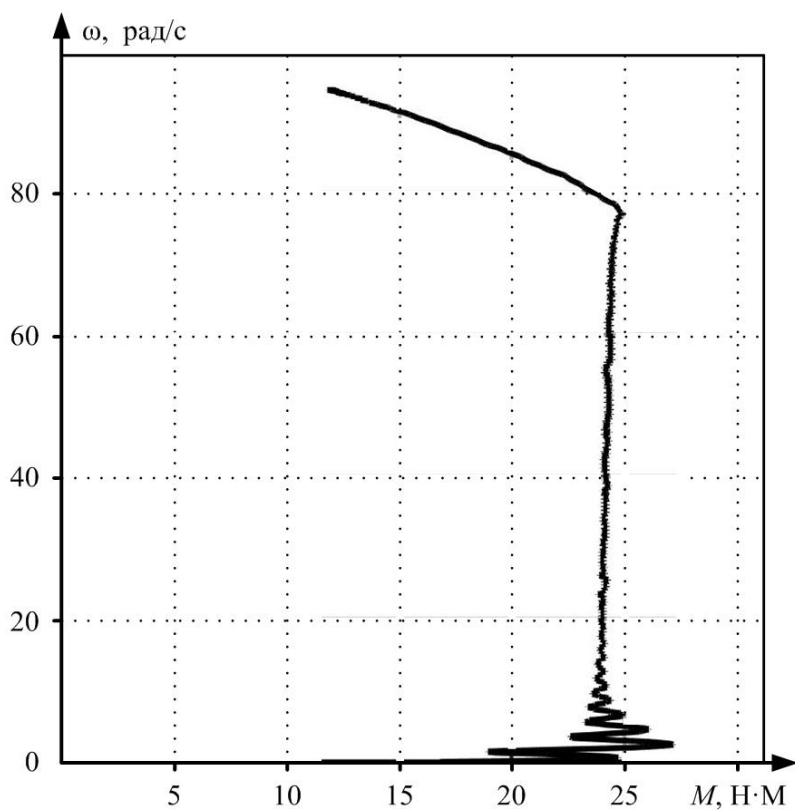


Рис. 7. Динамическая механическая характеристика

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для подтверждения изменения полного комплексного сопротивления индукционного реостата был проведен эксперимент. Схема экспериментальной установки соответствует схеме электропривода, приведенной на **рис. 1**, в которой в звено постоянного тока включен амперметр, частота на выходе инвертора измерялась с помощью частотомера.

В ходе эксперимента для различных значений выпрямленной ЭДС ротора АД с ФР с помощью системы управления инвертором задавалось такое значение частоты выходного тока, чтобы ток, протекающий в выпрямленной цепи, оставался неизменен. Полученные в результате частотные характеристики индукционного резистора приведены на **рис. 8**.

Из **рис. 8** видно, что полученные в результате эксперимента частотные зависимости имеют нелинейный характер.

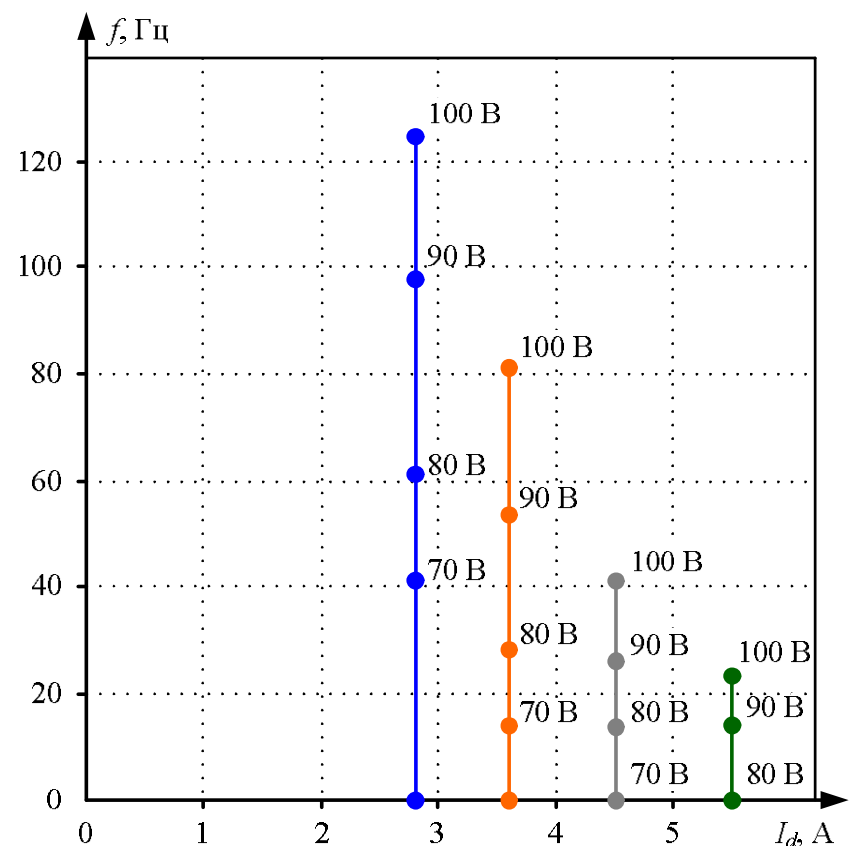


Рис. 8. Экспериментальные частотные зависимости индукционного резистора

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущество предлагаемого способа управления асинхронным двигателем с фазным ротором заключается в простоте реализации, т.к. регулируется только одна переменная – частота тока на выходе инвертора.

При построении замкнутого контура регулирования тока в выпрямленной цепи обеспечивается постоянство тока ротора и момента при пуске асинхронного двигателя.

В электроприводе возможно построение двухконтурной системы управления с внешним контуром регулирования скорости двигателя, что позволит получить более качественные динамические характеристики.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия, 2004. 256 с.
2. Jiang You, Minghao Liu, Jiarui Ma, Hongjie Jia Modeling and Analyse of Induction Motor Drive System with Consideration of DC Bus Stabilization and Control Performance // 8th International Power Electronics and Motion Control Conference. 2016. Pp. 1362–1368.
3. Dargad R., Dubey G. Control of Induction Motor Using of Saturistor with High Eddy Current Loss // Journal–EL. 1975. Vol.56. №10. Pp. 51–56.
4. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронно вентильные каскады и двигатели двойного питания. М.: Энергия, 1979. 200 с.
5. Асинхронно-вентильный крановый электропривод / Хватов С.В., Грязнов В.И., Крюков О.В., Федоров О.В. // Электродвигатели переменного тока подъемно-транспортных механизмов. Суздаль: ВНИПТИЭМ, 1988. С. 46–48.
6. Шулаков Н.В., Медведев Е.Н. Асинхронный вентильный каскад с последовательным возбуждением двигателя // Изв. вузов. Электромеханика. 1988. С. 47–54.

7. Мещеряков В.Н., Федоров В.В. Асинхронно-вентильный каскад с инвертором в цепи статора и общим звеном постоянного тока // *Электротехника*. 1998. № 6. С. 47–50.
8. Hengameh Kojooyan-Jafari, Lluis Monjo, Felipe Corrales, Joaquin Pedra Parameter Estimation of Wound-Rotor Induction Motors From Transient Measurements // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2014. V.10. №2. Pp. 300–308.
9. Пат. 2661343 Российская Федерация, МПК H02P 7/63. Способ управления асинхронным двигателем с фазным ротором / Мещеряков В.Н., Бойков А.И., Ласточкин Д.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет». Оpubл. 17.07.2018.
10. Плеханов М.С. Модель асинхронного электродвигателя с массивным ферромагнитным ротором в режиме минимального скольжения // *Сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного Форума с международным участием: Инженерия для освоения космоса*. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. С. 66–70.
11. Муравьев А.А., Бойков А.И. Системы управления асинхронной машиной с фазным ротором с вентильными преобразователями в цепи ротора // *Материалы XII междуна-*
- родной научно-практической конференции: Современные сложные системы управления. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2017. С. 159–163.
12. Нейман Л.Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. М.;Л.: Госэнергоиздат, 1949. 190 с.
13. Власов В.Г. Экспериментальные исследования и методика расчета асинхронных двигателей с индукционным сопротивлением в цепи ротора // *Электротехническая промышл. Сер. Электропривод*. 1967. №293. С. 3–6.
14. Nanda J., Mathew M. Constant starting torque of induction motor Impedance Control–A Novel Approach // *Institution of Engineers of India Journal*. 1979. Vol. 59, №5. Pp. 278–283.
15. Воскобойников Б.А. Применение индукционных реостатов для крановых электроприводов // *Пром. энергетика*. 1976. №11. С. 25–28.
16. Шумков Е.Б., Епифанов В.П., Завьялов Н.С. Энергетические особенности электроприводов с индукционными реостатами // *Промышленная энергетика*. 1979. №1. С. 26–28.
17. Pat. №1577863 UK, INT. Cl. H 03F 9/04. Saturable reactors / Logan R. 1988.
18. Мещеряков В.Н., Морозов С.В., Теличко Л.Я. Расчет параметров индукционных сопротивлений для асинхронных двигателей с фазным ротором // *Изв. вузов. Электромеханика*. 1989. № 3. С. 50–52.

Поступила в редакцию 09 января 2019 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### SYSTEM OF SOFT START FOR INDUCTION MOTOR WITH PHASE ROTOR

Victor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electric Drive, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>.

Andrey I. Boikov

Assistant, Department of Electric Drive, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: aboikov2013@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0032-0683>.

Denis V. Lastochkin

Postgraduate Student, Department of Electric Drive, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: kaf-ep@stu.lipetsk.ru.

In the electric drive designed on the basis of an asynchronous motor with a phase rotor it is proposed to regulate the rotor current using the rectifier-inverter unit. The input of the rectifier is connected to the terminals of the rotor winding of the motor and the output of the inverter performed on the basis of IGBT-transistors with reverse diodes is connected to the frequency-dependent inductive-active resistance. A capacitive filter is included in the DC link. In the electric drive system, the installed soft-start of the asynchronous motor with a phase rotor is implemented with the possibility of regulating and maintaining the constancy of the starting torque to ensure the required acceleration. It is proposed to use such an electric drive system on conveyors of metallurgical production, which often do not require speed control, but providing starting modes with a predetermined rate of acceleration including when the conveyor is fully loaded. The electric drive system combines some properties of asynchronous valve cascade and parametric control systems. The operation of the inverter control system is described, it implements stabilization of the rotor current of an induction motor by changing the frequency at the output of the voltage inverter as a function of the rectified current of the motor rotor. Frequency-dependent inductive-active resistance, referred to as induction resistance, contains a massive magnetic core with three

tubular rods connected by a yoke and each rod has a single-layer phase winding. The wall thickness of the tubular rods does not exceed the depth of penetration of the electromagnetic field into the massive ferromagnetic material. The results of experimental studies of the frequency characteristics of the induction resistance are presented. The mathematical model of the electric drive system is developed, computer simulation of dynamic processes is carried out using the MATLAB Simulink application software package. The possibility of implementing the proposed method of controlling the process of starting an induction motor with the stabilization of the starting torque has been proven.

**Keywords:** induction motor with phase rotor, starting torque, rectifier, inverter, filter, induction resistance.

#### REFERENCES

1. Braslavskij I.Ja., Ishmatov Z.Sh., Poljakov V.N. *Energosberegajushhij asinhronnyj elektroprivod* [Energy-saving asynchronous electric drive]. Moscow, Akademija Publ., 2004, 256 p. (In Russian)
2. Jiang You, Minghao Liu, Jiarui Ma, Hongjie Jia Modeling and Analyse of Induction Motor Drive System with Consideration of DC Bus Stabilization and Control Performance. 8th Inter-national Power Electronics and Motion Control

- Conference, 2016, pp. 1362–1368.
3. Dargad R., Dubey G. Control of Induction Motor Using of Saturistor with High Eddy Current Loss. *Journal–EL*, 1975, no. 10 (56), pp. 51–56.
  4. Onischenko G.B., Lokteva I.L. *Asinhronno ventilnyie kaskady i dvigateli dvoynogo pitaniya* [Asynchronously valve stages and dual power motors]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 200 pp. (In Russian)
  5. Hvatov S.V., Grjaznov V.I., Krjukov O.V., Fedorov O.V. Asynchronous valve crane electric drive. *Elektrodvigateli peremennogo toka podjomno-transportnyh mehanizmov* [Electric motors of alternating current of lifting and transport mechanisms], 1988, pp. 46–48. (In Russian)
  6. Shulakov N.V., Medvedev E.N. Asynchronous valve cascade with sequential excitation of the motor. *Izvestija vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of the universities. Electrical engineering], 1988, pp. 47–54. (In Russian)
  7. Meshherjakov V.N., Fedorov V.V. Asynchronously-valve cascade with the inverter in the stator circuit and a common DC link. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 1998, no. 6, pp. 47–50. (in Russian)
  8. Hengameh Kojooyan-Jafari, Llurs Monjo, Felipe Corcoles, Joaquin Pedra Parameter Estimation of Wound-Rotor Induction Motors From Transient Measurements. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2014, no. 2(10), pp. 300–308.
  9. Meshherjakov V.N., Boikov A.I., Lastochkin D.V. *Sposob upravlenija asinhronnym dvigatelem s faznym rotorom* [Method of control of asynchronous motor with phase rotor], Patent RF, no. 2661343, 2018.
  10. Plehanov M.S. Model of induction motor with massive ferromagnetic rotor in the minimum slip mode. *Sbornik nauchnyh trudov IV Vstrossijskogo molodezhnogo Foruma s mezhdunarodnym uchastiem: Inzhenerija dlja osvoenija kosmosa*. [Collection of scientific works of the IV all-Russian youth Forum with international participation: Engineering for space exploration], 2016, pp. 66–70. (in Russian)
  11. Muravyev A.A., Boikov A.I. Control systems of an asynchronous machine with a phase rotor with valve converters in the rotor circuit. *Materialyi XII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Sovremennye slozhnyie sistemyi upravleniya* [Proceedings of the XII international scientific and practical conference: HTCS 17], 2017, pp. 159–163. (In Russian)
  12. Nejman L.R. *Poverhnostnyj jeffekt v ferromagnitnyh telah* [Surface effect in ferromagnetic bodies]. Moscow; Leningrad, Gosjenergoizdat Publ., 1949, 190 p. (In Russian)
  13. Vlasov V.G. Experimental studies and methods of calculation of induction motors with induction resistance in the rotor circuit. *Elektrotehnicheskaja promyshl. ser. elektroprivod* [Electrical industry. Series: Electric Drive], 1967, no. 293, pp. 3–6. (In Russian)
  14. Nanda J., Mathew M. Constant starting torque of induction motor Impedance Control–A Novel Approach. *Institution of Engineers of India Journal*, 1979, no. 5 (59), pp. 278–283.
  15. Voskoboynikov B.A. The application of induction resistors for crane electric drives. *Promyshlennaja jenergetika* [Industrial power engineering], 1976, no. 11, pp. 25–28. (In Russian)
  16. Shumkov E.B., Epifanov V.P., Zavjalov N.S. Energy features of electric drives with induction resistances. *Promyshlennaja jenergetika* [Industrial power engineering], 1979, no.1, pp. 26–28. (In Russian)
  17. Logan R. Saturable reactors. Patent UK, no. 1577863, 1988.
  18. Mescheryakov V.N., Morozov S.V., Telichko L.Ya. Calculation of parameters of induction of resistance to asynchronous motors with wound rotor. *Izestija vuzov SSSR* [Proceedings of Universities of the USSR], 1989, no. 3, pp. 50–52. (In Russian)

Мещеряков В.Н., Бойков А.И., Ласточкин Д.В. Система плавного пуска асинхронного двигателя с фазным ротором // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 1(42). С. 24-29. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-24-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-24-29)

Meshcheryakov V.N., Boikov A.I., Lastochkin D.V. System of Soft Start for Induction Motor with Phase Rotor. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 24-29. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-24-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-24-29)

Ермолаев А.И., Плехов А.С., Титов Д.Ю., Чернов Е.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

## ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ВИБРАЦИИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

В настоящей статье исследуются потоки механической мощности в электроприводе, подверженном вибровозмущениям. В работе рассмотрены две модели электропривода, установленного на жестком основании непосредственно и на виброизоляторах. Передача механической энергии в таких системах сопровождается возникновением вибрационных процессов механической и электромагнитной природы. Вязкоупругие элементы создают компенсационные силы, препятствующие отклонению системы от положения равновесия и существенно ослабляющие высокочастотные вибрации. Исследования проведены методами имитационного динамического моделирования и частотного анализа. В процессе моделирования получены значения линейных перемещений центра масс неуравновешенного ротора и радиальных составляющих сил, действующих на подшипники двигателя. При этом действие инерционной силы на электропривод, установленный на жестком основании, примерно в 1,5 раза больше, чем действие этой силы на систему, оснащенную магнитореологическими виброизоляторами. Оценка потоков механической мощности выполнена по спектру инерционной силы, действующей на подшипники. По полученным спектрограммам видно, что многие ярко выраженные гармоники подавляются действием диссипативных и упругих сил, создаваемых магнитореологическими виброизоляторами. Сравнение спектрограмм двух динамических систем электропривода показало, что система, оснащенная активными виброизоляторами, поглощает до 50% пульсационной механической энергии вибровозмущений электропривода, изымаемой из мощности линейных виброперемещений.

**Ключевые слова:** электропривод, вибрации, демпфирование, потоки механической мощности, математическое моделирование, динамическая модель электропривода, виброопоры, вязкоупругое основание.

### ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена вопросу определения потоков механической мощности в приводном электромеханическом комплексе как на частоте вращения, так и на других гармониках, вызванных вибровозмущениями.

Механические паразитные потоки мощности вибровозмущений в приводе машин [1,2] могут возникать из-за несовершенства конструкции, модуляции момента на валопроводе переменной нагрузкой рабочей машины. Наиболее распространенные конструктивные дефекты в электроприводе обусловлены такими факторами, как статический и динамический эксцентриситет вала ротора, износ и люфт подшипников, распушение пакетов активной стали статора [3-5]. Пульсации механической природы, главным образом, лежат в диапазоне от 0,1 до 100 Гц.

Роторы электродвигателей переменного тока при вращении испытывают пульсации крутящего момента, которые создаются зубцовыми гармониками, периодическими электромагнитными силами, вызванными магнитным насыщением зубцовой зоны ротора, несинусоидальными искажениями токов питающей сети или на выходе преобразователя частоты. Наиболее выраженные пульсации момента электромагнитной природы лежат в диапазоне от 10 Гц до 10 кГц [3, 6]. Спектрограммы некоторых типовых групп двигателей приведены на **рис. 1**.

На **рис. 1** кривая 1 соответствует крупным электрическим двигателям (1000 об/мин), кривая 2 – электрическим машинам средней и малой мощности (1500 об/мин), кривая 3 – электрическим машинам средней и малой мощности (3000 об/мин), кривая 4 – крупным турбогенераторам (3000 об/мин), кривая 5 – высокочастотным индуктивным генераторам (3000 об/мин).

При воздействии переменных нагрузок разрушение одного из элементов электрической машины или электропривода (статорной и роторной обмоток, подшипников, соединительных муфт, передач, элементов крепления и т.д.) может возникнуть под действием напряжений, изменений свойств конструкционных материалов в сторону меньших пределов прочности и текучести [7]. Неуравновешенность вала ротора или электропривода приводит к повышенному износу подшипников, причем наибольшему воздействию подвергаются те подшипники, которые находятся ближе всего к неуравновешенному участку. Около 1,3% парка электродвигателей ежегодно отправляется в капитальный ремонт из-за разрушения обмоток статора или подшипников, вызванного повышенными вибрациями различной природы [8]. Известна эмпирическая формула, в которой срок службы подшипника обратно пропорционален кубу амплитуды вибрации [9].

При наличии вибрации в системе электропривода помимо момента сопротивления двигателю приходится преодолевать момент, вызванный неуравновешенностью ротора (валопровода). При этом вибрация всегда снижает полезную мощность. Наибольшие потери вырабатываемой мощности, вызванные вибрационными процессами, наблюдаются в агрегатах с турбогенераторами, в которых эти потери могут достигать нескольких процентов [10].

Известно, что устранение вибрационных процессов в приводных комплексах – задача не новая. В [11] предлагается использовать для гашения линейных колебаний гидравлические опоры. В [12] предлагается подавлять пульсации крутящего момента посредством добавления на управляющий вход специального компенсационного возмущения к питающему напряжению.

Полезная механическая мощность электропривода полностью используется для получения нужного вида движения, создаваемого исполнительным механизмом.



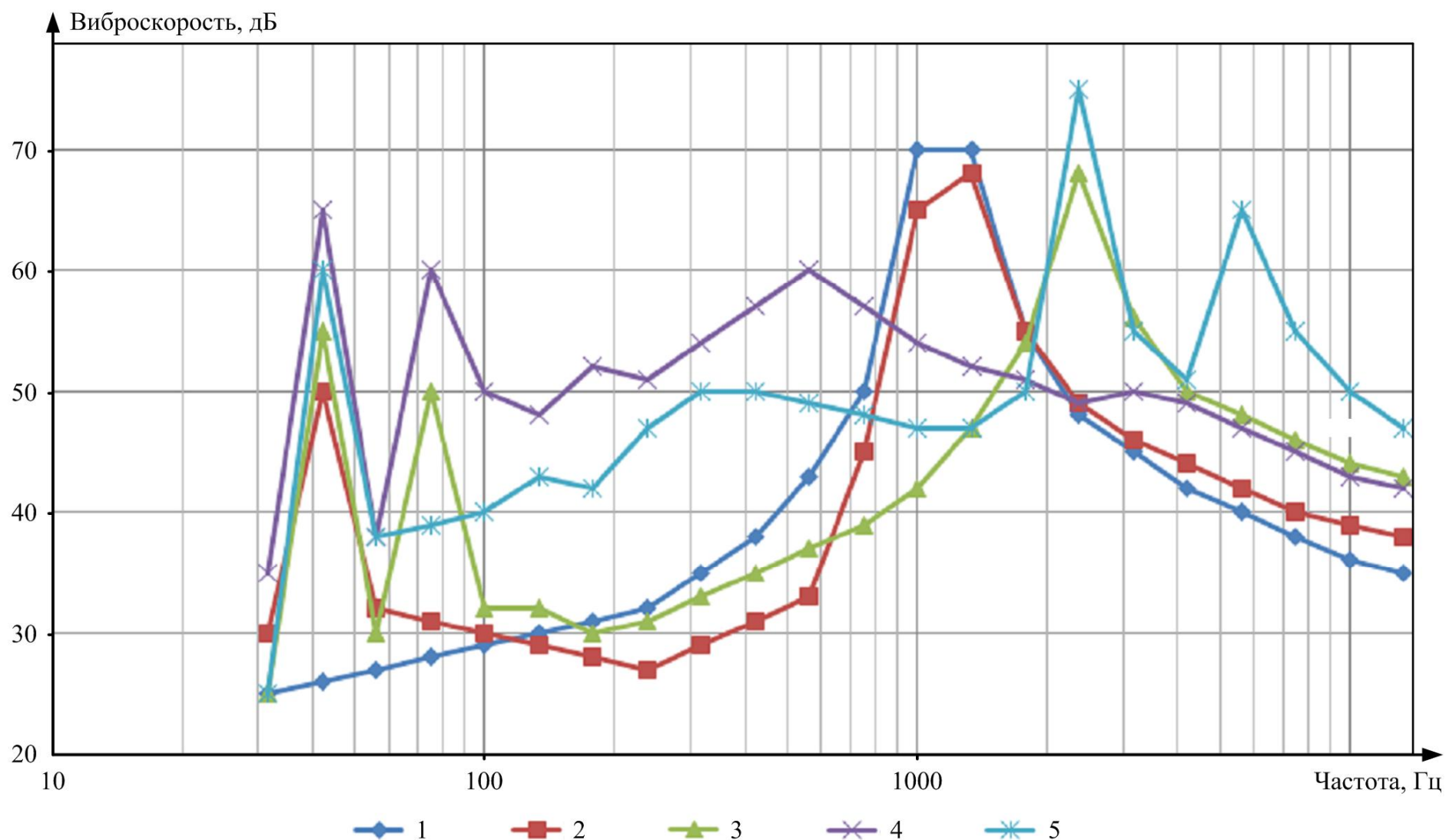


Рис. 1. Спектральные плотности некоторых типов двигателей разной мощности и конструктивного исполнения

Все прочие потоки механической мощности в электроприводе создают дополнительную нагрузку на его элементы. С одной стороны, эту нагрузку необходимо оценить при проектировании электромеханического комплекса для обеспечения его надежной работы. С другой стороны, посредством использования известных виброгасящих устройств целесообразно снизить интенсивность реактивных потоков мощности в приводном электромеханическом комплексе.

#### ОЦЕНКА ПОТОКОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Физическая модель электропривода, расположенного на неподвижном основании, представлена на рис. 2.

В общем случае система электропривода силового агрегата представляет собой механически соединенные электродвигатель, валопровод и исполнительный механизм (например, насос или компрессор).

Если сумма проекций на оси координат сил и моментов, действующих в электроприводе в каждый момент времени равна нулю, то такой привод считается уравновешенным (рис. 2). Динамическое равновесие ротора, вращающегося вокруг своей оси, определяется системой уравнений:

$$\begin{cases} F = \sum_{i=1}^n F_i = \sum_{i=1}^n m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = 0; \\ M = \sum_{i=1}^m M_i = \sum_{i=1}^m J_i \frac{d^2 \varphi_i}{dt^2} = \sum_{i=1}^m m_i r_i \frac{d^2 \varphi_i}{dt^2} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $F$  – совокупная сила, действующая на ротор;  $F_i$  –  $i$ -я составляющая совокупной силы, действующей на ротор;  $m_i$  – масса  $i$ -го элемента ротора;  $y_i$  – перемещение центра масс элемента ротора относительно положения

равновесия;  $M$  – совокупный момент сил ротора;  $M_i$  – составляющая момента силы, действующей на ротор;  $J_i$  – момент инерции  $i$ -го элемента ротора;  $\varphi_i$  – угловое перемещение ротора;  $r_i$  – расстояние от центра масс элемента до оси вращения ротора.

В действительности невозможно добиться абсолютной уравновешенности ротора двигателя, поэтому на этапе конструирования двигателя допускается эксцентриситет вала ротора в пределах допустимых значений. Наличие неуравновешенности в роторе нарушает первое условие системы (1). Наличие переменных нагрузок, сил трения при вращении и пульсаций питающего напряжения приводит к нарушению второго условия системы (1). В общем случае неуравновешенный ротор двигателя генерирует под действием центробежных сил вынуждающую силу, действующую на основание, и пульсирующий момент:

$$\begin{cases} F = F_r \sin(\omega t + \varphi) \neq 0; \\ M = M_r \sin(\omega t + \varphi) \neq 0. \end{cases} \quad (2)$$

В системе (2) первое выражение характеризует статический дебаланс ротора, а второе – его динамический дебаланс. На рис. 3 представлена физическая модель электропривода с неуравновешенным ротором с обозначением действующих сил и моментов.

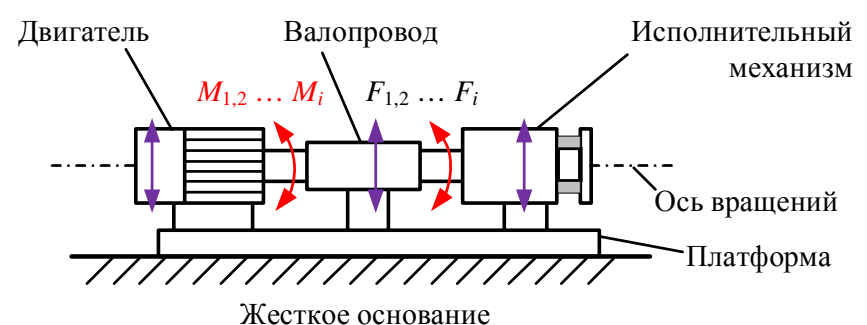


Рис. 2. Физическая модель уравновешенного электропривода



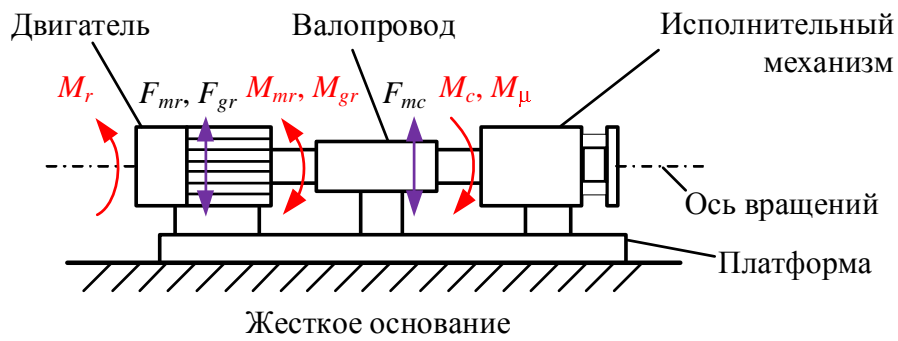


Рис. 3. Физическая модель неуравновешенного электропривода, расположенного на жестком основании

На рис. 3 показаны следующие силы и моменты:  $F_{mr}$  – инерционная сила центра масс ротора, связанного с приводом;  $F_{mc}$  – колебания инерционной силы, связанные с эксцентриситетом вала ротора;  $F_{gr}$  – инерционная сила, действующая на ротор с валопроводом;  $M_c$  – момент сопротивления валопровода и нагрузки;  $M_r$  – крутящий момент двигателя;  $M_\mu$  – сила трения, возникающая при вращении;  $M_{mr}$ ,  $M_{gr}$  – колебания момента, связанные с эксцентриситетом вала (инерционная и гравитационная составляющие).

При составлении системы дифференциальных уравнений для модели, приведенной на рис. 3, введены обобщенные координаты: угол поворота ротора –  $\varphi$  и вертикальные перемещения центра масс ротора –  $y$  [13]. По теореме о движении центров масс дифференциальные уравнения сил, действующих на ротор, можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} (m + m_r) \frac{dV_r}{dt} = (m + m_r) g; \\ J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M_r - m_r r \frac{d^2 y}{dt^2} \sin \varphi - m_r g r \sin \varphi, \end{cases} \quad (3)$$

где  $m$  – масса платформы с электроприводом;  $m_r$  – масса ротора;  $V_r$  – линейная скорость центра масс ротора;  $g$  – ускорение свободного падения;  $J$  – момент инерции ротора;  $M_r$  – момент, создаваемый статорной обмоткой;  $r$  – радиус эксцентриситета вала ротора (расстояние от центра масс до оси вращения).

Член  $V_r / dt$  в системе (3) предстает как сумма ускорения центра масс и гармонических колебательных движений на некоторой частоте вибровозмущения. Главный вектор сил инерции при этом представляет собой сумму касательной и нормальной составляющих и находится по формуле [14]

$$F_c = m_r \frac{dV_r}{dt} = m_r a^t \sin \varphi + m_r a^n \cos \varphi, \quad (4)$$

где  $F_c$  – проекция инерционной силы, вызванной вращением неуравновешенного ротора;  $a^t$  и  $a^n$  – соответственно тангенциальное и центростремительное ускорение центра масс неуравновешенного ротора. Как известно из [14], эти ускорения находятся по формулам:

$$\begin{cases} a^t = \frac{d^2 \varphi}{dt^2} r; \\ a^n = \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 r. \end{cases} \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в (3), уравнения движения ротора двигателя (см. рис. 3) могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{cases} m_n \frac{d^2 y}{dt^2} - m_r r \left( \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \sin \varphi + \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \cos \varphi \right) = m_n g; \\ J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M_r - m_r r \frac{d^2 y}{dt^2} \sin \varphi - m_r g r \sin \varphi, \end{cases} \quad (6)$$

где  $m_n = m + m_r$ .

На рис. 4 представлена физическая модель электропривода на вязкоупругом основании. На рис. 4 показаны следующие проекции сил во фронтальной и горизонтальной плоскостях:  $F_m$  – инерционная сила, действующая на платформу с установленным приводом;  $F_\mu$ ,  $F_C$  – демпфирующая и упругая силы, возникающие в вязкоупругом основании при колебаниях системы;  $F_g$  – инерционная сила, действующая на платформу с приводом;  $F_{mz}$ ,  $F_{mcz}$ ,  $F_{mrz}$  – проекции сил инерции платформы, эксцентриситета и ротора соответственно на горизонтальную плоскость (направление их действия показано соответствующим символом).

Вязкоупругие элементы (рис. 4) создают компенсационные силы, препятствующие отклонению системы от положения равновесия и существенно ослабляющие высокочастотные вибрации. В качестве таковых могут быть использованы и виброизоляторы, преобразующие энергию колебаний в тепло и смягчающие действие вибраций за счет сил упругости. В качестве универсального виброзащитного элемента могут быть использованы активные магнитореологические демпферы, управляемые магнитным полем. Для вязкоупругого основания определены приведенный коэффициент жесткости  $C$  и коэффициент демпфирования  $\mu$  [15, 16]. На основании второго закона Ньютона можно записать:

$$\begin{cases} m_n \frac{d^2 y}{dt^2} - m_r r \left( \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \sin \varphi + \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \cos \varphi \right) = \\ = -\mu \frac{dy}{dt} - Cy + m_n g; \\ m_n \frac{d^2 z}{dt^2} - m_r r \left( \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \cos \varphi - \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \sin \varphi \right) = \\ = -\mu_z \frac{dz}{dt} - C_z z; \\ J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M_r - \mu_{rot} \frac{d\varphi}{dt} - m_r r \frac{d^2 y}{dt^2} \sin \varphi - \\ - m_r g r \sin \varphi, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\mu_{rot}$  – коэффициент вязкого трения в подшипниках;  $y$ ,  $z$  – соответственно вертикальные и горизонтальные линейные перемещения центра масс ротора относительно жесткого основания.

Система уравнений (7) описывает периодические изменения сил и моментов относительно положений равновесия колебательной системы (см. рис. 4).

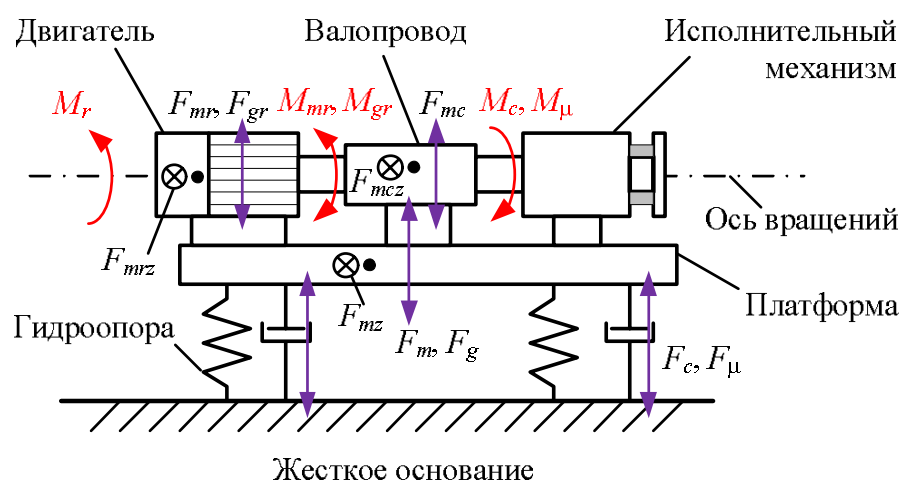


Рис. 4. Физическая модель электропривода, расположенного на вязкоупругом основании

Первое уравнение представляет собой закон движения валопровода относительно неподвижной системы отсчета вдоль вертикальной оси  $y$ . Второе выражение описывает закон движения неуравновешенного валопровода в направлении, перпендикулярном фронтальной плоскости. Третье выражение представляет собой закон вращательного движения неуравновешенного валопровода вокруг оси вращения  $x$ .

Мощность движения ротора распределяется на потоки полезной мощности  $P_{rot}$ , пульсационной мощности  $Q_{rot}$  и мощность линейных возмущений  $Q_{lin}$ . Если в механическую систему электропривода включить вязкоупругое основание, тогда в уравнении потоков мощности появляется дополнительная компонента  $Q_{hm}$ , характеризующая рассеяние энергии колебаний в магнитоэологических виброгасителях:

$$\Sigma S = P_{rot} + Q_{rot} + Q_{lin} + Q_{hm}. \quad (8)$$

Возникновение дополнительных слагаемых в выражении (8) обозначает уменьшение неактивных составляющих мощности благодаря тому, что энергия, поглощаемая виброгасителями, отнимается из энергии вынужденных колебаний неуравновешенного ротора.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ

Имитационное моделирование механических колебательных процессов в системе электропривода выполняется с целью проведения оценки изменения ве-

личин составляющих потоков механической мощности в зависимости от изменения коэффициентов демпфирования и жесткости опор, а также определения возникающих при этом усилий.

В качестве среды моделирования динамических процессов в неуравновешенном приводе была выбрана опция *SimMechanics*, входящая в пакет *Matlab*. Программа предназначена для исследования законов движения в механических системах и возникающих силовых воздействий между ее элементами. Модель, разработанная в этой среде, представляет собой совокупность тел, взаимодействующих между собой через соединительные связи (степени свободы, вязкоупругие элементы, жесткие соединения и т.д.). Входными и выходными данными для модели являются силы и перемещения, снимаемые с определенных звеньев модели. Важным достоинством модели *SimMechanics* является возможность интеграции в нее общих блоков *Simulink* и возможность работы со стандартными средствами *Matlab*.

На основании системы уравнений (7) для физической модели системы электропривода, расположенного на вязкоупругом основании (см. рис. 4), была построена имитационная модель, представленная на рис. 5.

Данная модель учитывает потоки механической мощности как от вибрирующей платформы с расположенным на ней электроприводом по направлению к магнитоэологическим гасителям, так и обратные воздействия вязкоупругих сил. Модель учитывает действие составляющих сил, направленных перпендикулярно фронтальной плоскости (см. рис. 4), однако предметом исследования выбраны лишь перемещения, силы и моменты, входящие в 1-е и 3-е выражения системы (7). За основу был взят двигатель переменного тока EG4501-4 (аналоги ДАЗО4-85/49-4У1, А4 400У4М) мощностью 630 кВт с частотой вращения 1485 об/мин, КПД – 94,5, используемый для мощных дробилок и промышленных компрессоров.

Принцип работы системы управления магнитоэологическим трансформатором изложен в [17].

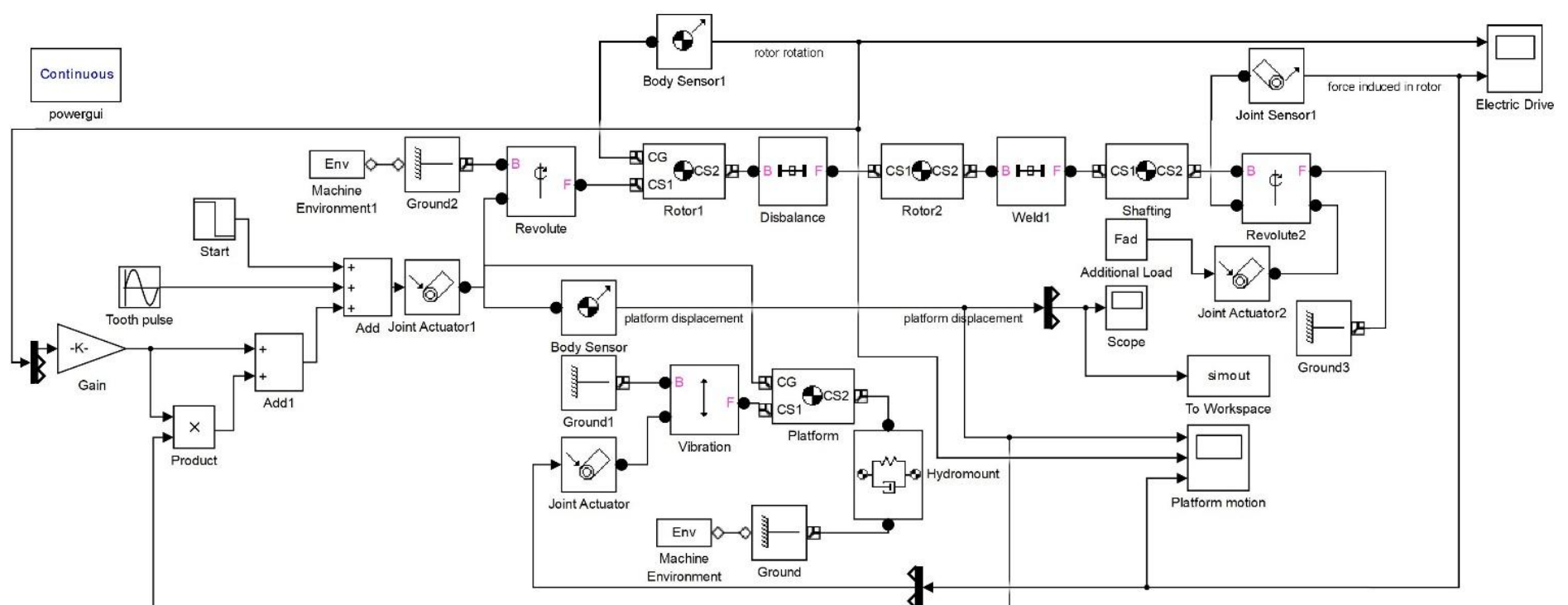


Рис. 5. Программная модель динамической системы электропривода, расположенного на вязкоупругом основании

Поскольку реальные твердотельные конструкции всегда обладают упругими и диссипативными свойствами, физическая модель электропривода, размещенного на жестком основании (см. **рис. 3**), также может быть описана системой уравнений (7). При этом параметры  $C$  и  $\mu$  будут представлять собой приведенные коэффициенты жесткости  $C_0$  и демпфирования  $\mu_0$  упругой системы электропривода, учитывающие вязкоупругие свойства конструктивных элементов приводного комплекса. Таким образом, для сравнения динамических свойств первой (на жестком основании) и второй (на вязкоупругом основании) физических моделей для общей программной модели были выбраны разные исходные данные: для модели №1 (жесткое основание)  $C_0 = 10^4$  Н/мм,  $\mu_0 = 1$  Н·с/м, а для модели №2 (с использованием виброизоляторов)  $C_0 = 100$  Н/мм,  $\mu_0 = 10$  Н·с/м.

В **табл. 1** занесены общие для обеих моделей исходные данные.

Тензор инерции вала представляет собой трехмерную квадратную матрицу:

$$J = \begin{pmatrix} 0,775 & 0 & 0 \\ 0 & 0,74 & 0 \\ 0 & 0 & 0,74 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Программные модели динамической системы и системы управления связаны между собой через аналитически заданные переменные. За управляемое изменение параметров  $C$  и  $\mu$  отвечает блок регулирования, представленный на **рис. 6**.

Таблица 1

Исходные данные для модели

Физическая величина	Значение
Масса электропривода на платформе $m$ , кг	200
Масса валопровода $m_r$ , кг	70
Крутящий момент двигателя $M$ , Н·м	4000
Частота вращения вала $n$ , об/мин	1500
Момент инерции дебаланса вала $J$ , кг·м <sup>2</sup>	$22,6 \cdot 10^{-3}$
Длина несбалансированного участка $l$ , м	0,6
Радиальный изгиб вала $\Delta r$ , мм	4,7
Тензор инерции вала, кг·м <sup>2</sup>	9

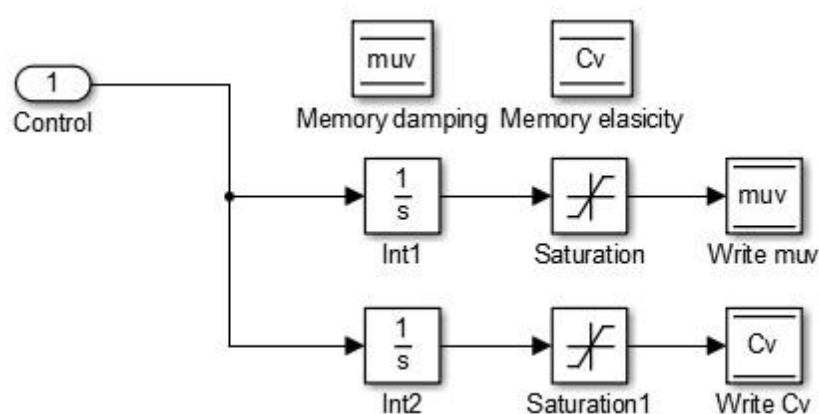


Рис. 6. Блок варьирования коэффициентов жесткости  $C$  и вязкости  $\mu$  магнито-реологического виброгасителя

## ОБРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НЕУРАВНОВЕШЕННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В процессе моделирования были получены диаграммы виброперемещений неуравновешенного ротора относительно неподвижного основания и линейных составляющих сил, действующих на подшипники двигателя.

Получен спектр инерционной силы, действующей на подшипники. Из сравнения спектрограмм, изображенных на **рис. 7** и **8**, очевидно, что многие ярко выраженные субгармоники были подавлены действием диссипативных и упругих сил, создаваемых магнито-реологическими демпферами.

При этом действие инерционной силы на элементы электропривода, установленного на жестком основании, примерно в 1,5 раза больше, чем действие этой силы на систему, оснащенную магнито-реологическими виброгасителями.

Оценка потоков механической мощности может быть выполнена с использованием формулы (8). Для этого нужно получить сигнал виброперемещений электропривода по отношению к неподвижному основанию, на котором расположена динамическая система. Этот сигнал может быть представлен в виде временной диаграммы. Диаграммы виброперемещений неуравновешенного вала ротора в радиальном (вертикальном) направлении, полученные в ходе программного моделирования, приведены на **рис. 9** и **10**.

Уровни колебаний силы и момента на валу ротора были измерены посредством виброизмерительной аппаратуры («МС-201», «Октава», «Вибран») и представлены в виде диаграммы вибросигнала. Для представления этого сигнала в спектральной форме можно применить один из способов Фурье-преобразования. Поскольку вибрация носит характер вынужденных колебаний, следовательно, зная амплитуду каждой  $i$ -й гармоники вибросигнала, можно численно определить ее мощность:

$$P_i = \frac{1}{2} A_i^2 \mu f_i^2, \quad (10)$$

где  $f_i$  – частота исследуемой гармоники;  $\mu$  – коэффициент демпфирования в подшипниках;  $A_i$  – амплитуда исследуемой гармоники.

Суммируя мощности наиболее выраженных гармоник, можно численно определить значения каждой составляющей потока механической мощности:

$$P = \sum_{i=1}^k P_i. \quad (11)$$

Мощность, поглощаемая опорами, определяется по формуле

$$Q_{hm} = \frac{\mu}{2mf} P. \quad (12)$$

Полученные значения составляющих потоков мощности приведены в **табл. 2**.



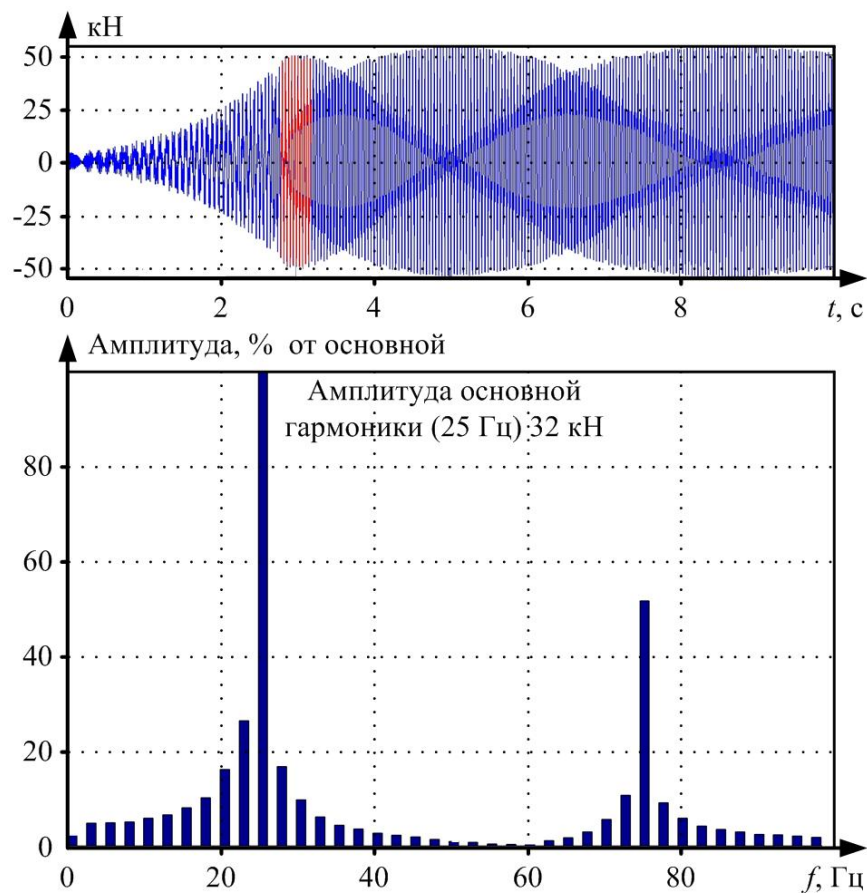


Рис. 7. Диаграмма и спектр инерционной силы, действующей на подшипники двигателя, в динамической системе электропривода, установленного на неподвижном основании

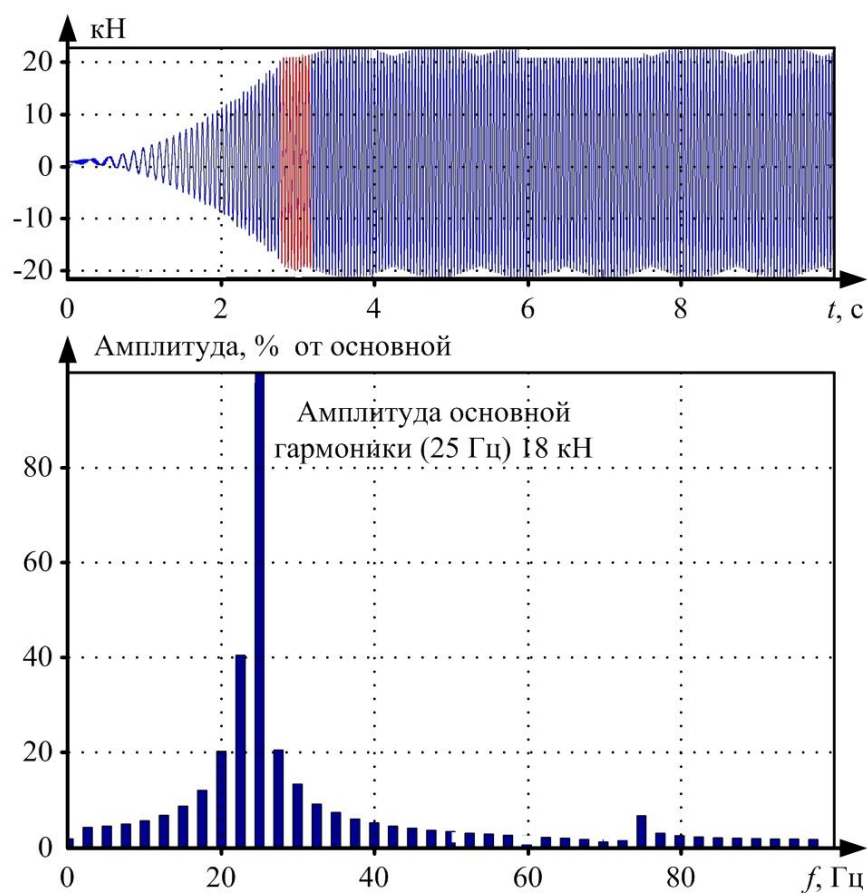


Рис. 8. Диаграмма и спектр инерционной силы, действующей на подшипники двигателя, в динамической системе электропривода, установленного на вязкоупругом основании

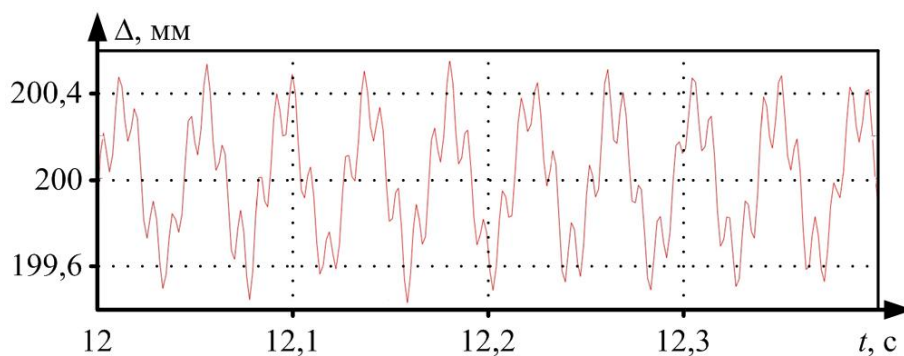


Рис. 9. Диаграмма перемещения валопровода относительно неподвижной системы отсчета в системе электропривода, установленной на неподвижном основании

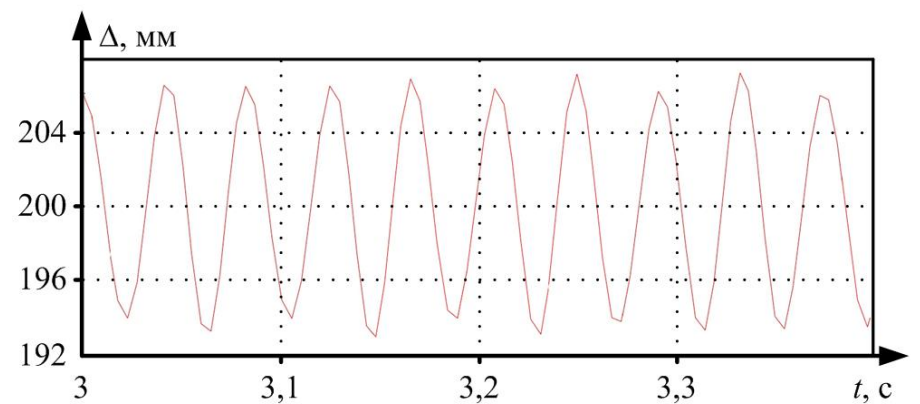


Рис. 10. Диаграмма перемещения валопровода относительно неподвижной системы отсчета в системе электропривода, установленной на вязкоупругом основании

Таблица 2

Значения составляющих механической мощности, кВт

Составляющая механической мощности	Модель 1	Модель 2
Полезная мощность $P_{rot}$	590	595
Мощность линейных перемещений $Q_{lin}$	14	7
Мощность пульсаций крутящего момента $Q_{rot}$	23	15
Мощность, рассеиваемая диссипативными силами $Q_{hm}$	1	11

При проверке полученных результатов суммарные значения механических мощностей каждой из динамических моделей электропривода совпали как между собой, так и со значением номинальной мощности двигателя:

$$P_n = M 2\pi f = 628,3 \text{ кВт};$$

$$\Sigma S_1 = P_{rot} + Q_{lin} + Q_{rot} + Q_{hm} = 628 \text{ кВт};$$

$$\Sigma S_2 = P_{rot} + Q_{lin} + Q_{rot} + Q_{hm} = 628 \text{ кВт}.$$

Следует отметить, что обеспечение эффективной работы магнитореологических виброгасителей требует наличия внешнего источника энергии. Поскольку каждый электромагнит магнитореологического трансформатора имеет активное сопротивление  $R_{hm} = 420 \text{ Ом}$ , то требуемая дополнительная мощность равна:

$$P_{MRT} = 4 \cdot 420 \cdot 0,2^2 \approx 70 \text{ Вт}.$$

Электрическая мощность, потребляемая виброзащитной системой, почти в 80 раз меньше значения сэкономленной полезной мощности электродвигателя, полученного в результате имитационного моделирования.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье были рассмотрены две динамические модели системы электрического привода: с установкой компонентов системы на виброизоляторы и без них. Передача механической энергии в таких системах сопровождается возникновением вибрационных процессов механической и электромагнитной природы.

Построенная имитационная модель позволяет исследовать динамические процессы в электроприводе, закрепленном на единой платформе с виброзащитной системой с управляемыми параметрами. Из полученных диаграмм следует, что благодаря применению виброизоляторов совокупная сила, действующая на подшипники двигателя, уменьшается приблизительно в 1,5 раза.



Суммы потоков механической мощности обеих динамических моделей электропривода соответствуют расчетному значению активной мощности двигателя  $P_n = 628$  кВт.

Сравнение спектрограмм двух динамических систем электропривода показало, что система, оснащенная активными виброгасителями, поглощает до 50% потоков пульсационной механической энергии электропривода, преимущественно изымаемой из мощности линейных виброперемещений.

**Представленные результаты научно-исследовательской работы получены в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-590.2018.8).**

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов В.Г. Электротехнический справочник: в 4 т. Т.2. Электротехнические изделия и устройства. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 518 с.
2. Петров А.П. Раздаточные коробки передач. Курган: Курганский государственный университет, 2014. 40 с.
3. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. СПб.: СПбГМТУ, 2004. 156 с.
4. Obaid R.R., Habelter T.G., Stack J.R. Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors // The 4th IEEE International symposium on diagnostics for electrical machines, power electronics and drives. 2003. P. 182-187.
5. Коробейников А.Б., Сарваров А.С. Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их развития // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 1(26). С. 4-9.
6. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
7. Pachurin G.V. Life of Plastically Deformed Corrosion. Resistant Steel // Russian Engineering Research. 2012. Vol. 32. № 9-10. P. 661-664.
8. Методика диагностики и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя в режиме его функционирования / Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р., Калугин Ю.А., Одинцов К.Э. // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3(40). С. 70-78
9. Свешников Б.П. Выбор и расчет подшипников качения: учеб. пособие. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 1994. 65 с.
10. Миндрин В.И., Пачурин Г.В., Ребрушкин М.Н. Магнитная вибрация и снижение отрицательных последствий технической вибрации энергетических машин // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 1. С. 47-50.
11. Устранение гистерезисных эффектов в ферромагнитных сердечниках электромеханических преобразователей гидравлических виброопор / Гордеев Б.А., Осмехин А.Н., Охулков С.Н., Плехов А.С. // Вестник ИГЭУ. 2013. №5. С. 64-68.
12. Tingsu S., Hattori S., Ishida M., Hori, T. Suppression control method for torque vibration of AC motor utilizing repetitive controller with Fourier transform // IEEE Transactions on Industry Applications. 2002. Vol. 38, Is. 5. P. 1316-1325.
13. Методы и устройства ослабления вибрации электромеханических комплексов: монография / Охулков С.Н., Плехов А.С., Титов Д.Ю., Шевырëв Ю.В. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2016. 254 с.
14. Андронов В.В. Теоретическая механика. Ч. 2. Динамика: учеб. пособие. М.: МГУЛ, 2003. 128 с.
15. Ermolaev A.I., Okhulkov S.N., Plekhov A.S., Titov D.Y. Semiconductor converter for field magnets of hydromounts with a magnetorheological transformer // International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing. 2015. P. 1-3.
16. Guo S., Yang S., Pan C. Dynamic modeling of magnetorheological damper behaviors // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2006. Vol. 17. Iss. 1. P. 3-14.
17. Ermolaev A.I., Plekhov A.S., Titov D.Y., Anuchin A.S., Vagapov Yu. Adaptive control of magnetorheological fluid damper // Universities Power Engineering Conference. 2017. P. 202-207.

Поступила в редакцию 25 декабря 2018 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

#### VIBRATION POWER ESTIMATION IN ELECTRIC DRIVE

Artem I. Ermolaev

Postgraduate Student, Institute of Electric Power Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. E-mail: acidwolfvx@rambler.ru.

Aleksandr S. Plekhov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Institute of Electric Power Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. E-mail: aplehov@mail.ru.

Dmitriy Yu. Titov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Institute of Electric Power Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. E-mail: d.titov@nntu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7320-984X>.

Evgeniy A. Chernov

Ph.D. (Engineering), Professor, Institute of Electric Power Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. E-mail: evgenij.chernov.41@list.ru

This article considers the flow of mechanical power in the electric drive under the condition of vibration disturbances. The paper discusses two electric models mounted on a rigid base and shock absorbers. The transfer of mechanical energy in such systems causes oscillation as mechanical and electromagnetic

nature. Viscoelastic elements create countervailing force preventing deviation from the equilibrium position of the system and substantially attenuating high frequency vibrations. Studies were conducted using the methods of simulation dynamic modeling and frequency analysis. The values of linear

displacements of the center of mass of the unbalanced rotor and the radial components of the forces acting on the engine bearings are obtained as a result of modeling. The action of the inertial force on the motor mounted on the rigid base is approximately 1.5 times greater than the effect of this force on the system equipped with magnetorheological shock absorbers. The estimation of mechanical power fluxes is made according to the spectrum of inertial force acting on the bearings. Spectrograms show that many pronounced harmonics are suppressed by the action of dissipative and elastic forces created by magnetorheological shock absorbers. The comparison of the spectrograms of the two dynamic systems showed that the system with active shock absorbers absorbs up to 50% of pulsating mechanical energy of vibration perturbations of the electric drive.

**Keywords:** electric drive, vibrations, damping, mechanical power flows, mathematical modeling, dynamic model of electric drive, vibration supports, viscoelastic base.

#### REFERENCES

1. Gerasimov V.G. *Elektrotekhnicheskiiy spravochnik: v 4 t. T.2. Elektrotekhnicheskiye izdeliya i ustroystva* [Electrotechnical reference: in 4 vol. Vol.2. Electrical products and devices] Moscow: Publisher MEI, 2003, 518 p. (In Russian).
2. Petrov A.P. *Razdatochnyye korobki peredach* [Transfer gear boxes]. Kurgan: KSU, 2014, 40 p. (In Russian).
3. Barkov A.V., Barkova N.A. *Vibratsionnaya diagnostika mashin i oborudovaniya* [Vibration diagnostics of machines and equipment]. St. Petersburg: SPbGMTU, 2004, 156 p. (In Russian).
4. Obaid R.R., Habelter T.G., Stack J.R. Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors. *The 4th IEEE International symposium on diagnostics for electrical machines, power electronics and drives*, 2003, pp. 182-187.
5. Korobeinikov A.B., Sarvarov A.S. Analysis of Existing Methods for Diagnostics of Electric Motors and Perspectives of Their Development. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2015, no. 1(26), pp. 4-9. (In Russian).
6. Shubov I.G. *Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin* [Noise and vibration of electric machines]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986, 208 p. (In Russian).
7. Pachurin G.V. Life of Plastically Deformed Corrosion. Resistant Steel. *Russian Engineering Research*, 2012, vol. 32(9), pp. 661-664.
8. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Kalugin Yu.A., Odintsov K.E. Method of Inductions Motor Malfunction Diagnostics and Identification During Operation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 3(40), pp. 70-78. (In Russian).
9. Sveshnikov B.P. *Vybor i raschet podshipnikov kacheniya* [Selection and calculation of rolling bearings]. Perm: PNRPU, 1994. 65 p. (In Russian).
10. Mindrin V.I., Pachurin G.V., Rebrushkin M.N. Magnetic vibration and reduce the negative consequences of technical vibration power machines. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii* [Modern high technologies], 2015, no.1, pp. 47-50. (In Russian).
11. Gordeev B.A., Osmekhin A.N., Okhulkov S.N., Plekhov A.S. Elimination of hysteresis effects in ferromagnetic cores of hydraulic vibratory bearing electromechanical converters. *Vestnik IGEU* [Bulletin of IGEU], 2013, no. 5. pp. 64-68. (In Russian).
12. Tingsu S., Hattori S., Ishida M., Hori, T. Suppression control method for torque vibration of AC motor utilizing repetitive controller with Fourier transform. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, vol. 38 (5), pp. 1316-1325.
13. Okhulkov S.N., Plekhov A.S., Titov D.Yu., Shevryov Yu.V. *Metody i ustroystva oslableniya vibratsii elektromekha-nicheskikh komplekсов* [Methods and devices for reducing the vibration of electromechanical complexes] N. Novgorod: NSTU, 2016, 254 p. (In Russian).
14. Andronov V.V. *Teoreticheskaya mekhanika. CH. 2. Dinamika: Uchebnoe posobie*. [Theoretical mechanics. Part 2. Dynamics: manual for students] Moscow: BMSTU, 2003, 128 p. (In Russian).
15. Ermolaev A.I., Okhulkov S.N., Plekhov A.S., Titov D.Y. Semiconductor converter for field magnets of hydromounts with a magnetorheological transformer. *International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing*, 2015, pp. 1-3.
16. Guo S., Yang S., Pan C. Dynamic modeling of magnetorheological damper behaviors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2006, vol. 17, no. 1, pp. 3-14.
17. Ermolaev A.I., Plekhov A.S., Titov D.Y., Anuchin A., Vagapov Yu. Adaptive control of magnetorheological fluid damper. *Universities Power Engineering Conference*, 2017, pp. 202-207.

Ермолаев А.И., Плехов А.С., Титов Д.Ю., Чернов Е.А. Оценка мощности вибрации в электроприводе // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 1(42). С. 30-37. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-30-37](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-30-37)

Ermolaev A.I., Plekhov A.S., Titov D.Yu., Chernov E.A. Vibration Power Estimation in Electric Drive. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 30-37. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-30-37](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-30-37)

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В АЛГОРИТМЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ С УДАЛЕНИЕМ ВЫДЕЛЕННЫХ ГАРМОНИК

Оптимальный выбор углов переключений в алгоритме широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с удалением выделенных гармоник является сложным вопросом, включающим в себя решение нелинейных уравнений с бесконечным множеством решений. Для расчёта углов переключений в данной статье предложен метод численной оптимизации роя частиц, который был модифицирован путём добавления в алгоритм переменного коэффициента инерции для каждой итерационной процедуры, что позволило повысить надёжность алгоритма, избежать попадания в локальный экстремум и быстрее достичь глобального экстремума в полном пространстве решений. Предложенная реализация позволяет рассчитать несколько наборов углов переключений, что достаточно трудно получить традиционными методами оптимизации функций. В статье показаны результаты расчёта углов переключений для исключения гармоник низкого порядка в автономном режиме с помощью компьютера. Теоретические результаты анализируются и проверяются путем моделирования на примере трехуровневого преобразователя с фиксированной нейтральной средней точкой звена постоянного тока. Результаты моделирования показывают, что вышеупомянутый метод роя частиц эффективно определяет наборы углов переключений для алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник, на основе которых можно добиться наилучшего показателя суммарного гармонического искажения (THD) выходного напряжения преобразователя. Это может быть достигнуто путём использования определённого набора переключений при различных коэффициентах модуляций. Результаты исследования могут быть использованы для разработки алгоритмов ШИМ с УВГ многоуровневых преобразователей.

**Ключевые слова:** преобразовательная техника, ШИМ с удалением выделенных гармоник, метод роя частиц, суммарный коэффициент гармонического искажения.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы многоуровневые преобразователи являются предметом пристального внимания исследователей в области больших мощностей и высоких напряжений. Многоуровневые топологии построения силовых схем полупроводниковых преобразователей обладают преимуществами в отношении энергоэффективности, качеству электроэнергии и уровню электромагнитных помех. Они широко используются для питания двигателей переменного тока с регулируемой скоростью вращения, в статических системах преобразования электрической энергии и гибких системах электроснабжения постоянного и переменного тока [1-6]. Ввиду низкой частоты коммутации высокомоощных вентилях устранение определённых гармоник из выходного напряжения высокомоощного преобразователя является актуальной задачей.

Для управления выходным напряжением преобразователя широко применяются традиционные методы широтно-импульсной модуляции (ШИМ), такие как синусоидальная ШИМ (СШИМ) и пространственно-векторная ШИМ (ПВШИМ). Однако алгоритмы модуляции на их основе не могут обеспечить устранение необходимых гармоник. Другой известный способ управления ключами преобразователя заключается в подавлении наиболее значимых по уровню гармоник посредством заранее определённых наборов углов переключений. Такой способ в отечественной литературе получил название ШИМ с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ) [7-9]. Алгоритм на основе ШИМ с УВГ может генерировать более качественное напряжение преобразователя по сравнению с СШИМ и

ПВШИМ при одинаковой частоте коммутации полупроводниковых модулей. Основная трудность в реализации ШИМ с УВГ заключается в нахождении решения системы нелинейных уравнений, полученных из самой задачи приведения к нулю выделенных гармоник из периодического выходного напряжения преобразователя.

Анализ научной литературы показал, что для нахождения углов переключения ШИМ с УВГ часто используют итерационные численные методы. У них необходимо заранее определить начальные приближения, которые должны быть близки к правильному решению системы уравнений. Такие методы правильно и быстро находят решения при условии правильно выбранного начального приближения, но позволяют получить только один набор решений. В настоящее время становятся популярными методы на основе стохастического поиска, такие как генетический алгоритм (ГА) [14-16] и оптимизационный метод роя частиц (МРЧ) [17-19]. Вышеупомянутые неудобства, существующие в классических итерационных методах, удовлетворительно преодолеваются с помощью ГА и МРЧ.

В данной статье для удаления выделенных гармоник был использован модифицированный МРЧ, основанный на добавлении переменного коэффициента инерции для каждой итерационной процедуры. Статья организована следующим образом: обозначена формулировка проблемы; показан принцип и этапы выполнения предложенного алгоритма МРЧ; приведены результаты моделирования зависимостей углов переключений, коэффициента модуляции и суммарно гармонического искажения (THD) выходного напряжения; представлены основные выводы по работе.

## ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ ДЛЯ ШИМ с УВГ

На рис. 1, а показана схема трехуровневого преобразователя с фиксированной нейтральной средней точкой звена постоянного тока (трёхуровневый преобразователь). Схема включает по четыре полупроводниковых модуля  $S_{a1-4}$ ,  $S_{b1-4}$  и  $S_{c1-4}$  с обратными диодами в каждом фазном плече моста, два эквивалентных конденсатора  $C_1$  и  $C_2$ , образующих постоянное напряжение  $U_{dc}$ . Для данного устройства применяется метод ШИМ с УВГ, при котором расчёт углов переключения  $\alpha_N$  необходим для генерации сигналов управления включением/выключением модулей с целью формирования кривой выходного фазного напряжения, как показано на рис. 1, б, где  $U_{A0}$  – напряжение фазы А,  $\omega$  – угловая частота,  $t$  – время.

В методе ШИМ с УВГ для определения всех гармоник выходного фазного напряжения преобразователя используется анализ Фурье. С помощью преобразования Фурье периодическая функция напряжения получается в виде

$$V_{A0}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \sin(n\omega t) + B_n \cos(n\omega t)]. \quad (1)$$

Принимая во внимание четвертьволновую симметрию напряжения каждой фазы, чётные гармоники будут отсутствовать (т.е.  $B_n = 0$ ), а составляющие  $n$ -й нечётной гармоники определяются углами переключения первой четверти периода как

$$A_n = \begin{cases} \frac{4 V_{dc}}{n\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k), n=\text{нечётные}; \\ 0, n=\text{чётные}, \end{cases} \quad (2)$$

при условии, что

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_N < \frac{\pi}{2}. \quad (3)$$

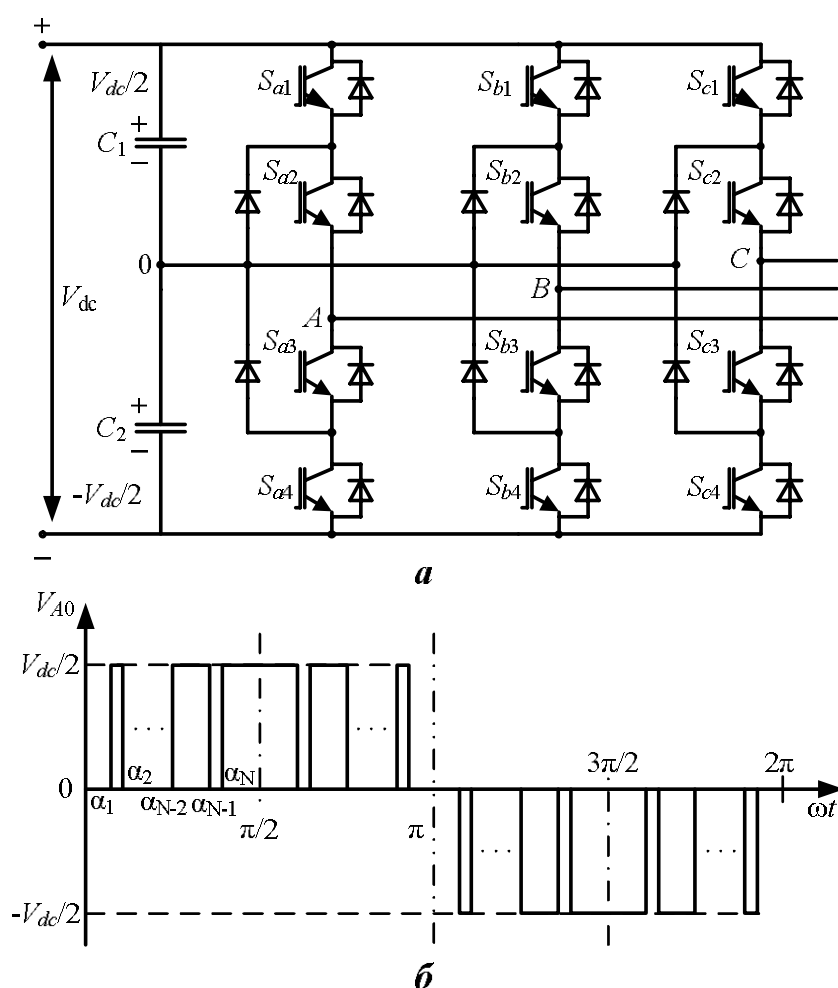


Рис. 1. Трёхуровневый преобразователь:  
а – схема преобразователя; б – типовая форма

 выходного напряжения ( $N$  – нечетная)

В системе (2)  $A_1$  определяет основную гармонику напряжения преобразователя, а  $A_n$ , где  $n \neq 1$ , определяет высшие гармоники, которые необходимо исключить. Для поддержания постоянного уровня основной гармоники и одновременного устранения выбранного количества высших гармоник система (2) решается как

$$\begin{cases} A_1(\alpha) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(\alpha_k) = M; \\ A_5(\alpha) = \frac{4}{5\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(5\alpha_k) = 0; \\ A_7(\alpha) = \frac{4}{7\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(7\alpha_k) = 0; \\ \vdots \\ A_n(\alpha) = \frac{4}{n\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $M$  – коэффициент модуляции, который вычисляется по формуле  $M = A_1 / (V_{dc}/2)$ .

Таким образом, система нелинейных уравнений формируется на основе заданного уровня основной гармоники и подлежащих удалению выделенных гармоник. Третья гармоника не учитывается в системе (4), так как рассматривается симметричная трёхфазная система напряжений. Очевидно, что  $N-1$  гармоник можно устранить с помощью  $N$  количества углов переключений за четверть периода выходного напряжения преобразователя. Система уравнений (4) имеет множество решений в пределах заданных условий, а также имеет особенность разрыва при некоторых значениях углов переключений  $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]$ , при которых не существует правильного решения [13], [20].

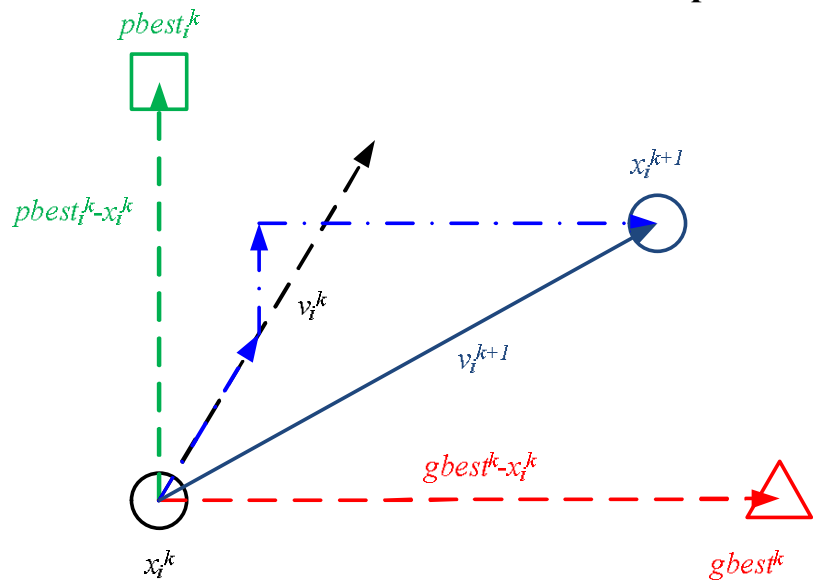
## ПРИНЦИП МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ

Метод роя частиц впервые был предложен Кеннеди и Эберхартом в 1995 году как популяционный алгоритм эвристического и стохастического поиска [18]. Простота исполнения и способность быстро сходиться к достаточно хорошему решению делают его привлекательным для многих учёных при решении широкого спектра задач оптимизации.

В системе МРЧ рой частиц движется в  $D$ -мерном пространстве – области поиска. Первоначально частицы расположены во всей области поиска и имеют собственный случайный вектор скорости. Затем каждая частица начинает двигаться в определенном направлении до некоторой точки, в которой рассчитывается значение целевой функции. Все частицы запоминают своё лучшее значение целевой функции и получают информацию о результатах поиска других частиц во всей области поиска. После каждого обновления своего местоположения частицы корректируют вектор скорости таким образом, чтобы быть ближе к своей наилучшей позиции  $pbest$ , а также приблизиться к лучшей глобальной позиции  $gbest$ , достигнутой всеми частицами в рое на их пути. Графическая интерпрета-



ция обновления скорости и положения в механизме поиска МРЧ для одной частицы показана на **рис. 2**.



**Рис. 2.** Упрощенная концепция механизма поиска МРЧ

Вектор скорости  $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$  каждой частицы в пространстве обновляется с помощью выражения (5), а затем посредством выражения (6) обновляется вектор положения частицы  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$  на текущей итерации [18-19]. Движение всех частиц в пространстве решений приводит к общему решению, которое принимается для расчёта оптимального значения целевой функции.

$$v_i^{k+1} = \omega^k v_i^k + c_1 r_1 (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 r_2 (gbest^k - x_i^k), \quad (5)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}, \quad (6)$$

где  $k$  – номер итерации;  $\omega$  – инерционный вес;  $c_1$  и  $c_2$  – весовые коэффициенты;  $r_1$  и  $r_2$  – случайные числа  $[0, 1]$ .

Первая составляющая выражения (5) называется «коэффициент инерции» и является важным параметром для сходимости алгоритма МРЧ, так как с помощью этого параметра можно регулировать влияние предыдущей скорости на текущую скорость. Вторая составляющая называется «когнитивный компонент» и является результатом поиска каждой частицы. Третья составляющая называется «социальный компонент» и является результатом общего поиска всех частиц. Новые значения  $pbest$  и  $gbest$  обновляются с помощью выражения (5). Оптимальным решением системы будет равенство « $pbest = gbest$ ».

Коэффициент инерции  $\omega$  играет важную роль в балансе между локальными и глобальными решениями в поиске. Большее значение коэффициента  $\omega$  способствует глобальному поиску, а меньшее – локальному. Таким образом, чтобы избежать преждевременной сходимости, было рассмотрено переменное значение  $\omega$ , где наибольшее значение используется в начальных итерациях и постепенно уменьшается в последующих итерациях согласно выражению

$$\omega^k = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} k, \quad (7)$$

где  $\omega_{\min}$  и  $\omega_{\max}$  – минимальный и максимальный весовые коэффициенты инерции,  $iter_{\max}$  – максимальное количество итераций.

МРЧ для ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ  
в ШИМ с УВГ

Для того чтобы найти оптимальные углы переключе-

ния в системе нелинейных уравнений (4) с помощью МРЧ, необходимо выполнить следующие шаги:

**Шаг 1.** Определение параметров размера популяции (количество частиц)  $N$ , размерность пространства частиц  $D$ , максимальное количество итераций  $iter_{\max}$ . Необходимо определить нижнюю и верхнюю границы скорости и положения частицы. Для рассматриваемой ШИМ с УВГ с учетом четвертьволновой симметрии выходного напряжения преобразователя вектор положения каждой частицы случайным образом инициализируется от 0 до  $\pi/2$ . Вектор скорости каждой частицы определяется случайным образом от  $v_{\min}$  до  $v_{\max}$ . Размерность пространства частиц  $D$  будет соответствовать количеству углов переключений от  $\alpha_1$  до  $\alpha_D$ .

**Шаг 2.** Оценка ожидаемого значения целевой функции для каждой частицы будет выполняться в  $D$  переменных. Устранение выделенных гармоник является целью метода ШИМ с УВГ, следовательно, целевая функция должна быть сведена к минимуму, и она связана с требуемым значением основной гармоники напряжения преобразователя и подлежащих удалению гармониками. В качестве задачи оптимизации, включающей приведенное выше описание, применима целевая функция  $f(\alpha)$  в виде

$$\min \{ f(\alpha) = |M - A_1(\alpha)| + |A_5(\alpha)| + \dots + |A_{3D-2}(\alpha)| \}, \quad (8)$$

при условии:  $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_D < \frac{\pi}{2}$ .

**Шаг 3.** Регулировка  $pbest$  и  $gbest$ . Если текущая позиция одной частицы лучше её предыдущей позиции  $pbest$ , то предыдущее значение  $pbest$  должно быть заменено текущей позицией. Точно так же предыдущее значение  $gbest$  должно быть заменено текущим лучшим положением  $pbest$ . Таким образом, значения  $pbest$  и  $gbest$  можно изменять на каждой итерации.

**Шаг 4.** На каждой итерации частицы движутся по пространству поиска со своей собственной скоростью и положением. Скорость и положение каждой частицы изменяются на основе выражений (5) и (6).

**Шаг 5.** Обработка граничных условий. Если скорость или положение частицы превышает нижнюю или верхнюю границу, то она должна быть случайным образом вновь определена между нижней и верхней границами.

**Шаг 6.** Достигнутое достаточно хорошее значение целевой функции или превышение максимального количества итераций определяется как критерий остановки алгоритма.

МРЧ находит все возможные наборы решений и в итоге получается несколько наборов углов переключений для устранения выделенных гармоник. В **табл. 1** приведены используемые при реализации метода МРЧ параметры.

**Таблица 1**

**Параметры предложенного МРЧ**

Параметр	Величина
Размер популяции $N$	100
Размерность пространства поиска $D$	3 или 5
Максимальное количество итераций $iter_{\max}$	300
Весовой коэффициент $c_1$	1,49445
Весовой коэффициент $c_2$	1,49445
Максимальный вес инерции $\omega_{\max}$	0,7
Минимальный вес инерции $\omega_{\min}$	0,2
Верхняя граница пространства $x_{\max}$	$\pi/2$
Нижняя граница пространства $x_{\min}$	0

Максимальная скорость $v_{\max}$	$0,2 \cdot (x_{\max} - x_{\min})$
Минимальная скорость $v_{\min}$	$-v_{\max}$

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предложенный МРЧ для ШИМ с УВГ реализован в программе Matlab с помощью m-файла. В написанном коде программы углы переключения вычисляются для каждого значения коэффициента модуляции  $M$  от 0,7 до 1 с шагом 0,01. Результаты расчёта углов переключения загружены в табличном виде в реализованную в программе Matlab/Simulink модель трехуровневого преобразователя с фиксированной нейтральной средней точкой звена постоянного тока для генерации сигналов управления ключами.

#### Удаление 5-й и 7-й гармоник из выходного напряжения преобразователя

В соответствии с выражением (4) функция устранения 5-й и 7-й гармоник должна быть решена при неизвестных  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , следовательно, целевая функция в этом случае определена как

$$\min \{ f(\alpha) = |M - A_1(\alpha)| + |A_5(\alpha)| + |A_7(\alpha)| \}. \quad (9)$$

Результаты моделирования показаны на рис. 3, а, б, где видно, что траектории углов переключения для устранения 5-й и 7-й гармоник могут быть разными, а также значения THD (рис. 4) для каждого коэффициента модуляции  $M$  неодинаково.

Для более наглядного сравнения полученных результатов в табл. 2 приведены углы переключения, коэффициенты гармоник и THD выходного напряжения при коэффициентах модуляции 0,7 и 0,9 для двух рассматриваемых наборов переключений.

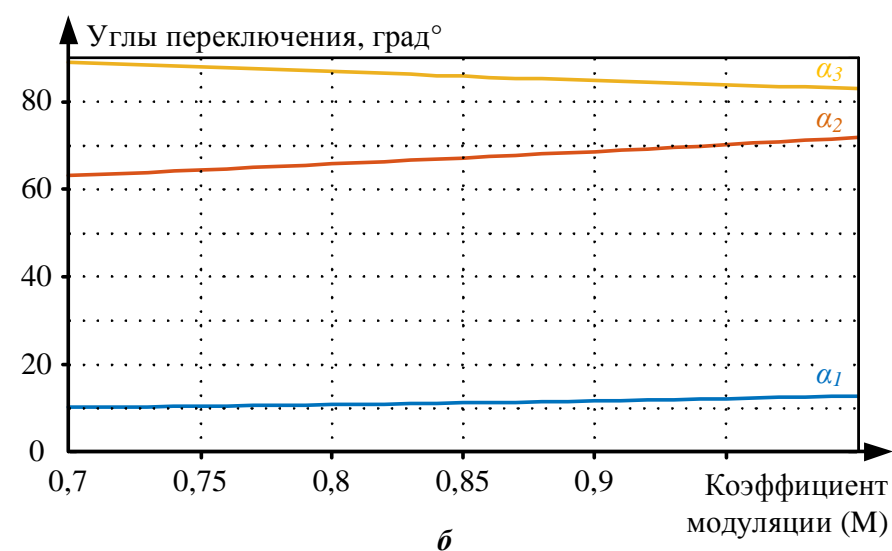
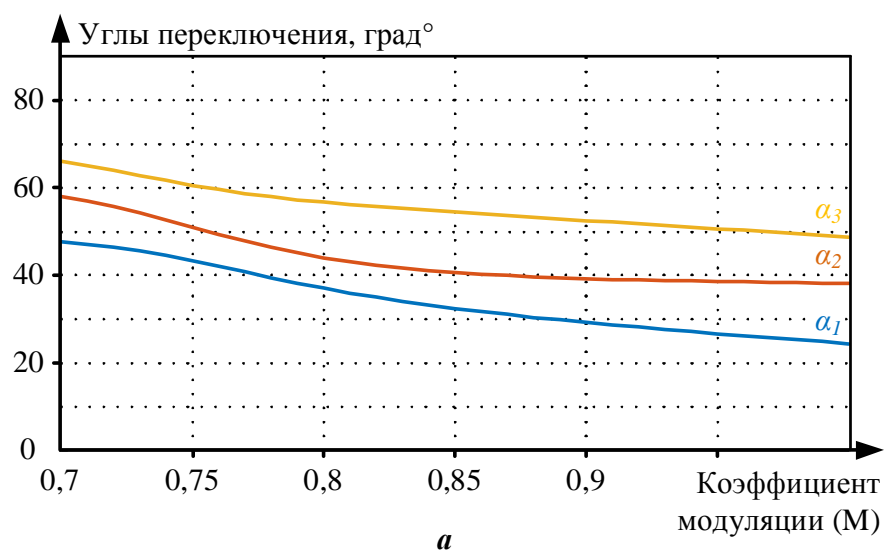


Рис. 3. Углы переключения для устранения 5-й и 7-й гармоник ( $N = 3$ ): а – набор 1; б – набор 2

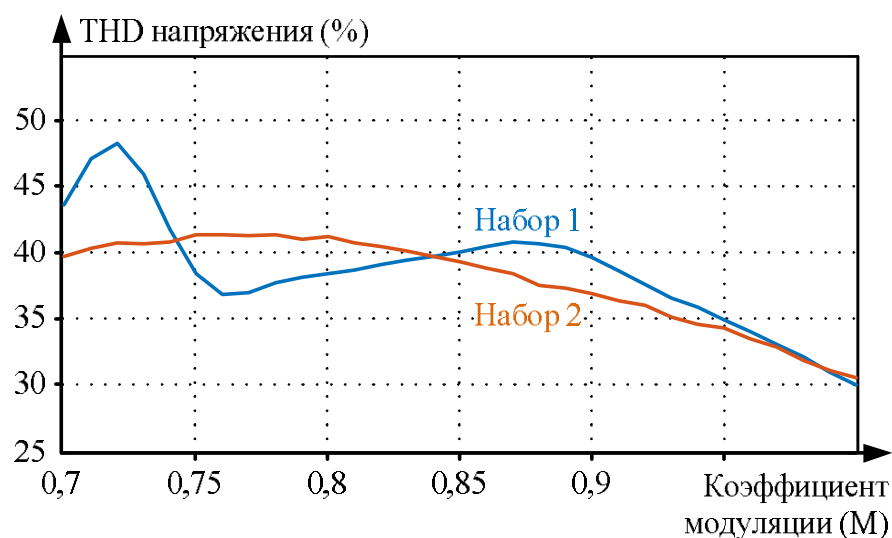


Рис. 4. Сравнение THD для двух наборов углов переключений ( $N = 3$ )

Таблица 2

Сравнение результатов расчёта

$M$		0,7		0,9	
		Набор 1	Набор 2	Набор 1	Набор 2
Угол переключения (УП), град	$\alpha_1$	47,74	10,46	29,22	11,95
	$\alpha_2$	58,08	63,04	39,24	68,58
	$\alpha_3$	66,04	88,87	52,50	84,62
Уровень гармоник (УГ), %	h1	100	100	100	100
	h5	0,27	0,03	0,01	0,08
	h7	0,02	0,08	0,13	0,09
THD, %		43,58	39,71	39,61	36,88

Международным стандартом IEEE-519 рекомендовано, чтобы уровень каждой отдельной гармоники был не более 3% от основной составляющей. Из табл. 2 видно, что 5-я и 7-я гармоники эффективно устраняются посредством двух различных наборов углов переключений. Однако суммарный уровень гармонического искажения при одинаковых значениях коэффициента модуляции различный. Следовательно, для снижения THD напряжения несколько наборов переключений могут быть более эффективно использованы на всём диапазоне изменения коэффициента модуляции.

#### Удаление 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник из выходного напряжения преобразователя

Функция устранения 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник должна быть решена при неизвестных  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ , и целевая функция в этом случае определяется как

$$\min \left\{ f(\alpha) = |M - A_1(\alpha)| + |A_5(\alpha)| + |A_7(\alpha)| + |A_{11}(\alpha)| + |A_{13}(\alpha)| \right\}. \quad (10)$$

Полученные траектории различных углов переключения представлены на рис. 5. На рис. 6 показана взаимосвязь между каждым значением THD выходного напряжения и соответствующим коэффициентом модуляции.

В табл. 3 приведены углы переключения, коэффициенты гармоник и THD напряжения при коэффициентах модуляции 0,7 и 0,9 для трёх рассматриваемых наборов переключений. Из табл. 3 видно, что использование предложенного подхода реализации МРЧ в алгоритме ШИМ с УВГ позволяет устранить нежелательные гармоники, в то же время сохраняя заданный уровень основной гармоники.



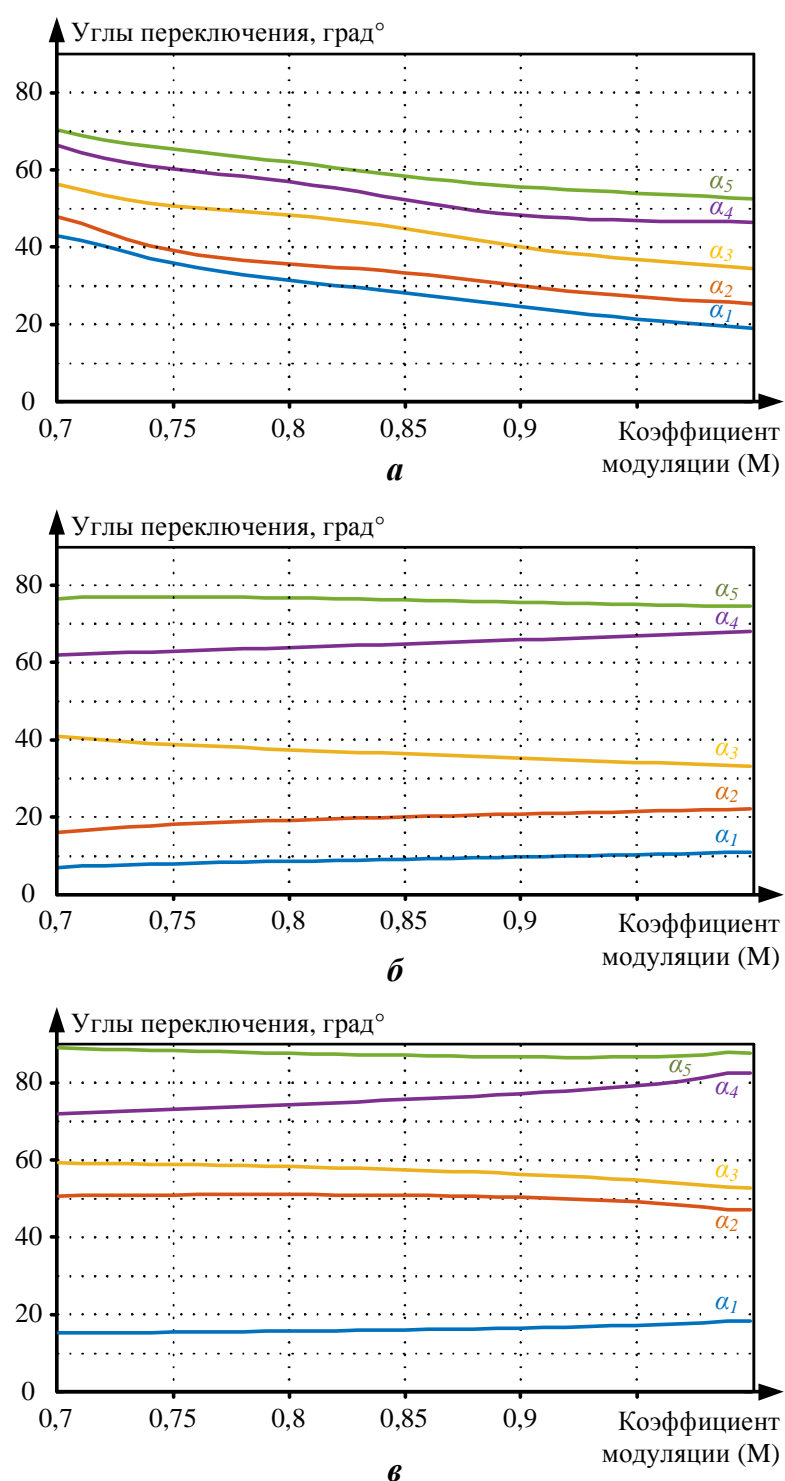


Рис. 5. Углы переключения для устранения 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник ( $N = 5$ ): а – набор 1; б – набор 2; в – набор 3

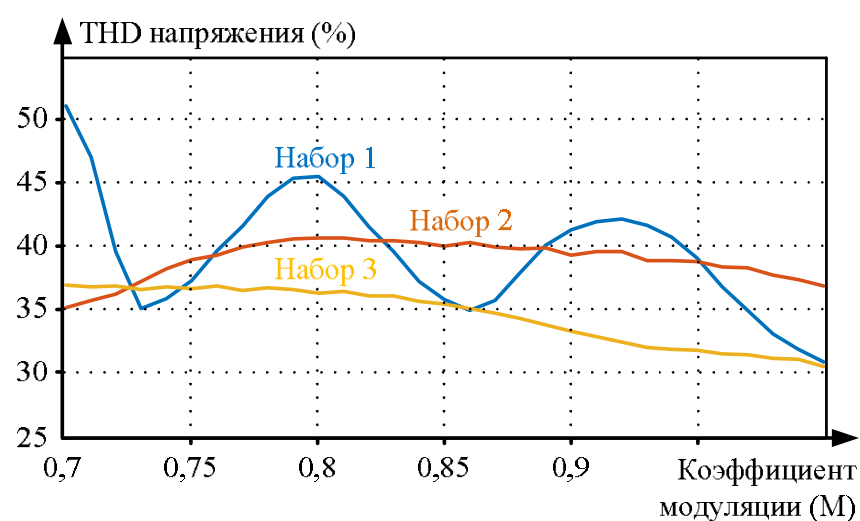


Рис. 6. Сравнение THD для трёх наборов углов переключений ( $N = 5$ )

Таблица 3

Сравнение результатов расчёта

M		0,7			0,9		
		Набор 1	Набор 2	Набор 3	Набор 1	Набор 2	Набор 3
УП, град.	$\alpha_1$	42,91	6,67	15,39	24,65	9,39	16,73
	$\alpha_2$	47,78	15,68	51,04	29,97	20,53	50,61
	$\alpha_3$	56,25	40,70	59,53	40,05	35,07	56,69
	$\alpha_4$	66,29	61,93	72,32	48,27	65,77	77,52
	$\alpha_5$	70,36	76,58	89,37	55,63	75,59	87,09
УГ, %	h1	100	100	100	100	100	100
	h5	0,05	0,1	0,28	0,01	0,11	0,06
	h7	0,2	0,03	0,17	0,09	0,15	0,05
	h11	0,06	0,04	0,21	0,12	0,05	0,18
	h13	0,11	0,07	0,1	0,33	0,02	0,1
THD, %		51,05	35,12	36,88	41,26	39,27	33,22

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование метода роя частиц для определения углов переключения в алгоритме широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник позволяет получить несколько наборов углов переключений и обеспечить при этом эффективное подавление выбранных гармоник. Кроме того, использование различных наборов переключений позволит минимизировать суммарный индекс гармонического искажения на всём диапазоне изменения коэффициента модуляции преобразователя. Это может быть достигнуто путём использования определённого набора переключений при различных коэффициентах модуляций. Результаты исследования могут быть использованы для разработки алгоритмов ШИМ с УВГ многоуровневых преобразователей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, (2002).
2. Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng. Multilevel inverters-a new breed of power converters. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 3, pp. 509-517, (1996).
3. B. Wu, High-Power Converters and AC Drives. New York: Wiley-IEEE Press, (2006).
4. S. Kouro et al., Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel inverters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 8, pp. 2553-2580, (2010).
5. L.M. Tolbert, Fang Zheng Peng and T. G. Habetler. Multilevel inverters for large electric drives. IEEE Transactions on Industry Applications. vol. 35, no. 1, pp. 36-44, (1999).
6. J.M. Carrasco et al. Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1002-1016, (2006).
7. D.G. Holmes and T. A. Lipo. Pulse Width Modulation for Power Converters. Piscataway, NJ: IEEE Press, (2003).
8. N.S. Hasan et al. Reviews on Multilevel inverter and Modulation Techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 80, pp. 163-174, (2017).
9. Z. Du, L. M. Tolbert and J. N. Chiasson. Harmonic elimination for multilevel inverter with programmed PWM method. in 39th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Seattle, WA, vol.4, pp. 2210-2215, (2004).
10. H.S. Patel and R. G. Hoft. Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part I-Harmonic Elimination, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-9, no. 3, pp. 310-317, (1973).
11. Chunhui Wu, Qirong Jiang and Chunpeng Zhang. An optimization method for three-level selective harmonic eliminated pulse width modulation (SHEPWM). in International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, vol. 2, pp. 1346-1350, (2005).
12. J. N. Chiasson, L. M. Tolbert, K. J. McKenzie and Zhong Du. Elimination of harmonics in a multilevel inverter using the theory of symmetric polynomials and resultants. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 13, no. 2, pp. 216-223, (2005).
13. J. N. Chiasson, L. M. Tolbert, K. J. McKenzie and Zhong Du. Control of a multilevel inverter using resultant theory. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 11, no. 3, pp. 345-354, (2003).
14. B. Ozpineci, L.M. Tolbert and J. N. Chiasson. Harmonic optimization of multilevel inverters using genetic algorithms. IEEE Power Electronics Letters, vol. 3, no. 3, pp. 92-95, (2005).

15. A.I. Maswood and S. Wei. Genetic-algorithm-based solution in PWM converter switching. IEE Proceedings – Electric Power Applications, vol. 152, no. 3, pp. 473–478, (2005).
16. B. Oztuperci, L. M. Tolbert and J. N. Chiasson. Harmonic optimization of multilevel inverters using genetic algorithms. IEEE Power Electronics Letters, vol. 3, no. 3, pp. 92-95, (2005).
17. H. Taghizadeh and M. Tarafdar Hagh. Harmonic elimination of multilevel inverters using particle swarm optimization. in IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, U.K., pp. 393-396, (2008).
18. J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. Proceedings of International Conference on Neural Networks, vol. 4, pp. 1942-1948, (1995).
19. M. Clerc and J. Kennedy. The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 1, pp. 58-73, (2002).
20. J.N. Chiasson, L.M. Tolbert, K.J. McKenzie and Zhong Du. A complete solution to the harmonic elimination problem. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 2, pp. 491-499, (2004).

Поступила в редакцию 11 января 2019 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### USING OF PARTICLE SWARM OPTIMIZATION FOR SELECTIVE HARMONIC ELIMINATION TECHNIQUE

Andrey A. Radionov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Mechatronics and Automation, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: radionov.mail@gmail.com.

Alexandr S. Maklakov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Mechatronics and Automation, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: maklakov.work@gmail.com.

Jing Tao

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

Solving of nonlinear transcendental equations with multiple solutions is a complex task of selective harmonic elimination pulse-width modulation (SHEPWM) technique for multilevel converters. SHEPWM technique making use of particle swarm optimization (PSO) is considered in this paper. PSO includes varied inertia weight in each iterative procedure in order to decrease falling into the local optimum and improve the algorithm robustness to achieve the global optimum of the solution space. The developed implementation makes it possible to calculate several combinations of switching angles, which is rather difficult to obtain by traditional methods of optimization. The article shows the results of offline calculation of the switching angles to exclude low order harmonics. Research results are simulated and tested by modeling for a three-level neutral point clamped converter. Simulation results show that the above mentioned approach effectively eliminates the specified lower order harmonics, whereas the switching angle trajectory and total harmonic distortion (THD) of output voltage are different. The research results can be used to design SHEPWM algorithms for three-level converters.

**Keywords:** power electronics, selective harmonic elimination, particle swarm optimization, total harmonic distortion.

#### REFERENCES

1. J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, (2002).
2. Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng. Multilevel inverters-a new breed of power converters. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 3, pp. 509-517, (1996).
3. B. Wu, High-Power Converters and AC Drives. New York: Wiley-IEEE Press, (2006).
4. S. Kouro et al., "Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel inverters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 8, pp. 2553-2580, (2010).
5. L.M. Tolbert, Fang Zheng Peng and T.G. Habetler. Multilevel inverters for large electric drives. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, no. 1, pp. 36-44, (1999).
6. J.M. Carrasco et al. Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1002-1016, (2006).
7. D.G. Holmes and T.A. Lipo. Pulse Width Modulation for Power Converters. Piscataway, NJ: IEEE Press, (2003).
8. N.S. Hasan et al. Reviews on Multilevel inverter and Modulation Techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 80, pp. 163-174, (2017).
9. Z. Du, L. M. Tolbert and J. N. Chiasson. Harmonic elimination for multilevel inverter with programmed PWM method. in 39th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Seattle, WA, vol.4, pp. 2210-2215, (2004).
10. H.S. Patel and R.G. Hoft. Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part I-Harmonic Elimination, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-9, no. 3, pp. 310-317, (1973).
11. Chunhui Wu, Qirong Jiang and Chunpeng Zhang. An optimization method for three-level selective harmonic eliminated pulse width modulation (SHEPWM). in International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, vol. 2, pp. 1346–1350, (2005).
12. J.N. Chiasson, L.M. Tolbert, K.J. McKenzie and Zhong Du. Elimination of harmonics in a multilevel inverter using the theory of symmetric polynomials and resultants. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 13, no. 2, pp. 216-223, (2005).
13. J.N. Chiasson, L.M. Tolbert, K.J. McKenzie and Zhong Du. Control of a multilevel inverter using resultant theory. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 11, no. 3, pp. 345-354, (2003).
14. B. Oztuperci, L.M. Tolbert and J.N. Chiasson. Harmonic optimization of multilevel inverters using genetic algorithms. IEEE Power Electronics Letters, vol. 3, no. 3, pp. 92-95, (2005).
15. A.I. Maswood and S. Wei. Genetic-algorithm-based solution in PWM converter switching. IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 152, no. 3, pp. 473–478, (2005).



16. B. Ozpineci, L. M. Tolbert and J. N. Chiasson. Harmonic optimization of multilevel inverters using genetic algorithms. *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 92-95, (2005).
  17. H. Taghizadeh and M. Tarafdar Hagh. Harmonic elimination of multilevel inverters using particle swarm optimization. in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Cambridge, U.K., pp. 393-396, (2008).
  18. J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. *Proceedings of International Conference on Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942-1948, (1995).
  19. M. Clerc and J. Kennedy. The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 1, pp. 58-73, (2002).
  20. J.N. Chiasson, L.M. Tolbert, K.J. McKenzie and Zhong Du. A complete solution to the harmonic elimination problem. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 2, pp. 491-499, (2004).
- 

Радионо́в А.А., Маклако́в А.С., Цзин Тао. Применение метода роя частиц для определения углов переключения в алгоритме широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 1(42). С. 38-44. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-38-44](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-38-44)

Radionov A.A., Maklakov A.S., Jing Tao. Using of Particle Swarm Optimization for Selective Harmonic Elimination Technique. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 38-44. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-38-44](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-38-44)

---

Абулвелеев И.Р.<sup>1</sup>, Храмшин Т.Р.<sup>1</sup>, Корнилов Г.П.<sup>1</sup>, Абдулвелеева Р.Р.<sup>2</sup>, Косматов В.И.<sup>1</sup><sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова<sup>2</sup> Новотроицкий филиал национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

## ФОРМИРОВАНИЕ ШАБЛОНОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ ТРЕХУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА С ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

В статье рассмотрены способы формирования шаблонов переключений трехуровневого инвертора с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Шаблоны представляют собой комбинацию переключений трех ближайших векторов из их совокупности, представленной в форме известного шестиугольника пространственных векторов. Формирование задающего вектора с участием трех базовых векторов известно в литературе под названием NTV (Nearest Three Vectors). В зависимости от величины коэффициента модуляции, принимающего значения от 0 до 1, выделяют три различных диапазона. Предметом исследования данной статьи является оптимизация шаблонов переключений во всех диапазонах с целью уменьшения числа коммутаций ключей инверторов электроприводов большой мощности. Дан анализ гармонического состава выходного напряжения инвертора при различных величинах коэффициента модуляции и оптимизированном алгоритме переключений. Отмечено, что оптимизированные алгоритмы векторной ШИМ с пониженным числом переключений позволяют уменьшить коммутационные потери и сохранить приемлемый гармонический состав выходного напряжения инвертора. Результаты исследования получены на основе имитационного моделирования в среде Matlab Simulink.

**Ключевые слова:** трехуровневый инвертор с фиксированной нейтральной точкой, векторная широтно-импульсная модуляция, шаблоны переключений, коэффициент модуляции.

### ВВЕДЕНИЕ

В современных электроприводах большой мощности широко используются двухзвенные преобразователи частоты на базе трехуровневых инверторов напряжения с фиксированной нейтральной точкой NPC-VSI (Neutral Point Clamped Voltage Source Inverter) [1, 2].

Для формирования выходного напряжения трехуровневого инвертора (рис. 1) наиболее часто используют метод пространственно-векторной ШИМ, или SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation), обладающий значительной гибкостью [3].

В работах [4-7] данный метод ШИМ описан применительно к электроприводам малой и средней мощности, для которых частота модуляции составляет единицы килогерц. В приводах большой мощности указанная частота значительно ниже и составляет порядка 250-450 Гц. Несмотря на это, актуальной проблемой является снижение коммутационных потерь в силовых ключах за счет дальнейшего уменьшения числа переключений при сохранении частоты модуляции. Одним из вариантов решения этой проблемы является использование синхронного метода модуляции, для которого частота ШИМ кратна частоте основной гармоники выходного напряжения инвертора. Преимуществом такого метода является предопределенность положений задающего вектора и, как следствие, возможность оптимизации траектории переключений между этими положениями [8, 9].

Плоскость базовых векторов для трехуровневого инвертора содержит 19 векторов, которые подразделяются на четыре группы: 6 длинных ( $L$ ), 6 средних ( $M$ ), 6 коротких ( $S$ ) и один нулевой ( $O$ ) [10, 11].

Согласно методу пространственно-векторной ШИМ, из множества базовых векторов выбираются три вектора, наиболее близко расположенных к зада-

ющему  $U_{ref}$  (рис. 2). Такой подход получил название NTV (Nearest Three Vectors). Расчет продолжительности включения каждого из них осуществляется по определенному алгоритму [3, 5]. Обработка положений задающего вектора в фиксированные моменты времени осуществляется в *элементарных циклах* путем последовательного применения трех выбранных базовых векторов с учетом рассчитанных продолжительностей включения. В зависимости от принадлежности задающего вектора одной из четырех областей  $A1$ ,  $A2$ ,  $A3$  или  $A4$  элементарный цикл реализуется одним из классических *шаблонов переключений* [3]:

$$A1 = (op - ap - bp - oo - bn - an - on) - \\ - (on - an - bn - oo - bp - ap - op);$$

$$A2 = (ap - c - a - an) - \\ - (an - a - c - ap);$$

$$A3 = (bp - ap - c - bn - an) - \\ - (an - bn - c - ap - bp);$$

$$A4 = (bp - b - c - bn) - \\ - (bn - c - b - bp).$$

Рассмотренные выше области  $A1$ - $A4$  принадлежат первому сектору  $A$  шестигранника базовых векторов. Всего подобных секторов шесть, наборы базовых векторов в них одинаковые, отличие состоит только в комбинации состояния силовых ключей при реализации этих векторов. В связи с этим формирование шаблонов переключений достаточно рассмотреть на примере сектора  $A$ .

Оптимизация шаблонов переключений с целью уменьшения числа коммутаций ключей инверторов большой мощности является предметом исследования данной статьи.

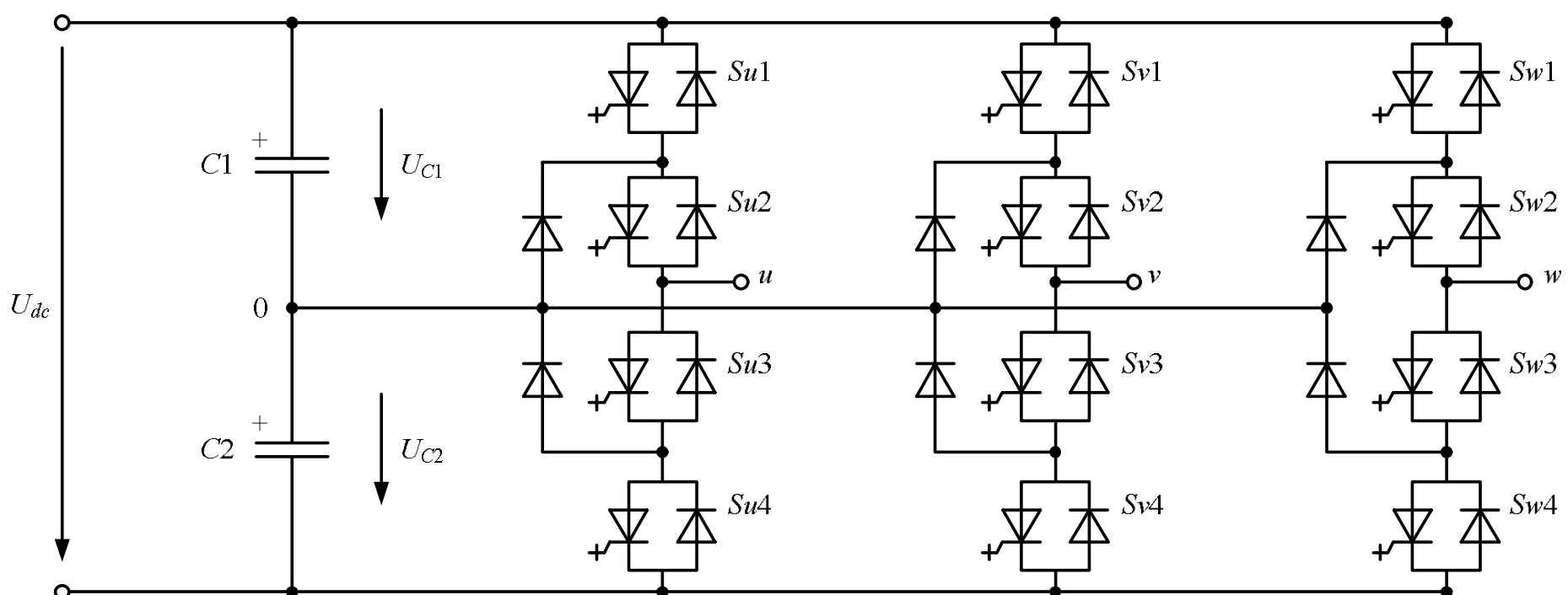


Рис. 1. Трехуровневый инвертор напряжения с фиксированной нейтральной точкой

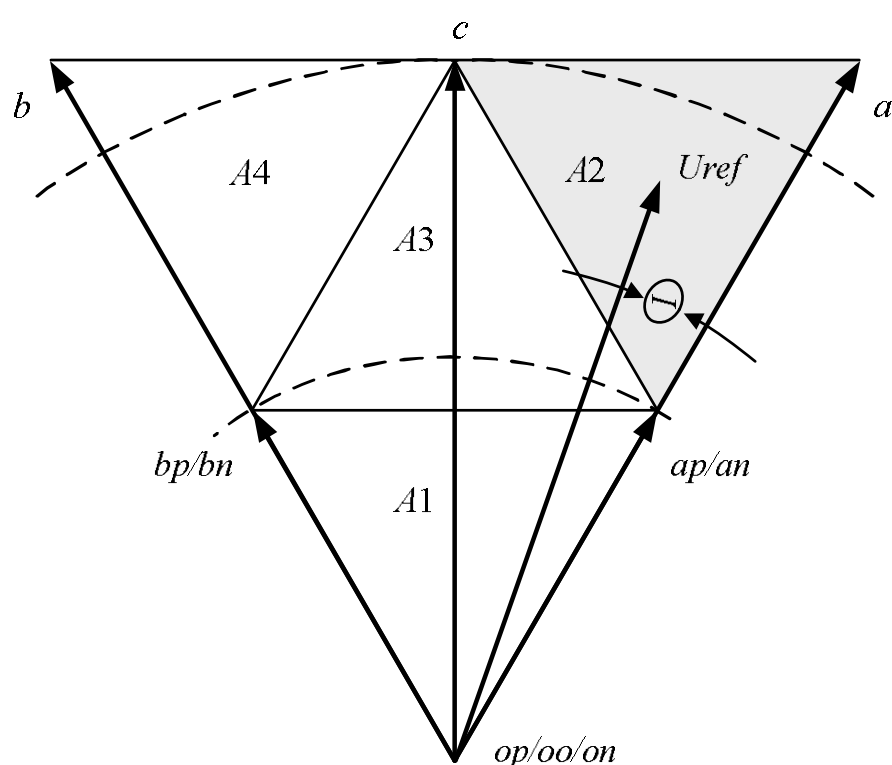


Рис. 2. Базовые векторы и области A1-A4 сектора A

#### ИЗМЕНЕНИЕ ШАБЛОНОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОДУЛЯЦИИ

В процессе широтно-импульсной модуляции изменяются два основных параметра вектора задающего напряжения: коэффициент модуляции  $k$ , характеризующий амплитуду вектора, и его угловое положение  $\theta$  [12]. При неизменном коэффициенте модуляции, вектор  $U_{ref}$  вращается по окружности радиусом  $k$ .

На рис. 3, а представлен сектор A, в котором изменение угла  $\theta$  происходит в диапазоне от 0 до 60°. В секторе показаны дуги окружностей, на которых равномерно расположены точки, изображающие положение задающего вектора напряжения в фиксированные моменты времени и следующие друг за другом с периодом ШИМ. Число точек на дуге окружности в пределах сектора соответствует числу элементарных циклов. Выполним расчет количества элементарных циклов  $N_R$ , соответствующих одному сектору. Эта величина зависит от частоты ШИМ и частоты выходного напряжения инвертора.

Для инверторов большой мощности примем частоту ШИМ равной  $f_{PWM} = 450$  Гц. Для мощных прокатных двигателей номинальная частота первой гармоники напряжения  $f_1$  составляет величину, значительно меньшую промышленной – порядка 20 Гц. Количество элементарных циклов за четверть периода  $N_S$  рассчитывается по формуле

$$N_S = \frac{f_{PWM}}{f_1} = \frac{450}{20} = 22,5. \quad (1)$$

Следует отметить, что величина  $N_S$  обратно пропорционально частоте вращения двигателя и по мере ее снижения число переключений необходимо увеличивать, что способствует улучшению качества кривой выходного напряжения.

Расчет показателя  $N_R$  выполним по формуле

$$N_R = \frac{2}{3} N_S = \frac{2}{3} \cdot 22,5 = 15, \quad (2)$$

где коэффициент  $2/3$  связывает угловые длительности сектора 60° и четверти периода 90°.

На рис. 3, а количество точек, расположенных на дуге окружности, равно  $N_R$ . При этом радиусы окружностей соответствуют различным значениям коэффициента модуляции  $k$ , которые подобраны таким образом, что в область A3 попадает целое нечетное число точек 1, 3, ..., 15.

Нижняя дуга окружности на рис. 3, а, включающая в себя 15 точек в области A3, ограничена коэффициентом модуляции  $k=0,567$ ; верхняя - включает 1 точку в области A3 с коэффициентом  $k=1,0$ . Совокупность всех точек, изображенных на рис. 3, а, образует диапазон I коэффициента модуляции (рис. 3, б). В пределах этого диапазона ( $0,567 < k < 1,0$ ) используются шаблоны циклов переключения для областей A2, A3 и A4. В следующем диапазоне II ( $0,5 < k < 0,567$ ) циклы переключений по мере уменьшения коэффициента модуляции перемещаются из области A3 в A1; соответственно диапазон II характеризуется использованием шаблонов A3 и A1. В диапазоне III ( $0 < k < 0,5$ ) участвует только шаблон A1.

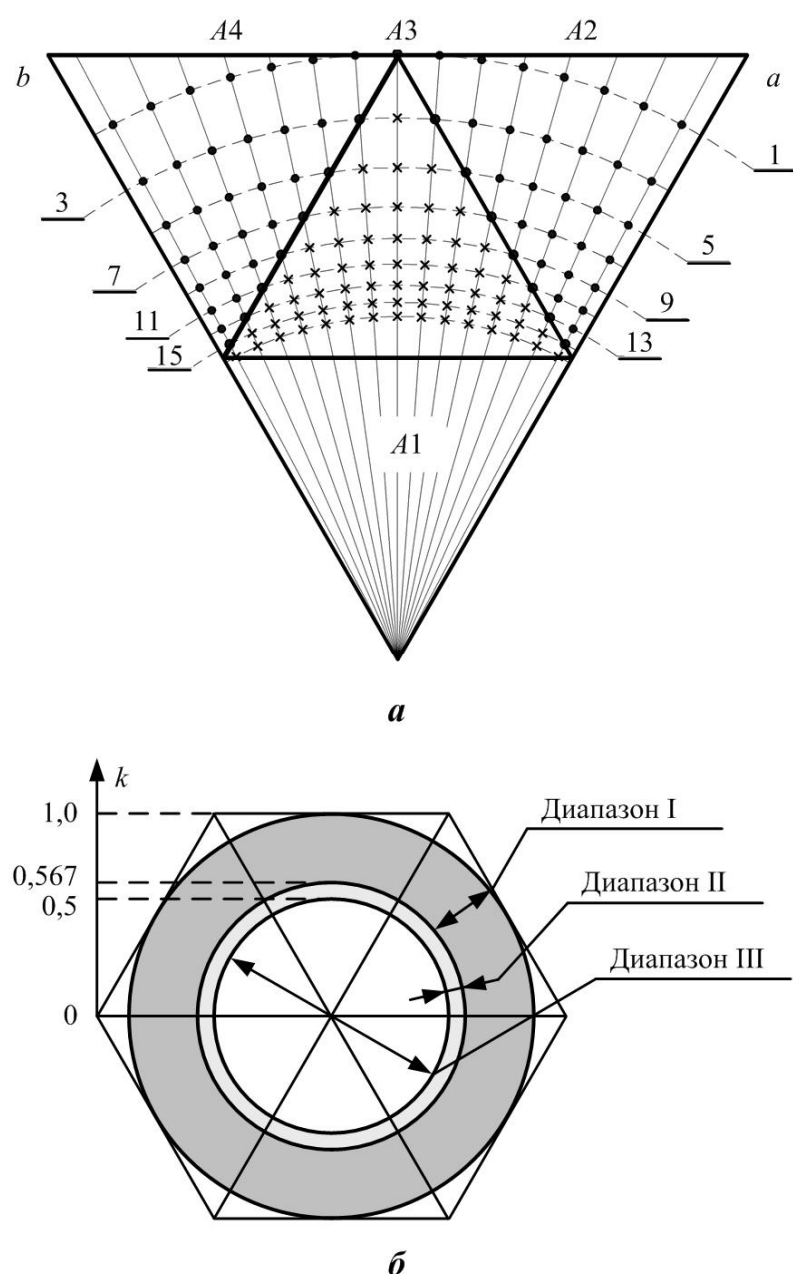


Рис. 3. Изменение числа элементарных циклов переключения в области  $A3$  в зависимости от коэффициента модуляции  $k$  для *диапазона I* (а), *диапазоны I, II, III* коэффициента модуляции (б)

#### ОПТИМИЗАЦИЯ ШАБЛОНОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

Снижение числа переключений силовых ключей инвертора и, следовательно, уменьшение коммутационных потерь при сохранении частоты модуляции предлагается осуществлять за счет применения комплекса из трех решений.

1. Классические шаблоны переключений сформированы таким образом, что каждый из трех базовых векторов используется в них дважды. В результате в начале и конце шаблона расположен один и тот же вектор. Такой подход позволяет легко соединять шаблоны последовательно между собой, но увеличивает число переключений.

Для отработки фиксированных положений задающего вектора напряжения в качестве элементарных циклов предлагается использовать левую или правую половину классического шаблона переключений  $A2$ :

$$A2p = (ap - c - a - an); A2n = (an - a - c - ap).$$

Это справедливо и для классического шаблона области  $A4$ :

$$A4p = (bp - b - c - bn); A4n = (bn - c - b - bp).$$

Во введенных обозначениях индекс  $p$  или  $n$  совпадает с полярностью вектора  $ap$  или  $an$ , расположенного в начале шаблона переключения.

Применение укороченных шаблонов  $A2p$ ,  $A2n$ ,  $A4p$  и  $A4n$  позволяет снизить число переключений силовых ключей в два раза.

2. В классической методике пространственно-векторной (ПВ) модуляции допускается стыковка шаблонов разноименными векторами. Например, переход из области  $A2$  в  $A3$  предполагал смену вектора  $ap$  на  $bp$ , что вносило дополнительные переключения:

$$\begin{aligned} & A2 \rightarrow A3; \\ & (ap - c - a - an) - (an - a - c - \underline{ap}) \rightarrow \\ & \rightarrow (\underline{bp} - ap - c - bn - an) - \\ & - (an - bn - c - ap - bp). \end{aligned}$$

Для укороченных шаблонов предлагается ввести следующее правило: каждый последующий шаблон переключений должен начинаться с вектора, на котором закончился предыдущий шаблон. Это позволяет не вводить дополнительных переключений при стыковке шаблонов. В процессе вращения задающего вектора переход от одного элементарного цикла к другому (см. рис. 3, а) возможен как при сохранении области сектора, так и со сменой области. В качестве примера показаны два последовательных перехода – в пределах области  $A2$  и из области  $A2$  в область  $A3$ :

$$\begin{aligned} & A2n \rightarrow A2p \rightarrow A3n; \\ & (an - a - c - \underline{ap}) \rightarrow (\underline{ap} - c - a - \underline{an}) \rightarrow \\ & \rightarrow (\underline{an} - bn - c - ap - bp). \end{aligned}$$

В представленных выше переходах используются укороченные шаблоны, стыковка которых производится по одноименным векторам.

3. Укороченные шаблоны области  $A3$  содержат по два коротких вектора одинаковой полярности в начале и конце:

$$\begin{aligned} A3p &= (bp - ap - c - bn - an); \\ A3n &= (an - bn - c - ap - bp). \end{aligned}$$

Необходимым условием обеспечения балансировки напряжений конденсаторов звена постоянного тока инвертора является присутствие в шаблоне как минимум двух коротких векторов разной полярности, например,  $ap/an$  или  $bp/bn$ . Предлагается ввести четыре новых шаблона переключений в области  $A3$ , в каждом из которых отсутствует один из коротких векторов:

$$\begin{aligned} A3p_a &= (ap - c - bn - an); \\ A3p_b &= (bp - ap - c - bn); \\ A3n_a &= (an - bn - c - ap); \\ A3n_b &= (bn - c - ap - bp). \end{aligned}$$

Дополнительный индекс  $a$  или  $b$  указывает на тип вектора, с которого начинается шаблон.

Последнее решение позволяет дополнительно снизить число переключений, как показано на рис. 4, а, для *диапазона I*, где кривая 1 соответствует числу переключений  $N_Q$  за четверть периода при использовании классических шаблонов; кривая 2 – при использовании укороченных шаблонов в областях  $A2$  и  $A4$ ; кривая 3 – при дополнительном введении шаблонов в области  $A3$  ( $A3p_a$ ,  $A3p_b$ ,  $A3n_a$  и  $A3n_b$ ). Величина  $N_{A3}$  указывает на число элементарных циклов в области  $A3$ .



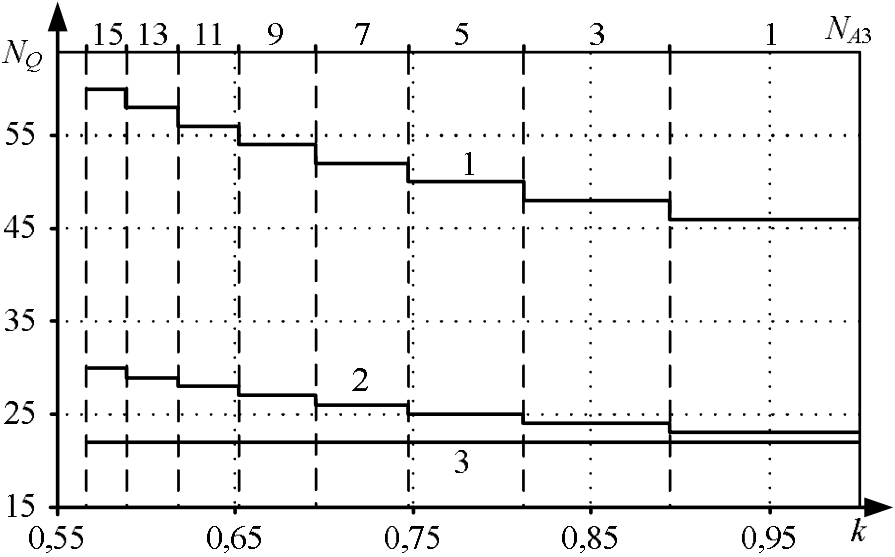


Рис. 4. Изменение числа переключений  $N_Q$  за четверть периода в зависимости от коэффициента модуляции  $k$  для различных шаблонов

Пример фазного напряжения инвертора при прохождении задающего вектора через сектор  $A$  при  $N_{A3}=15$  показан на рис. 5. График на рис. 5, а получен при использовании решений согласно п.1 и 2, а на рис. 5, б – всех трех предложенных решений. Из рис. 5 видно, что решение по п. 3 позволяет приблизительно в 2 раза снизить число переключений в фазе инвертора, которая меняет полярность в секторе  $A$ .

Результатом расчета траектории переключений ключей инвертора по методу синхронной ПВ ШИМ является последовательность шаблонов переключений, приведенная в таблице.

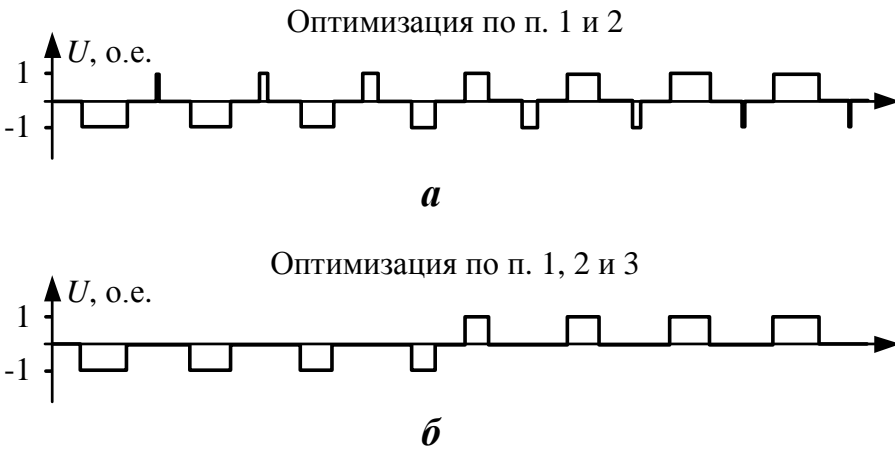


Рис. 5. Фазное напряжение инвертора при различных подходах к оптимизации шаблонов переключений

В столбцах этой таблицы указаны шаблоны переключений для каждого из пятнадцати элементарных циклов  $n=1...15$ , определяющих положение задающего вектора, как это показано на рис. 3, а. Строки таблицы несут информацию об интервалах изменения коэффициента модуляции, в пределах которых число элементарных циклов  $N_{A3}$  в области  $A3$  равно 1, 3, ..., 15.

Таким образом, шаблон переключений выбирается по известным значениям коэффициента модуляции  $k$  и номеру элементарного цикла  $n$ . Показатели  $k$  и  $n$  связаны с амплитудой  $U_m$  и угловым положением  $\Theta$ , град задающего вектора следующим образом:

$$k = \frac{U_m}{U_{dc}/\sqrt{3}}; \quad n = \text{ceil}\left(\Theta \frac{N_R}{60}\right), \tag{3}$$

где  $\text{ceil}(x)$  – функция округления до ближайшего большего целого числа.

Разработанные решения рассмотрены на примере диапазона  $I$  как наиболее сложного случая, в котором задействованы три области:  $A2$ ,  $A3$  и  $A4$ . В диапазоне  $II$  задействованы только две области  $A1$  и  $A3$  и оптимизация шаблонов переключений для этого диапазона осуществляется аналогичным образом. Поскольку диапазон  $III$  связан только с областью  $A1$ , то при оптимизации шаблонов переключений используются решения по п. 1 и 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С помощью разработанной математической модели, реализованной в программной среде Matlab Simulink [13,14], проведены исследования работы трехуровневого NPC-инвертора при оптимизированном алгоритме переключений ПВ ШИМ для двух значений коэффициентов модуляции диапазонов  $I$  и  $II$  с целью оценки гармонического состава выходного напряжения.

На рис. 6, а показан график изменения фазного напряжения для коэффициента модуляции  $k=0,8$  (диапазон  $I$ ); на рис. 6, б приведен график изменения модуля базового вектора, который обозначается  $O$ ,  $S$ ,  $M$  или  $L$  в зависимости от типа выбранного вектора. Мгновенные значения выходного линейного напряжения инвертора показаны на рис. 6, в, а его гармонический состав представлен на рис. 6, г.

Шаблоны переключений в диапазоне  $I$  сектора  $A$

$k \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	$N_{A3}$
0,894–1,0	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A2n$	$A2P$	$A3n$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	1
0,812–0,894	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A2n$	$A3P_a$	$A3n$	$A3p_b$	$A4n$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	3
0,747–0,812	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	5
0,695–0,747	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A2n$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A4n$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	7
0,652–0,695	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	9
0,618–0,652	$A2p$	$A2n$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A4n$	$A4p$	11
0,589–0,618	$A2p$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A4p$	13
0,567–0,589	$A3p_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	15

Результаты моделирования при  $k=0,503$  (диапазон II) приведены на рис. 7. Следует отметить, что при смене полярности фазного напряжения для коэффициентов модуляции в диапазоне II (рис. 7, а) в отличие от диапазона I (рис. 6, а) наблюдается двухполярные переключения в пределах одного шаблона. Это связано с

прохождением задающего вектора напряжения через область A1 (см. рис. 2), шаблоны которой содержат короткие S и нулевые O базовые векторы. В свою очередь, для случая на рис. 6, б применяются шаблоны, в которых задействованы средние M и длинные L базовые векторы, а нулевые O не используются.

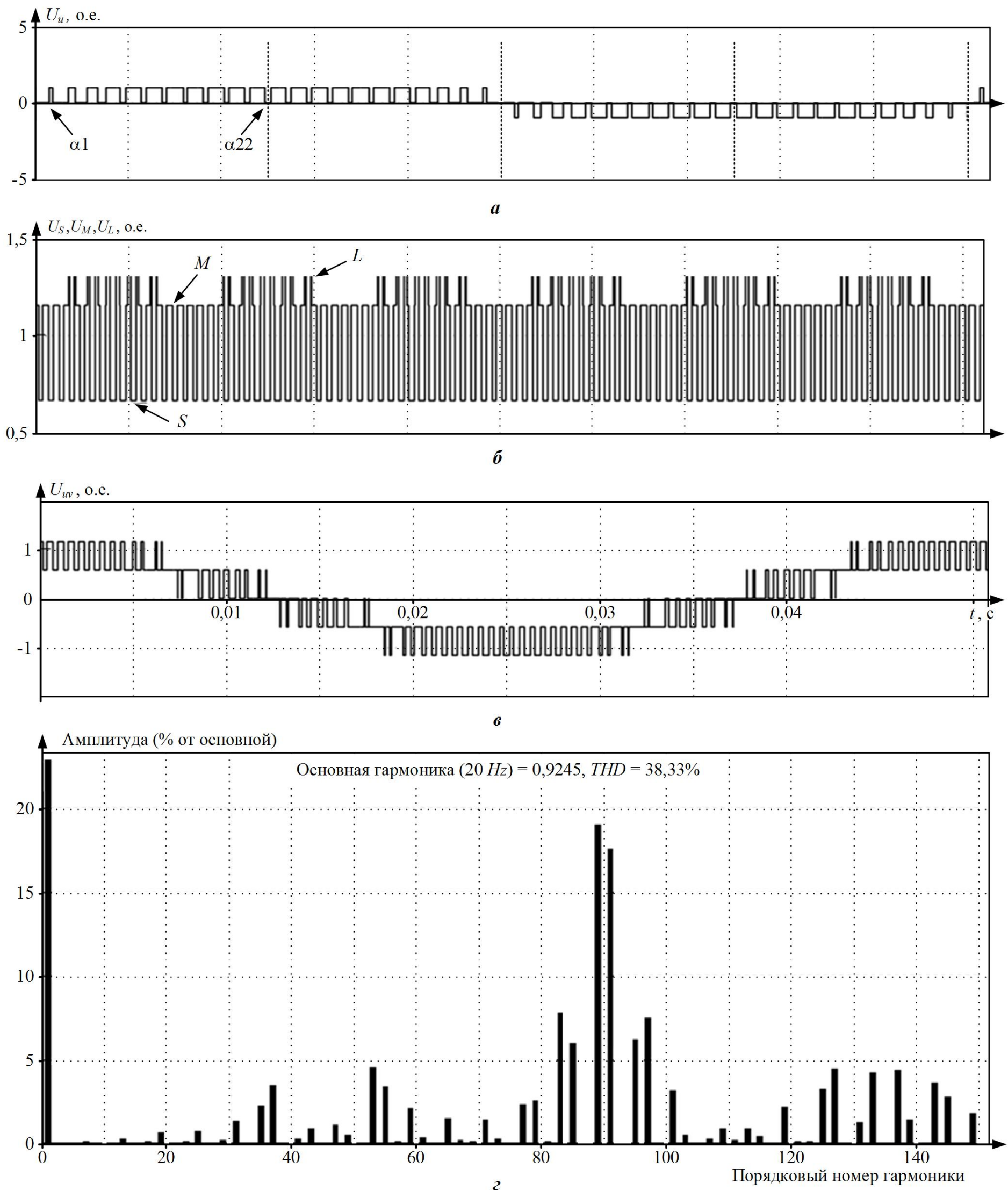


Рис. 6. Результаты моделирования при  $k=0,8$  и оптимизированных шаблонах переключения (а – фазное напряжение; б – модуль базового вектора; в – линейное выходное напряжение инвертора; z – гармонический спектр выходного линейного напряжения инвертора)

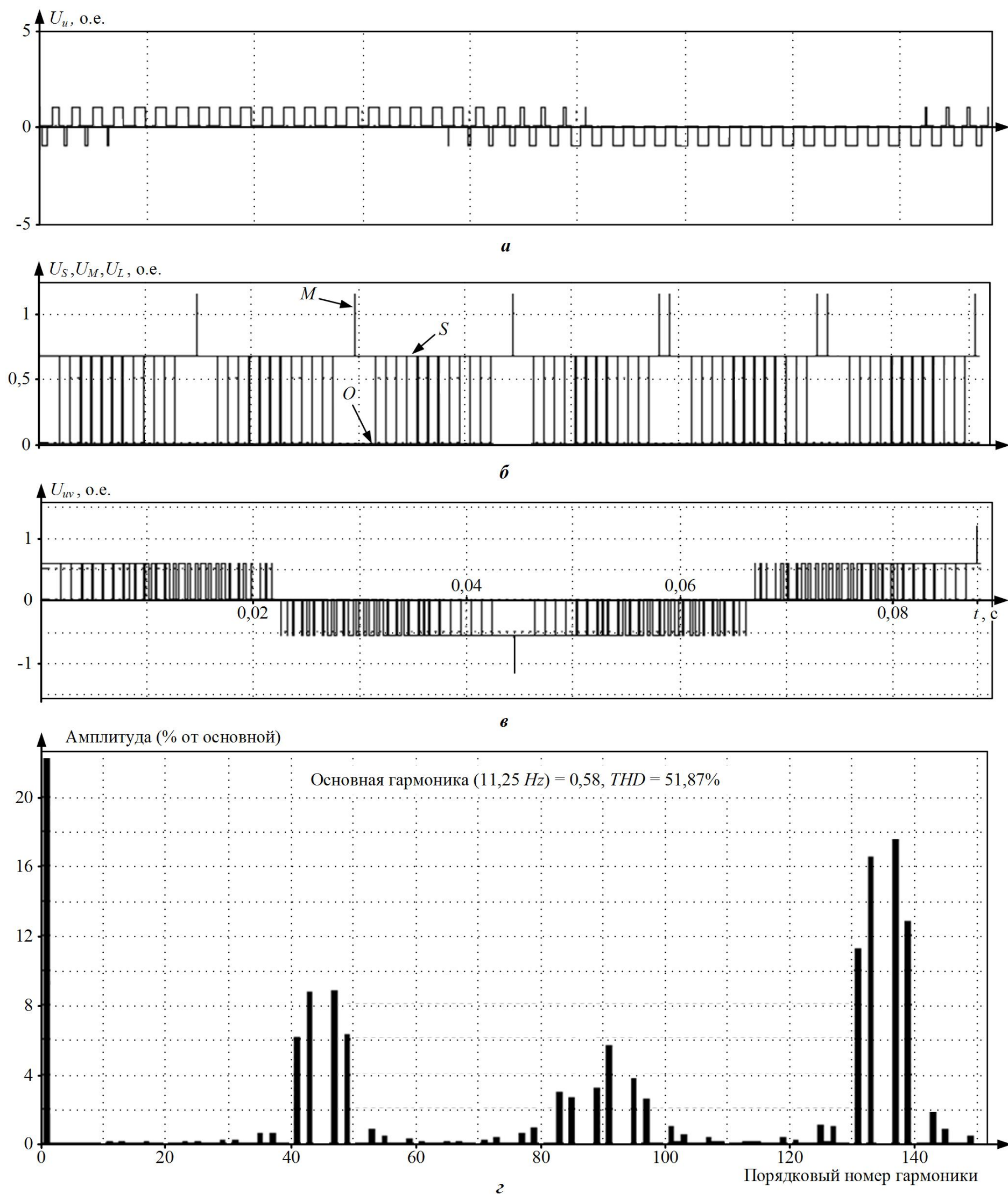


Рис. 7. Результаты моделирования при  $k=0,503$  и оптимизированных шаблонах переключения

Число уровней в кривой линейного напряжения инвертора зависит от значения коэффициента модуляции. В диапазоне I линейное напряжение имеет 5-уровневую форму (рис. 6, в), в диапазоне II – 3-уровневую (рис. 7, в).

Гармонический состав линейного напряжения инвертора существенно меняется при уменьшении коэффициента модуляции. В первом случае  $k=0,8$  наиболее значимыми гармониками являются 89-я и 91-я (см. рис. 6, г), амплитуды которых достигают 18%. Во втором случае  $k=0,503$  область наиболее значимых гармо-

ник переместилась в диапазон со 133-й по 137-ю с такой же амплитудой. В общем, при сравнении графиков на рис. 6, г и рис. 7, г следует заметить, что произошло перераспределение значимых гармоник на частотном диапазоне из области 83-я – 97-я в области 41-й – 49-й и 131-й – 139-й гармоник. При этом увеличилось общее содержание высших гармоник в кривой линейного напряжения THD<sub>U</sub> с 38 до 52%. С учетом того, что гармоники напряжения имеют столько высокий порядок, следует ожидать, что их присутствие в токе будет весьма незначительным.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований оптимизированных алгоритмов переключений векторной ШИМ для трехуровневого NPC-инвертора позволяют сделать следующие выводы:

– использование оптимизированных шаблонов позволило снизить число переключений силовых ключей. Этот факт особенно важен при работе инверторов в составе мощных электроприводов, где частота выходного напряжения изменяется в пределах десятков герц;

– укороченные шаблоны переключений не привели к существенному ухудшению гармонического состава напряжения и наиболее значимые гармоники при разных значениях коэффициента модуляции находятся в области высоких частот. Следовательно, искажение синусоидальности кривой выходного тока инвертора при использовании оптимизированных алгоритмов переключения окажется незначительным. Это связано с тем, что проявление гармоник более высоких частот в токе ограничится большим реактивным сопротивлением индуктивных элементов.

Отмеченные результаты показывают, что предложенные оптимизированные алгоритмы пространственно-векторной ШИМ с уменьшенным числом переключений в шаблонах позволяют значительно снизить коммутационные потери трехуровневого NPC-инвертора и сохранить приемлемый гармонический состав кривой выходного линейного напряжения инвертора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walczyna A.M., Hill R.J. Space Vector PWM Strategy for 3Level Inverters With Direct Self-Controls. Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, 1993, vol. 4, pp. 152-157.
2. Rodriquez J., Lai J.S., Peng F.Z. Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 724-738.
3. Принципы построения векторной широтно-импульсной модуляции для трехуровневого инвертора / Абдулвелеев И.Р., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П., Никифоров Г.В. // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С. 72-77.
4. Lui H.L., Choi N.S., Cho G.H. DSP Based Space Vector PWM for Three-Level Inverter with DC-Link Voltage Bal-

- ancing, 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '91), 1991, vol. 1, pp. 197-203.
5. Yamanaka K., Hava A.M., Kirino H., Tanaka Y., Koga N., Kume T. A Novel Neutral Point Potential Stabilization Technique Using the Information of Output Current Polarities and Voltage Vector. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 1572-1580.
6. Mekhilef S., Khudhur H.I., Belkamel H. DC link Capacitor Voltage Balancing in Three Level Neutral Point Clamped Inverter. IEEE 13<sup>th</sup> Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2012, pp. 1-4.
7. Celanovic N., Boroyevich D. A Comprehensive Study of Neutral-Point Voltage Balancing Problem in Three-Level Neutral-Point-Clamped Voltage Source PWM Inverters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, vol. 15, no.2, pp. 242-249.
8. Das S., Narayanan G. Novel Switching Sequences for a Space-Vector-Modulated Three-Level Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 3, pp. 1477-1487.
9. Gupta A.K., Khambadkone A.M. A Simple Space Vector PWM Scheme Operate a Three-Level NPC Inverter at High Modulation Index. Conference Record of the Industry Applications Conference. Fourtieth IAS Annual Meeting, 2005, vol. 3, pp. 1657-1664.
10. Busquets-Monge S., Bordonau J., Boroyevich D., Somavilla S. The Nearest Three Virtual Space Vector PWM – A Modulation for the Comprehensive Neutral-Point Balancing in the Three-Level NPC Inverter. IEEE Power Electronics Letters, 2004, vol. 2, no. 1, pp. 11-15.
11. Busquets-Monge S., Somavilla S., Bordonau J., Boroyevich D. The Capacitor Voltage Balance for the Neutral-PointClamped Converter Using the Virtual Space Vector Concept with Optimized Spectral Performance. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 1128-1135.
12. Zhou D. A Self-Balancing Space Vector Switching Modulator for Three-Level Motor Drives. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, vol. 17, no. 6, pp. 1024-1031.
13. Abdulvelev I.R., Khrashin T.R., Kornilov G.P. Space-vector pulse-width modulation of a three-level NPC-inverter at low switching frequency. Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW) on Russia, 2016, pp. 476-481.
14. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р. Моделирование электротехнических комплексов промышленных предприятий: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 239 с.

Поступила в редакцию 18 января 2019 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### SWITCHING PATTERNS FORMATION OF A THREE-LEVEL INVERTER WITH SPACE VECTOR WIDTH-PULSE MODULATION

Ildar R. Abdulvelev

Assistant Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: leggyild@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2748-6533>.

Timur R. Khrashin

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

Gennadiy P. Kornilov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: korn\_mgn@mail.ru.



Rauza R. Abdulveleeva

Ph.D. (Pedagogic), Associate Professor, Electric Power and Electrical Engineering Department, Metallurgical Technology Faculty, National University of Science and Technology "MISIS" (Novotroitsk branch), Novotroitsk, Russia.

Valeriy I. Kosmatov

Ph.D. (Engineering), Professor, Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The article describes the methods of forming switching patterns of a three-level inverter with space-vector pulse-width modulation (PWM). Patterns are a combination of switching of the three nearest vectors from their set represented in the form of a well-known hexagon of basic vectors. The formation of the reference vector involving three basic vectors is known in the literature as NTV (Nearest Three Vectors). Depending on the magnitude of the modulation index taking values from 0 to 1, there are three different ranges. The aim of the research of this article is to optimize switching patterns in all ranges in order to reduce the number of commutation of inverter switches of high-power electric drives. The analysis of the inverter output voltage harmonics is given for different values of the modulation index and an optimized switching algorithm. It is noted that the optimized vector PWM algorithms with a reduced number of switching makes it possible to reduce switching losses and preserve the acceptable harmonic composition of the inverter output voltage. The results of the study were obtained on the basis of simulation modeling in the Matlab Simulink environment.

**Keywords:** Three-level NPC-inverter, space vector pulse-width modulation, switching patterns, modulation index.

#### REFERENCES

1. Walczyna A.M., Hill R.J. Space Vector PWM Strategy for 3Level Inverters with Direct Self-Controls. Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, 1993, vol.4, pp. 152-157.
2. Rodriquez J., Lai J.S., Peng F.Z. Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 724-738.
3. Abdulveleev I.R., Khrashin T.R., Kornilov G.P., Nikiforov G.V. Basic Principles of Space Vector Modulation for Three-Level NPC-Inverters. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekxy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4 (33), pp. 72-77 (in Russian).
4. Lui H.L., Choi N.S., Cho G.H. DSP Based Space Vector PWM for Three-Level Inverter with DC-Link Voltage Balancing, 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '91), 1991, vol.1, pp. 197-203.
5. Yamanaka K., Hava A.M., Kirino H., Tanaka Y., Koga N., Kume T. A Novel Neutral Point Potential Stabilization Technique Using the Information of Output Current Polarities and Voltage Vector. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 1572-1580.
6. Mekhilef S., Khudhur H.I., Belkamel H. DC link Capacitor Voltage Balancing in Three Level Neutral Point Clamped Inverter. IEEE 13<sup>th</sup> Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2012, pp. 1-4.
7. Celanovic N., Boroyevich D. A Comprehensive Study of Neutral-Point Voltage Balancing Problem in Three-Level Neutral-Point-Clamped Voltage Source PWM Inverters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, vol. 15, no. 2, pp. 242-249.
8. Das S., Narayanan G. Novel Switching Sequences for a Space-Vector-Modulated Three-Level Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 3, pp. 1477-1487.
9. Gupta A.K., Khambadkone A.M. A Simple Space Vector PWM Scheme Operate a Three-Level NPC Inverter at High Modulation Index. Conference Record of the Industry Applications Conference. Fourtieth IAS Annual Meeting, 2005, vol. 3, pp. 1657-1664.
10. Busquets-Monge S., Bordonau J., Boroyevich D., Somavilla S. The Nearest Three Virtual Space Vector PWM – A Modulation for the Comprehensive Neutral-Point Balancing in the Three-Level NPC Inverter. IEEE Power Electronics Letters, 2004, vol. 2, no. 1, pp. 11-15.
11. Busquets-Monge S., Somavilla S., Bordonau J., Boroyevich D. The Capacitor Voltage Balance for the Neutral-PointClamped Converter Using the Virtual Space Vector Concept with Optimized Spectral Performance. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 1128-1135.
12. Zhou D. A Self-Balancing Space Vector Switching Modulator for Three-Level Motor Drives. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, vol. 17, no. 6, pp. 1024-1031.
13. Abdulveleev I.R., Khrashin T.R., Kornilov G.P. Space-vector pulse-width modulation of a three-level NPC-inverter at low switching frequency. Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW) on Russia, 2016, pp. 476-481.
1. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khrashin T.R. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov promyshlennykh predpriyatii: uchebnoe posobie* [Modeling of electrotechnical complexes of industrial enterprises: textbook], Magnitogorsk, 2014, 239 p. (in Russian)

Абулвелеев И.Р., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П., Абдулвелеева Р.Р., Косматов В.И. Формирование шаблонов переключений трехуровневого инвертора с векторной широтно-импульсной модуляцией // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 1(42). С. 45-52. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-45-52](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-45-52)

Abdulveleev I.R., Khrashin T.R., Kornilov G.P., Abdulveleeva R.R., Kosmatov V.I. Switching Patterns Formation of a Three-Level Inverter with Space Vector Width-Pulse Modulation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekxy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 45-52. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-45-52](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-45-52)

## СИСТЕМА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ УТЕЧКИ

В статье изложен подход к построению системы оценки расхода ресурса и прогнозирования состояния изоляции обмоток асинхронных электродвигателей на основе емкостных токов утечки. Подход базируется на основе измерения емкостных токов утечки, создаваемых непрерывной последовательностью прямоугольных импульсов напряжения. Уменьшение величины этих токов свидетельствует об уменьшении остаточного ресурса изоляции обмотки. Эксперименты показывают экспоненциальное уменьшение токов утечки вследствие развития деградиационных процессов в изоляции в долговременном плане. Оценку величины остаточного ресурса предложено выполнять с помощью моделирующей экспоненты, параметры которой восстанавливаются в текущем режиме с помощью методов идентификации параметров, такие как метод наименьших квадратов (МНК) или методы, основанные на Калмановском алгоритме. Преимуществом предлагаемого метода является сравнительная простота используемых технических средств и возможность выполнять оценку остаточного ресурса изоляции обмотки, опираясь только на экспериментально полученные посредством измерения данные. В статье описан алгоритм работы системы прогнозирования состояния изоляции на основе идентификации параметров моделирующей экспоненты. Показана возможность прогнозирования остаточного ресурса, выраженного в единицах времени, как разности между прогнозируемым временем выхода из строя и текущим моментом времени, где под текущим временем подразумевается время наработки. Приведены результаты моделирования работы предлагаемого алгоритма с идентификацией параметров моделирующей экспоненты на основе МНК. Моделировалась работа алгоритма с интервалом измерений 100 ч при гауссовском законе распределения погрешности измеренных значений тока утечки со средним квадратичным отклонением 20%. Показано, что значения параметров моделирующей экспоненты достаточно хорошо сходятся к истинным значениям при таком уровне зашумления даже без использования предфильтрации последовательности измеренных значений тока утечки.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, обмотка статора, изоляция обмотки, остаточный ресурс, токи утечки, диагностика, оценка состояния изоляции, прогнозирование состояния изоляции, идентификация параметров, метод наименьших квадратов.

### ВВЕДЕНИЕ

Асинхронные двигатели (АД) – самый распространенный тип электродвигателей. При всей надежности таких двигателей, ежегодный выход их из строя достигает 20-25% [1]. В некоторых отраслях усредненный ресурс электродвигателей переменного тока намного меньше нормативного; например, в сельском хозяйстве он меньше в 2,5–3,5 раза [2]. Значительная доля выходов АД из строя связана с повреждением обмоток статора [3, 4]. Это объясняется тем, что изоляция обмотки статора АД выступает в роли «слабого звена», подверженного различного рода неблагоприятным воздействиям, таким как температура, агрессивная среда и т.п. Эти обстоятельства определяют важность проблемы оценки остаточного ресурса изоляции обмотки статора АД.

Одним из важнейших факторов, влияющих на долговечность изоляции обмотки, является температура. В [5, 6] получено выражение для интервала времени  $T_R$ , в течение которого изоляция достигнет своего предельного состояния вследствие термического старения

$$T_R = k \cdot \exp(B / Q - G), \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности ( $k=1$ , если срок службы изоляции измеряется в часах);  $B$  и  $G$  – постоянные;  $Q$  – абсолютная температура.

С использованием выражения (1) можно ввести понятие остаточного термического ресурса изоляции  $R_{res}$  как безразмерной величины, связывающей скорость старения изоляции при температуре, соответствующей номинальному режиму работы ( $v_N$ ) и постоянной величине воздействия других факторов с ее остаточным сроком службы ( $T_{res}$ ) в этом режиме:

$$T_{res} = R_{res} / v_N; \quad (2)$$

$$R_{res} = 1 - \int_0^{t_p} v(t) dt, \quad (3)$$

где  $v$  – мгновенное значение скорости старения изоляции, а  $t_p$  – время работы.

Величина  $R_{res}$  пропорциональна неиспользованному сроку службы изоляции, измеряемому в именованных единицах времени. В начале срока эксплуатации двигателя  $T_{res}$  совпадает с  $T_R$ .

Хотя температура обмотки является важнейшим фактором, определяющим долговечность изоляции, необходимо отметить существование и других факторов, воздействующих на состояние изоляции – вибраций, влажности, агрессивной среды, электрического поля [5, 7–10]. В существующих системах тепловой защиты, в том числе и использующих непосредственное измерение температуры обмотки, сложно обеспечить учет всего многообразия прочих воздействующих факторов. Поэтому представляет интерес получение таких способов контроля текущего состояния изоляции

обмоток, которые по некоторым измеряемым величинам позволяли бы оценивать текущее состояние изоляции обмоток и прогнозировать это состояние.

Существуют работы, где предлагаются подходы к мониторингу состояния и определению остаточного ресурса электродвигателей на основе некоторых комплексных критериев [1, 11–13]. Во многих случаях такие решения требуют целого набора датчиков, а зачастую и сложного математического обеспечения. При этом в некоторых случаях, например в [11], при построении оценочного критерия не учитывается термическое воздействие на изоляцию обмотки машины. Кроме того, такие подходы, как правило, не в состоянии учесть влияние на деградационные процессы в изоляции обмоток работу ШИМ в системе ПЧ-АД и некоторые другие факторы.

Существует также большое количество работ, связанных с экспериментальной оценкой состояния изоляции обмоток электродвигателей. Для этой цели применяются различные методы, такие как измерение тангенса угла диэлектрических потерь, метод на основе частичных разрядов, на основе анализа переходных процессов при подаче импульса напряжения на обмотку и т.д. Все эти методы имеют свои преимущества и недостатки.

Так, тангенс угла диэлектрических потерь позволяет судить о состоянии изоляции, однако этот показатель очень чувствителен к увлажнению изоляции, кроме того, недостатком этого подхода является сложность автоматизации процесса измерения.

Метод частичных разрядов дает возможность получить информацию о наличии различных дефектов в изоляции двигателя на ранней стадии их развития. Однако применение этого метода для низковольтных двигателей проблематично [14]. Кроме того, этот метод имеет низкую помехозащищенность и его сложно автоматизировать.

В ряде работ предлагается диагностирование изоляции обмоток двигателя на основе анализа параметров переходного процесса, возникающего при тестировании обмотки импульсом напряжения [1, 15–20]. Недостатки такого подхода связаны с необходимостью регистрирования параметров переходных процессов, имеющих очень малую длительность. Так, в [16] в качестве интегрального параметра, характеризующего состояние изоляции обмоток статора, предлагается использовать отношение декремента затухания колебаний к периоду затухания переходного процесса, в [1] предлагается судить о состоянии изоляции по амплитудам первого и второго полупериодов и длительности первого и второго периодов колебаний. В [19, 20] предлагается индикатор состояния изоляции обмотки, основанный на анализе амплитудного спектра колебательной составляющей тока после подачи ступенчатого сигнала. При характерных для таких процессов частотах колебаний сигнала (порядка МГц) все эти подходы требуют оборудования, обеспечивающего весьма высокое разрешение по времени. Так, в [19] указывается, что частота измерений сигнала должна быть, по крайней мере, в 20 раз больше максимальной частоты, используемой для расчета индикатора состояния изоляции. Недостатком подобных методов также является проблема достоверного расчета таких показателей процесса, как декремент затухания колебаний и период,

построение амплитудного спектра сигналов в условиях помех. Здесь также возникают сложности и с задачей автоматизации процесса диагностики.

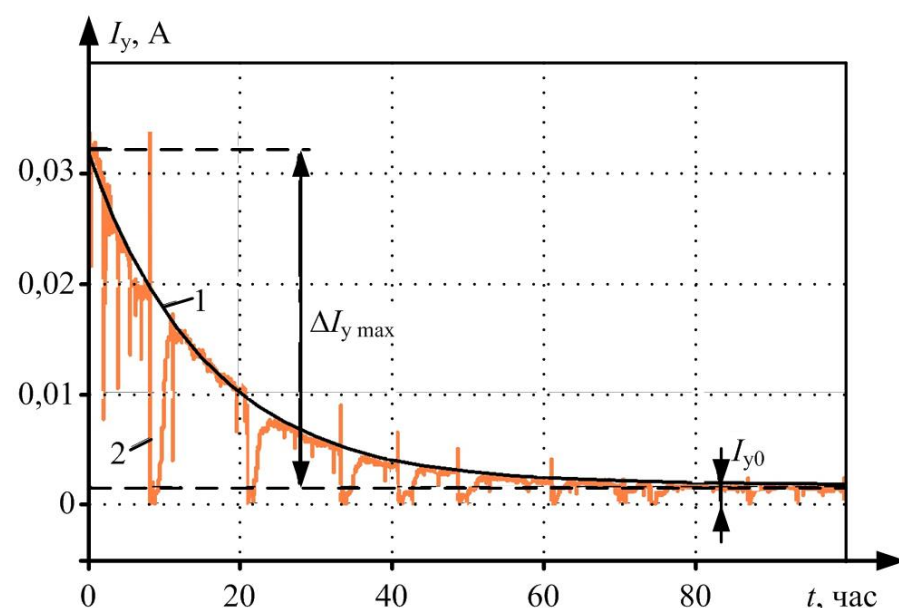
Изложенное выше позволяет сделать вывод об актуальности задачи поиска более простых методов диагностики изоляции обмоток, в том числе и с использованием тестирующих импульсов напряжения, которые бы предъявляли меньшие требования к аппаратуре, математическим методам обработки сигнала и позволяли бы проще осуществить автоматизацию измерений. Одним из таких методов может быть метод на основе не единичного тестирующего импульса, а их последовательности, достаточно длинной для того, чтобы можно было говорить о некоторых средних или среднеквадратичных значениях параметров процессов, которые можно было бы связать с состоянием изоляции обмотки и использовать для ее диагностики [21].

#### СВЯЗЬ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ УТЕЧКИ С СОСТОЯНИЕМ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ

В экспериментальном исследовании, результаты которого изложены в [22] (K. Younsi, et al., USA, GE), показано, что величина емкостного тока утечки изоляции обмотки электродвигателя тесно связана с процессом старения изоляции. Это было установлено в ходе обстоятельных экспериментов по ускоренному старению изоляции обмотки статора асинхронного двигателя (480 В, 73,5 кВт, 1200 об/мин) с изоляцией обмотки статора класса F.

На **рис. 1** показаны график полного тока утечки (включающего емкостную и резистивную компоненты) по экспериментальным данным из [22] (здесь убран интервал времени, соответствующий приостановке эксперимента) и экспоненциальная аппроксимация огибающей этого графика. Уменьшение со временем тока утечки связано здесь с тем, что при термическом старении изоляции происходит снижение емкостных свойств изоляции [23], что вызывает уменьшение емкостной компоненты тока утечки, составляющей здесь доминирующую часть полного тока. На **рис. 1** четко прослеживается возможность описания временной зависимости графика тока утечки ( $I_y$ ) по мере нарастания деградационных изменений в изоляции аппроксимирующим выражением

$$I_y = \Delta I_{y,\max} e^{-\alpha_y t} + I_{y0}. \quad (4)$$



**Рис. 1.** Аппроксимация полного тока утечки экспонентой (1), наложенная на экспериментальную зависимость для одной из фаз двигателя (2)



АЛГОРИТМ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ УТЕЧКИ  
КАК ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРИЗНАКА

Зависимость (4) является своего рода моделью процесса старения изоляции, поэтому далее, для краткости, будем называть эту зависимость «моделирующей экспонентой». Выявленный характер зависимости тока утечки в процессе старения изоляции позволяет построить систему мониторинга состояния изоляции на основе контроля превышения измеренной величины  $I_y$  над некоторым уровнем  $I_{y.lim}$ , снижение ниже которого свидетельствует об исчерпании ресурса изоляции. Проблема здесь заключается в сильном зашумлении полезного сигнала вследствие действия помех в информационных каналах и с влиянием на токи утечки параметров окружающей среды. Согласно экспериментальным данным [22], пробой изоляции наступает спустя время, большее, чем 5-6 постоянных времени экспоненты в выражении (1). К этому времени значение экспоненты становится весьма мало, что усложняет проблему определения момента пересечения уровня  $I_{y.lim}$  в условиях помех. Это хорошо прослеживается на рис. 2, где показан набор реализаций зашумленного сигнала  $I_y(t)$  с интервалом отсчетов  $\Delta t = 100$  ч после фильтрации с использованием фильтра 1-го порядка с постоянной  $T_f = 4\Delta t$ . Здесь видно, что при разных реализациях зашумленного процесса кривая  $I_y(t)$  пересекает пороговый уровень в существенно разное время. Таким образом, фильтрация и сглаживание сигнала не позволяют надежно решить эту проблему, поэтому представляется целесообразным использовать подходы, связанные с идентификацией параметров моделирующей экспоненты  $I_y(t)$  для последующей оценки величины прогнозируемого времени пересечения порогового уровня ( $t_{lim}$ ). В этом случае появляется возможность прогнозирования остаточного ресурса, выраженного в единицах времени ( $T_R$ ), как разности между прогнозируемым временем  $t_{lim}$  и текущим моментом времени  $t_t$ :

$$T_R = t_{lim} - t_t, \quad (5)$$

где под текущим временем подразумевается время наработки.

Из формулы (4) можно получить выражение для  $t_{lim}$

$$t_{lim} = \frac{1}{\alpha_y} \ln \frac{\Delta I_{y.max}}{\Delta I_{y.lim}}, \quad (6)$$

где  $\Delta I_{y.lim} = I_{y.lim} - I_{y0}$  – превышение над уровнем установившегося значения тока утечки.

Можно предложить следующий алгоритм работы системы прогнозирования состояния изоляции на основе идентификации параметров моделирующей экспоненты. Здесь будем предполагать, что процессы нагружения двигателя, а также изменения параметров окружающей среды носят стационарный характер на интервалах, превышающих по длительности постоянную времени экспоненты (4). Алгоритм работает с накопленными значениями  $I_y = [I_{y1}, I_{y2}, \dots, I_{yk}]$  и  $t_t = [t_{t1}, t_{t2}, \dots, t_{tk}]$ , где  $k$  – номер последнего измерения. Каждый раз после нового измерения  $I_{yk}$  происходит запоминание очередной пары  $t_{tk}$  и  $I_{yk}$ .

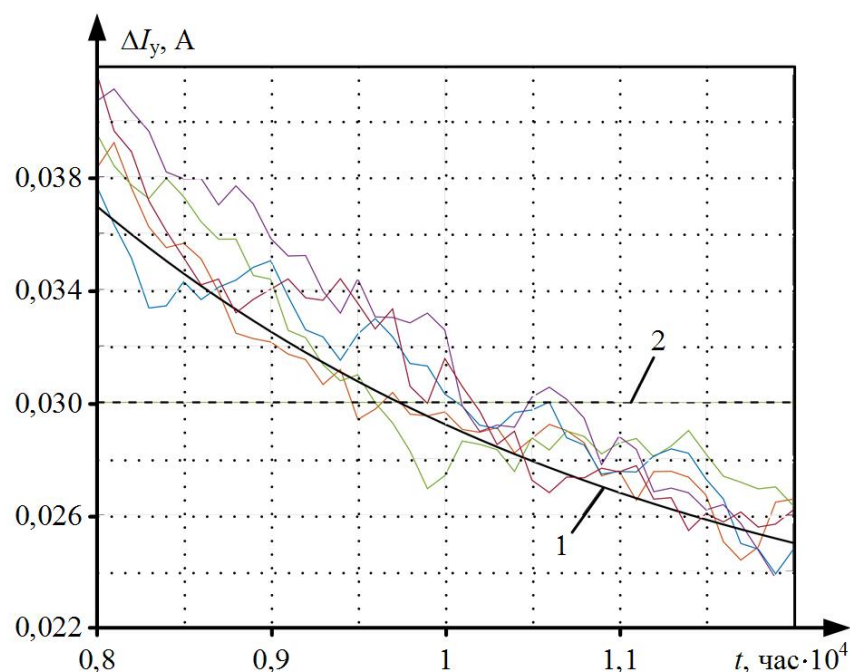


Рис. 2. Набор реализаций зашумленного сигнала с фильтром 1-го порядка; 1 – моделирующая экспонента; 2 – уровень  $I_{y.lim}$

Начало обработки зарегистрированных данных с целью идентификации параметров моделирующей экспоненты начинается не сразу после начала измерений, так как при ограниченном количестве точек в условиях существенной случайной составляющей достоверно определить параметры моделирующей экспоненты сложно. Поэтому в начале работы алгоритма выполняется проверка – превышает ли время  $t_{tk}$  некоторое начальное значение  $t_{t.нач}$ , где  $t_{t.нач}$  – время наработки, после которого можно начать идентификацию параметров экспоненты. Расчет  $t_{t.нач}$  может быть выполнен с использованием экспоненты, описывающей деградационные процессы в изоляции при допустимой для данного класса изоляции температуре. Полагаем, что исчерпание ресурса происходит, как следует из экспериментальных результатов [22], при  $t_{tk} > (4...5)/\alpha_{yN}$ , где  $\alpha_{yN}$  – степенной коэффициент экспоненты при работе с допустимой для данного класса изоляции температурой. Если рассчитать характерные времена исчерпания ресурса ( $T_R$ ) по формуле (1), то, принимая эти времена за  $T_R = (4...5)/\alpha_{yN}$ , можно определить  $\alpha_{yN}$  по выражению

$$\alpha_{yN} = (4...5)/T_R. \quad (7)$$

В таблице приведены рассчитанные значения  $T_R$  и  $\alpha_{yN}$  для разных классов изоляции.

Величину  $t_{t.нач}$  принимаем равной  $1/\alpha_{yN}$ . При недогрузке привода величина  $\alpha_y$  будет меньше, чем  $\alpha_{yN}$ , однако количество точек  $(t_t, I_y)$ , зарегистрированных за время  $t_{t.нач}$ , зависит только от интервала измерений  $\Delta t$ . Кроме того, в алгоритме предусмотрены проверки для оценки достоверности параметров экспоненты, восстанавливаемых по зарегистрированным данным.

Значения  $T_R$  и  $\alpha_{yN}$  для различных классов изоляции

Класс изоляции	$T_R$ , час	$\alpha_{yN} \cdot 10^4$ , час <sup>-1</sup>
A	18583	2,15–2,69
E	21163	1,89–2,36
B	18215	2,20–2,74
F	21440	1,87–2,33
H	22382	1,79–2,00



После считывания массива исходных данных ( $t, I_y$ ) выполняется предфильтрация данных и проводится расчет среднего значения  $I_{y,cp(tr)}$  за предшествующий период, что необходимо для выполнения далее одной из проверок.

На следующем этапе проводится идентификация параметров моделирующей экспоненты. При этом выполняются проверки:

а) должны выполняться условия  $\Delta I_{y,max} > 0$ ,  $\alpha_y > 0$  и  $I_{y0} > 0$ , что следует из очевидных физических соображений (если не выполнено хотя бы одно условие – текущую точку игнорируем);

б) должно выполняться достаточно очевидное условие  $\Delta I_{y,max} + I_{y0} > I_{y,cp(tr)}$ .

После определения параметров моделирующей экспоненты выполняется расчет прогнозируемого времени исчерпания ресурса  $t_{lim}$  и проверка знака разности  $t_{lim} - t_{tk}$ , представляющей собой величину остаточного ресурса. При отрицательной величине этой разности выдается решение о том, что ресурс исчерпан.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 3 показаны результаты моделирования работы рассмотренного алгоритма в *Matlab/Simulink*. Идентификация параметров моделирующей экспоненты проводилась с использованием МНК. По горизонтали на рис. 3 – время от начала эксплуатации. Пунктирными линиями показаны уровни, соответствующие истинным значениям  $\Delta I_{y,max}$ ,  $\alpha_y$ ,  $I_{y0}$  и соответствующим этим значениям расчетным величинам  $t_{lim}$ . Моделировалась работа алгоритма с интервалом измерений 100 ч без предфильтрации, при гауссовском законе распределения погрешности со средним квадратичным отклонением 20% от величины  $I_y$  по моделирующей экспоненте. Обозначено: 1 –  $\Delta I_{y,lim} = 0,0067 \Delta I_{y,max}$  (о); 2 –  $\Delta I_{y,lim} = 0,0183 \Delta I_{y,max}$  (Δ). На рис. 3 видно, что величины вычисленных параметров моделирующей экспоненты и  $t_{lim}$ , по мере накопления зарегистрированных значений тока утечки, достаточно хорошо сходятся к истинным их величинам.

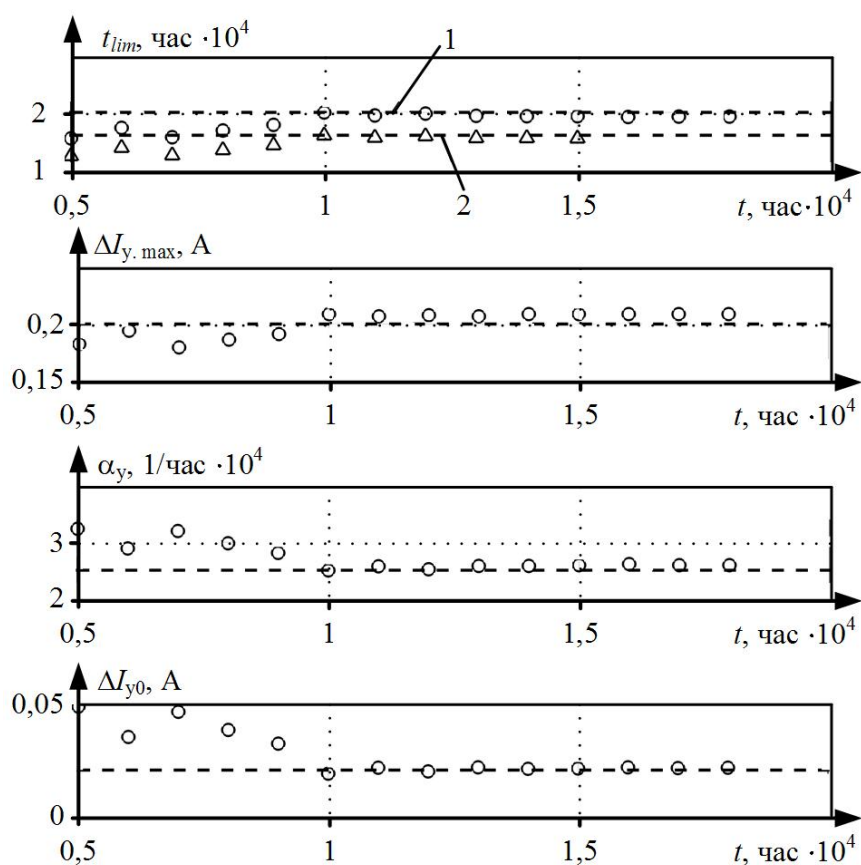


Рис. 3. Результаты моделирования работы алгоритма системы прогнозирования состояния изоляции

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен подход к мониторингу и прогнозированию состояния изоляции обмотки электродвигателя на основе использования информации о емкостных токах утечки.

2. Описан алгоритм работы системы прогнозирования состояния изоляции с использованием информации о емкостных токах утечки на основе идентификации параметров моделирующей экспоненты.

3. Проведено моделирование предложенного алгоритма в *Matlab/Simulink*, подтвердившее его работоспособность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей / Воробьев Н.П., Воробьева С.Н., Суханкин Г.В., Герцен Н.Т. // Ползуновский вестник. 2011. № 2/2. С. 261–269.
2. Пахомов А.И. Методы и средства диагностики изоляции асинхронных двигателей сельскохозяйственного производства на основе частичных разрядов: дис.... д-ра техн. наук: 05.20.02. Краснодар, 2008. 347 с.
3. Engelmann R.H., Middendorf W.H. Handbook of Electric Motors. New York: Marcel Dekker, 1995. 801 p.
4. Современные методы неразрушающего контроля и диагностики технического состояния электроприводов горных машин / Бабуринов С.В., Жуковский В.Л., Коржев А.А., Кривенко А.В. // Горное оборудование и электромеханика. 2009. №9. С. 34–38.
5. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов. М.: Издат. дом МЭИ, 2006. 432 с.
6. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. Л.: Энергия, 1976. 248 с.
7. Stone G.C., Boulter E. A., Culbert I., Dhirani H. Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. New Jersey: IEEE Computer Society Press, 2004. 252 p.
8. Brancato E.L. Insulation Aging. A Historical and Critical Review // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1978. Vol. EI-13, no. 4, pp. 308–317.
9. Farahani M., Gockenbach E., Borsi H., Schäfer K., Kaufhold M. Behavior of Machine Insulation Systems Subjected to Accelerated Thermal Aging Test // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2010. Vol. 17, no. 5, pp. 1364–1372.
10. Tavner P. J., Penman J. Condition Monitoring Electrical Machines. Hertfordshire, U.K.: Research Studies Press, 1987. 282 p.
11. Пат. №121086 РФ, МПК G01R 31/34 (2006.01). Устройство для диагностики электродвигателей переменного тока / А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, В.В. Тимошкин, В.И. Полищук. Заявка № 2012116366/28; Опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28.
12. Хомутов О.И., Бондаренко Т.Е., Грибанов А.А. Проблема комплексной оценки изменения физико-химических свойств электроизоляционных материалов в реальных условиях эксплуатации электрооборудования // Ползуновский вестник. № 1. 2002. С. 4–9.
13. Пустахайлов С.К. Разработка многоканальной системы мониторинга асинхронных электродвигателей электростанций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Ставрополь, 2006. 24 с.
14. Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестник ПНИИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. № 7. С. 127–137.
15. Гутов И.А. Прогнозирование состояния электродвигателей

- на основе использования многофакторных моделей старения изоляции: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. Барнаул, 1997. 259 с.
16. Сташко В.И., Губин И.Б. Моделирование состояния изоляции обмоток асинхронных двигателей сезонно эксплуатируемого электрооборудования на основе использования показателей волнового переходного процесса // Ползуновский вестник. № 1. 2002. С. 51–57.
  17. Белоусова Н. В., Калявин В.П., Мозгалеvский А.В. Опыт тестового диагностирования обмоток электрических машин. Л.: ЛДНТП, 1989, 24 с.
  18. Левачев А.В. Диагностика изоляции асинхронных электродвигателей на основе использования параметров схемы замещения обмоток: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. Барнаул, 2002. 167 с.
  19. Nussbaumer P., Vogelsberger M., Wolbank T. Exploitation of induction machine's high-frequency behavior for online insulation monitoring // 9th Annual. Int. Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives. Valencia, Spain, 27–30 Aug. 2013, pp. 579–585.
  20. Nussbaumer P., Wolbank T., Vogelsberger M. Separation of disturbing influences on induction machine's high-frequency behavior to ensure accurate insulation condition monitoring // 28th Annual. Appl. Power Electron. Conference and Exposition. Long Beach, USA, 17–21 March 2013, pp. 1158–1163.
  21. Metelkov V.P., Borodin M.Yu., Kondakov K.A., Nesterov K.E. Method for monitoring the condition of the motor winding insulation // XVII International Scientific Technical Conference «Alternating current electric drives» – ACED 2018. Ekaterinburg, Russia, 26–30 March 2018. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341717.
  22. Younsi K., Neti P., Shah M., Zhou J., Krahn J., Weeber K., Whitefield C. On-line capacitance and dissipation factor monitoring of AC stator insulation // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2010. Vol. 17, no. 5, pp. 1441–1452.
  23. Lee S.B., Younsi K., Kliman G.B. An online technique for monitoring the insulation condition of ac machine stator windings // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2005. Vol. 20, no. 4, pp. 737–745.

Поступила в редакцию 08 декабря 2018 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### SYSTEM FOR ESTIMATING THE RESIDUAL RESOURCE OF INDUCTION MOTOR WINDING INSULATION BASED ON CAPACITIVE LEAKAGE CURRENTS

Vladimir P. Metelkov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5640-1637>.

Anatoliy M. Ziuzev

D.Sc. (Engineering). Professor, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

Il'ya V. Chernykh

D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Department of High Voltage Technique, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: i.v.chernykh@urfu.ru

The article presents an approach to creating a system for estimating resource expenditure and predicting the induction motors windings insulation condition based on capacitive leakage currents. The approach is based on the measurement of capacitive leakage currents created by a continuous sequence of rectangular voltage pulses. A decrease in the magnitude of these currents indicates a decrease in the residual life of the winding insulation. Experiments show an exponential decrease in leakage currents due to the development of insulation degradation processes in the long term. It was proposed to estimate the residual resource value using a modeling exponent, whose parameters are determined in the current time mode using parameter identification methods such as the least squares method (OLS) or methods based on the Kalman algorithm. The advantage of the proposed method is the comparative simplicity of the technical means used and the ability to assess the residual life of the winding insulation relying only on the data experimentally obtained through measurement. The article describes the operation of the algorithm for the prediction of the insulation condition based on the parameters identification of the modeling exponent. The possibility of predicting the residual resource, expressed in units of time, as the difference between the predicted time of failure and the current point in time, where the current time here means the operating time is shown. The results of the proposed algorithm simulation with the identification of a modeling exponent based on OLS are

given. The algorithm was simulated with a measurement interval of 100 hours with a Gaussian distribution law for the error of measured leakage currents with a standard deviation of 20%. It is shown that the values of the modeling exponent parameters agree quite well with the true values at this level of noise even without using prefiltration of the leakage current measured values sequence.

**Keywords:** induction motor, stator winding, winding insulation, residual life, leakage currents, diagnostics, insulation condition monitoring, insulation condition prediction, parameter identification, least squares method.

#### REFERENCES

1. Vorobiev N.P., Vorobieva S.N., Sukhankin G.V., Gertsen N.T. [Methods and instruments for diagnosing insulation of asynchronous motors]. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunov Bulletin], 2011, no. 2/2, pp. 261–269. (in Russian)
2. Pakhomov A.I. *Metody i sredstva diagnostiki izolyatsii asinkhronnykh dvigateley selskokhozyaystvennogo proizvodstva na osnove chastichnykh razryadov*. Dis. doct. tekhn. nauk [Methods and tools for diagnostics of insulation of asynchronous motors of agricultural production on the basis of partial discharges. D.Sc. DISS.]. Krasnodar, 2008. 347 p.
3. Engelmann R.H., Middendorf W.H. *Handbook of Electric Motors*. New York: Marcel Dekker, 1995. 801 p.

4. Baburin S.V., Zhukovskiy V.L., Korzhev A.A., Krivenko A.V. Modern non-destructive testing and diagnostics methods of mining machines electric drives technical condition. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electrical engineering], 2009, no. 9, pp. 34–38. (in Russian)
5. Kuznetsov N. L. *Nadezhnost elektricheskikh mashin* [The reliability of electrical machines]. Moscow, MEI Publ. House, 2006. 432 p.
6. Ermolin N.P., Zherikhin I.P. *Nadezhnost elektricheskikh mashin* [The reliability of electrical machines]. Leningrad: Energiya, 1976. 248 p.
7. Stone G.C., Boulter E. A., Culbert I., Dhirani H. *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. New Jersey: IEEE Computer Society Press, 2004. 252 p.
8. Brancanto E.L. Insulation Aging. A Historical and Critical Review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1978, vol. EI-13, no. 4, pp. 308–317.
9. Farahani M., Gockenbach E., Borsi H., Schäfer K., Kaufhold M. Behavior of Machine Insulation Systems Subjected to Accelerated Thermal Aging Test. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, vol. 17, no. 5, pp. 1364–1372.
10. Tavner P.J., Penman J. *Condition Monitoring Electrical Machines*. Hertfordshire, U.K.: Research Studies Press, 1987. 282 p.
11. Glazyrin A.S., Glazyrina T.A., Timoshkin V.V., Polishchuk V.I. *Ustroystvo dlya diagnostiki elektrodvigately peremennogo toka* [Device for the diagnosis of AC motors]. Patent RF, no. 121086, 2012.
12. Khomutov O.I., Bondarenko T.E., Gribov A.A. [The problem of comprehensive assessment of changes in the physico-chemical properties of electrical insulating materials under actual operating conditions of electrical equipment]. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunov Bulletin], 2002, no. 1, pp. 4–9. (In Russian)
13. Pustakhaylov S.K. *Razrabotka mnogokanalnoy sistemy monitoringa asinkhronnykh elektrodvigately elektrostantsiy*. Avtoref. kand. diss. [Development of a multichannel monitoring system for asynchronous electric motors of power plants. Abstract of Ph.D. Diss.]. Stavropol, 2006. 24 p.
14. Sidelnikov L.G., Afanasiev D.O. [Review of methods for monitoring the technical condition of asynchronous motors in operation]. *Vestnik PNIIPU. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo* [Bulletin PNIIPU. Geology. Oil, gas and mining], 2013, no. 7, pp. 127–137. (In Russian)
15. Gutov I.A. *Prognozirovaniye sostoyaniya elektrodvigately na osnove ispolzovaniya mnogo faktornykh modeley stareniya izolyatsii*. Kand. Diss. [Predicting the state of electric motors based on the use of multivariate models of insulation aging. Ph.D. Diss.]. Barnaul, 1997. 259 p.
16. Stashko V.I., Gubin I.B. [Simulation of the insulation state of asynchronous motors windings of seasonally operated equipment based on the use of wave transient indicators]. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunov Bulletin], 2002, no. 1, pp. 51–57. (in Russian)
17. Belousova N. V., Kalyavin V.P., Mozgalevskiy A.V. *Opyt testovogo diagnostirovaniya obmotok elektricheskikh mashin* [Experience of test diagnosis of electric machine windings]. Leningrad, LDNTP, 1989. 24 p.
18. Levachev A.V. *Diagnostika izolyatsii asinkhronnykh elektrodvigately na osnove ispolzovaniya parametrov skhemy zameshcheniya obmotok*. Kand. Diss. [Asynchronous electric motors insulation diagnostics based on the use of parameters of a winding replacement circuit. Ph.D. Diss.]. Barnaul, 2002. 167 p.
19. Nussbaumer P., Vogelsberger M., Wolbank T. Exploitation of induction machine's high-frequency behavior for online insulation monitoring. *9th IEEE Int. Symp. on Diagnostics for Electric Machines, Power Electron. and Drives*, Aug 27, 2013, Valencia, Spain, pp. 579–585.
20. Nussbaumer P., Wolbank T., Vogelsberger M. Separation of disturbing influences on induction machine's high-frequency behavior to ensure accurate insulation condition monitoring. *28th IEEE. Appl. Power Electron. Conference and Exposition*, 17–21 March, 2013, Long Beach, USA, pp. 1158–1163.
21. Metelkov V.P., Borodin M.Yu., Kondakov K.A., Nesterov K.E. Method for monitoring the condition of the motor winding insulation. *XVII International Scientific Technical Conference «Alternating current electric drives» – ACED 2018*. Ekaterinburg, Russia, 26–30 March 2018. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341717.
22. Younsi K., Neti P., Shah M., Zhou J., Krahn J., Weeber K., Whitefield C. On-line capacitance and dissipation factor monitoring of AC stator insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, vol. 17, no. 5, pp. 1441–1452.
23. Lee S.B., Younsi K., Kliman G.B. An online technique for monitoring the insulation condition of ac machine stator windings. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, vol. 20, no. 4, pp. 737–745.

Метельков В.П., Зюзев А.М., Черных И.В. Система оценки остаточного ресурса изоляции обмотки асинхронного двигателя на основе емкостных токов утечки // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 1(42). С. 53-58. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-53-58](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-53-58)

Metelkov V.P., Ziuzev A.M., Chernykh I.V. System for Estimating the Residual Resource of Induction Motor Winding Insulation Based on Capacitive Leakage Currents. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 53-58. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-53-58](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-53-58)



## ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 004.896

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-59-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-59-66)

Ошурков В.А., Егорова Л.Г., Леднов А.В., Антипанов И.Д.

Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова

**ЧЕЛОВЕКО-МАШИННАЯ СИСТЕМА НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ: ФУНКЦИЯ ОБЪЁМНОЙ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ  
И СЕМАФОРНАЯ СИСТЕМА**

Целью научного исследования является построение функции объёмной насыпной плотности материалов в рабочих пространствах металлургических агрегатов. В качестве объекта исследования выбрана крупнотоннажная дуговая сталеплавильная печь (180 т). В качестве предмета исследования используется имитационная модель процесса загрузки шихтовых материалов в дуговой сталеплавильной печи. Исследование проводилось на базе Магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова и Магнитогорского металлургического комбината. При исследовании применялись методы системного анализа, методы причинно-следственного анализа и методы эмпирического исследования. В данной работе: описаны компоненты и взаимодействие комплекса методик для описания процесса перемещения фрагментов металлического лома между рабочими пространствами металлургических агрегатов; построена методика формирования функции объёмной насыпной плотности материалов в рабочих пространствах металлургических агрегатов; построена функциональная схема алгоритмического обеспечения семафорной системы модуля движения шихтовых материалов для отображения величины объёмной насыпной плотности фрагментов металлического лома на SCADA АСУТП плавки ДСП-180. Выполнение методики формирования функции объёмной насыпной плотности материалов позволит определить значение объёмной насыпной плотности материалов в рабочих пространствах металлургических агрегатов и оценку наполненности объёма рабочего пространства металлургических агрегатов. Визуализация значения и оценки объёмной насыпной плотности шихтовых материалов в рабочих пространствах металлургических агрегатов позволит оператору принимать решения о загружаемых шихтовых материалах. Результаты исследования предполагаются к использованию при разработке алгоритмического обеспечения человеко-машинного модуля движения шихтовых материалов между рабочими объёмами металлургических агрегатов в условиях электросталеплавильного цеха для проведения вычислительных экспериментов.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, насыпная плотность шихты, функция насыпной плотности, металлический лом, семафорная система, визуализация заполнения объема.

**ВВЕДЕНИЕ**

Развитие современных информационно-телекоммуникационных технологий способствуют появлению новых тенденций в построении структуры человеко-машинных или эргодических систем для автоматизированных систем управления технологических процессов и производств. Не является исключением и металлургическое производство, которое в настоящее время оснащается новым оборудованием. Требования потребителя к повышенному качеству готовой продукции заставляют совершенствовать технологии производственных процессов, начиная с самых ранних этапов подготовки сырья и получения полуфабриката. Учитывая многостадийность процесса получения металлургической продукции [1] и многоэтапность каждой стадии, появляется новый вызов в построении человеко-машинных систем, с помощью которых возможно выполнить интеллектуальную поддержку принятия решений для больших систем.

Одним из сложных вопросов технологии выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи является определение электрических режимов работы в зависимости от требований заказчика и свойств получаемой конечной продукции [2, 3]. Основой для достижения этих требований является качество используемого сырья, и в частности, поступающих шихтовых материалов в

дуговую сталеплавильную печь. В рамках проводимого исследования к параметрам качества шихтовых материалов относятся: химический состав металлического лома, фракционность металлического лома, структура шихтовых материалов. Фракционность металлического лома определяет насыпную плотность шихтовых материалов, загружаемых в рабочее пространство дуговой сталеплавильной печи и в последствии выбор электрических режимов работы агрегата.

Вопросами наполнения рабочих пространствах металлургических агрегатов шихтой занимаются российские и зарубежные ученые авторы. Авторы [4, 5] предлагают использование рационального соотношения загружаемых материалов, а именно изменение порядка формирования слоёв металлического лома в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи. В работах [6-12] представлены технологии заполнения рабочих пространств металлургических агрегатов, адаптированные к конкретным конструкциям и условиям выплавки стали. В теоретических исследованиях [13-18] предлагаются упрощенные методики и способы определения насыпной плотности шихтовых материалов при условии их равномерного распределения по рабочему пространству агрегата. Однако при наличии в составе шихтовых материалов крупногабаритных кусковых фрагментов существует высокая вероятность образования эффекта «кострения», даже после процедуры утрамбовки лома поверхностью загрузочной бадьи [19, 20].



Пилотажный эксперимент с использованием физической модели и теории подобия показал, что вероятность возникновения очагов «кострения» в рабочих пространствах металлургических агрегатов:

- с шихтой мелких размеров невысока и составляет от 0 до 0,2%;
- с шихтой средних размеров составляет от 0,5 до 1%;
- с шихтой, включающей фрагменты негабаритных размеров, составляет более 1,14% [20].

Таким образом, в настоящее время остаются актуальными проблемы, снижающие эффективность управления технологическим процессом выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи, такие как:

- отсутствие математических моделей, описывающих процесс движения шихтовых материалов между рабочими пространствами специального оснащения и металлургических агрегатов (совок – бадья – рабочее пространство дуговой сталеплавильной печи);
- отсутствие модулей человеко-машинных систем для интеллектуальной поддержки выбора электрического режима выплавки стали на стадиях подготовки и загрузки шихтовых материалов.

#### МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИИ ОБЪЕМНОЙ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В РАБОЧИХ ПРОСТРАНСТВАХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

Построение функции объемной насыпной плотности материалов в рабочих пространствах металлургических агрегатов базируются на исследованиях технологического процесса движения шихтовых материалов

между металлургическими агрегатами по инструкции [21] и результатах исследования модельных экспериментов [19, 20]. По результатам исследования построен комплекс методик для описания процесса перемещения фрагментов металлического лома между рабочими пространствами металлургических агрегатов (рис. 1). Комплекс включает две методики: методика имитационного моделирования перемещения материалов между рабочими объемами и их наполнения; методика определения объемной насыпной плотности шихтовых материалов в рабочем дуговой сталеплавильной печи.

На рис. 1 введены сокращения и обозначения: J1 – перекресток асинхронное «И», означающий, что все предшествующие процессы должны быть завершены; J7-J14 – перекрестки асинхронные «ИЛИ», означающий, что один или несколько предшествующих / следующих процессов должны быть завершены / запущены.

Методики основаны на процедурном принципе последовательного выполнения действий.

Выполнение первой методики из комплекса позволяет построить прямоугольную сетку (дискретность точек разбиения сетки – 1 мм), на плоскости сечения в которой размещаются объекты из библиотеки фрагментов шихтовых материалов [20] (рис. 2).

На рис. 2 введены сокращения и обозначения: 0 и 1 – возможные значения ячейки, определяющие наличие элементов шихтовых материалов в ячейке, где 0 – элемент фрагмента отсутствует, 1 – элемент фрагмента присутствует; X, Y, Z – оси декартовой системы координат.

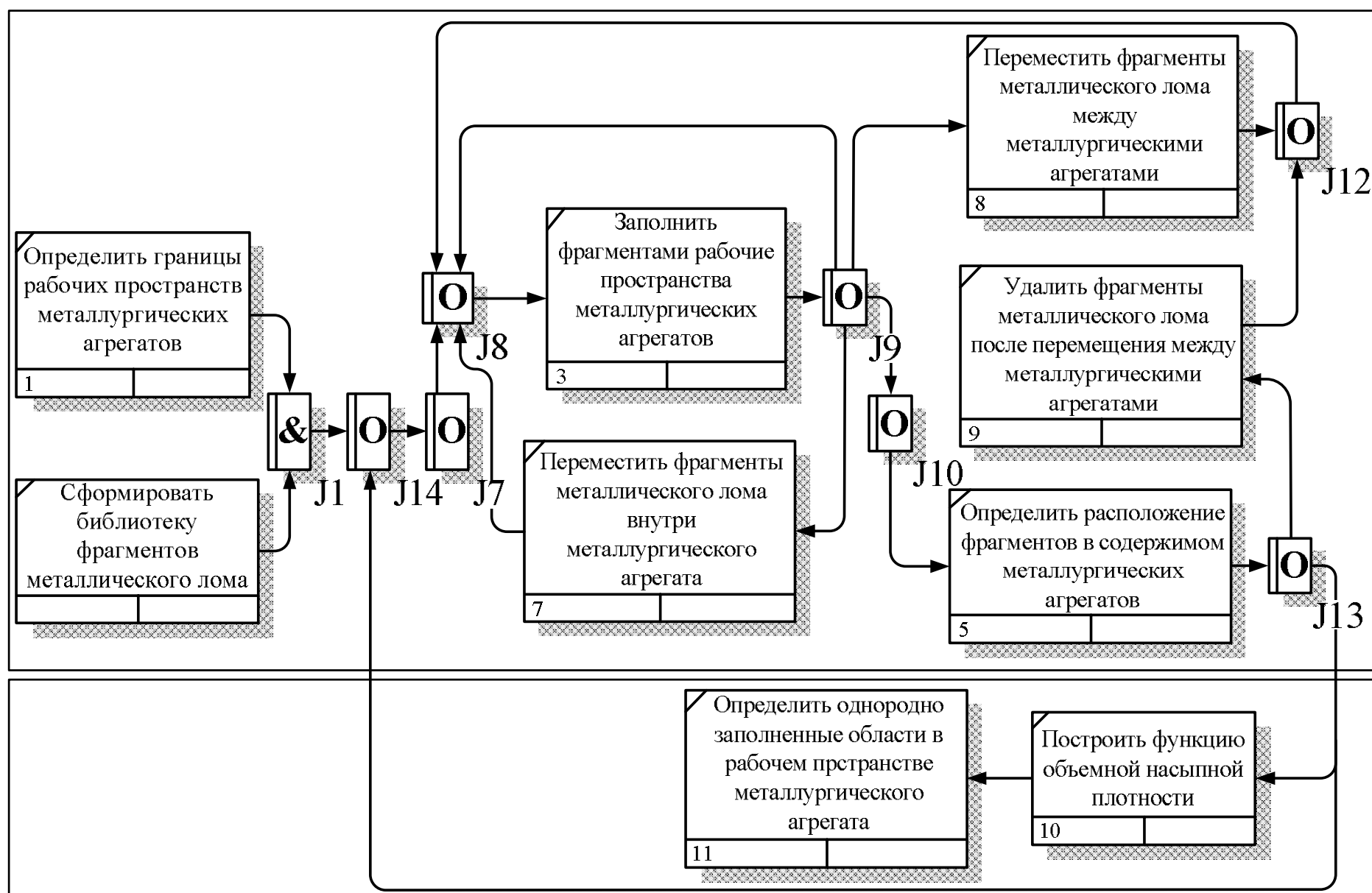
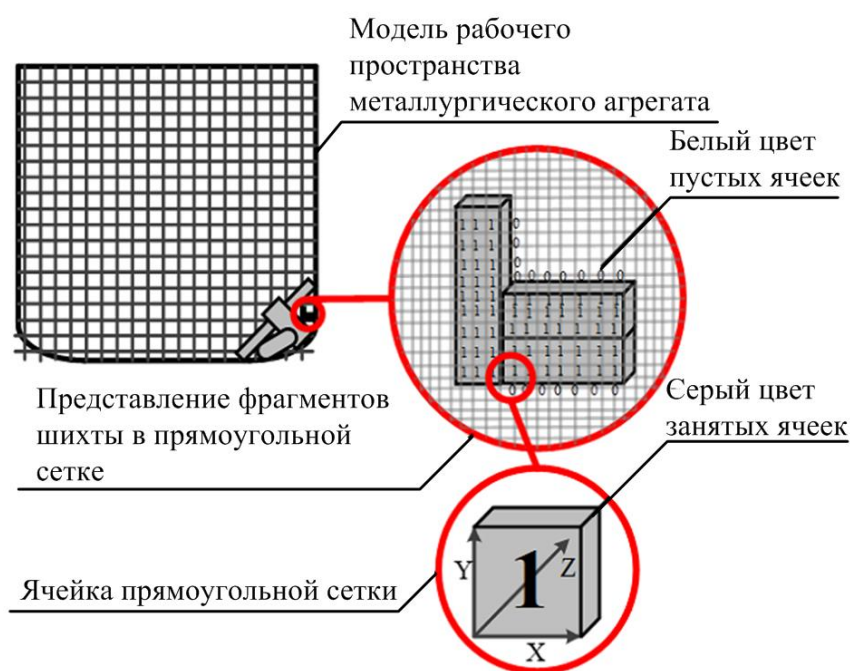


Рис. 1. Компоненты и взаимодействие методик для описания процесса перемещения фрагментов металлического лома между рабочими пространствами металлургических агрегатов



**Рис. 2. Компоненты и взаимодействие методик для описания процесса перемещения фрагментов металлического лома между рабочими пространствами металлургических агрегатов**

В рамках второй методики формируется функция объёмной насыпной плотности фрагментов металлического лома в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи, которая содержит следующие этапы:

1. Определить множество рабочих пространств металлургических агрегатов путём ввода переменной, характеризующей это множество

$$E = \{0, 1, 2\}, \quad (1)$$

где  $E$  – множество, характеризующее рабочие пространства металлургических агрегатов и специального оснащения; 0 – рабочее пространство оснащения – «совок»; 1 – рабочее пространство оснащения – «загрузочная бадья»; 2 – рабочее пространство металлургического агрегата – «дуговая сталеплавильная печь».

2. Определить рабочее пространство металлургических агрегатов из множества значений  $E$  по условиям:

$$V_m = \begin{cases} V_s, & \text{если } E = 0; \\ V_b, & \text{если } E = 1; \\ V_e, & \text{если } E = 2, \end{cases} \quad (2)$$

где  $V_m$  – выбранный объём рабочего пространства металлургического агрегата, мм<sup>3</sup>;  $V_s$  – объём рабочего пространства специального оснащения – «совок»;  $V_b$  – объём рабочего пространства специального оснащения – «загрузочная бадья»;  $V_e$  – объём рабочего пространства металлургического агрегата – «дуговая сталеплавильная печь».

3. Определить объёмы рабочих пространств металлургических агрегатов и специального оснащения.

3.1. Определить объём рабочего пространства специального оснащения «совок»:

$$V_s = (a_1 b_1 c_1) + (a_2 b_2 c_2), \quad (3)$$

где  $V_s$  – объём рабочего пространства специального оснащения «совок»;  $a_1 b_1 c_1$  и  $a_2 b_2 c_2$  – ребра параллелепипеда, из которых строится форма рабочего пространства специального оснащения «совок», мм.

3.2. Определить объём рабочего пространства специального оснащения «загрузочная бадья»:

$$V_b = \left( \pi r_1^2 \cdot h_1 \right) + \left( \pi r_2^2 \left( R - \frac{1}{3} h_2 \right) \right), \quad (4)$$

где  $V_b$  – объём рабочего пространства специального оснащения «загрузочная бадья»;  $r_1$  – радиус цилиндрической формы металлургического агрегата «загрузочная бадья», мм;  $h_1$  – высота цилиндрической формы специального оснащения «загрузочная бадья», мм;  $r_2$  – радиус шарообразной формы основания специального оснащения «загрузочная бадья», мм;  $h_2$  – высота шарового сегмента специального оснащения «загрузочная бадья», мм.

3.3. Определить объём рабочего пространства металлургического агрегата «дуговая сталеплавильная печь»:

$$V_e = \left( \pi r_3^2 \cdot h_3 \right) + \left( \pi r_4^2 \left( R - \frac{1}{3} h_4 \right) \right), \quad (5)$$

где  $V_e$  – объём рабочего пространства металлургического агрегата «дуговая сталеплавильная печь»;  $r_3$  – радиус цилиндрической формы металлургического агрегата «дуговая сталеплавильная печь», мм;  $h_3$  – высота цилиндрической формы металлургического агрегата «дуговая сталеплавильная печь», мм;  $r_4$  – радиус шарообразной формы основания металлургического агрегата «дуговая сталеплавильная печь», мм;  $h_4$  – высота шарового сегмента металлургического агрегата «дуговая сталеплавильная печь», мм.

4. Определить принадлежность каждой точки прямоугольной сетки разбиения рабочего пространства металлургического агрегата, после размещения в ней объектов библиотеки фрагментов металлического лома:

$$f(x, y, z) = \begin{cases} 0, & \text{пустая точка;} \\ 1, & \text{заполненная точка,} \end{cases} \quad (6)$$

где  $x, y, z$  – координаты каждой точки по сетке разбиения; 0, 1 – значения принадлежности каждой точки прямоугольной сетки разбиения рабочего пространства металлургического агрегата или специального оснащения.

Значения принадлежности каждой точки прямоугольной сетки разбиения рабочего пространства металлургического агрегата  $\{0, 1\}$  определяют цветовую гамму точки, где 0 – белый цвет для пустых ячеек, 1 – серый цвет для заполненных ячеек. Это позволит определить однородно заполненные области в рабочем пространстве металлургического агрегата.

5. Найти значения функции объёмной насыпной плотности материалов в рабочих пространствах металлургических агрегатов:

$$\rho(x, y, z) = \begin{cases} \rho_n, & \text{если } f(x, y, z) = 0; \\ \rho_z, & \text{если } f(x, y, z) = 1, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\rho$  – функция объёмной насыпной плотности материалов в рабочих пространствах;  $\rho_n$  – значение функции объёмной насыпной плотности, при наличии пустой точки прямоугольной сетки разбиения рабочего пространства;  $\rho_z$  – условие функции объёмной насыпной плотности, при наличии заполненной точки прямоугольной сетки разбиения рабочего пространства.

6. Рассчитать общее количество заполненных точек прямоугольной сетки разбиения рабочего пространства:

$$V_3 = \sum_{x=1}^{n_x} \sum_{y=1}^{n_y} \sum_{z=1}^{n_z} f(x, y, z), \quad (8)$$

где  $V_3$  – интегральная оценка наполненности объема рабочего пространства,  $\text{мм}^3$ ;  $n_x, n_y, n_z$  – максимальные значения точек прямоугольной сетки разбиения рабочего пространства по осям  $x, y, z$ ,  $\text{мм}$ .

7. Оценить насыпную плотность объектов библиотеки фрагментов металлического лома, размещенных в рабочем пространстве металлического агрегата, на предмет соответствия допустимых значений насыпной плотности:

$$\alpha V_M \leq V_c \leq \beta V_M, \quad (9)$$

где  $V_c$  – количество пустых точек прямоугольной сетки разбиения рабочего пространства металлургического агрегата;  $\alpha, \beta$  – настроечные коэффициенты насыпной плотности фрагментов металлического лома, соответствующие минимальным и максимальным границам, указанным в технологических инструкциях металлургических агрегатов.

8. Получить величину насыпной плотности фрагментов металлического лома, размещенных в рабочем пространстве:

$$A = 1 - \frac{V_M - V_3}{V_M}, \quad (10)$$

где  $A$  – интегральная характеристика функции объемной насыпной плотности.

Использование методики построения функции объемной насыпной плотности материалов в рабочих пространствах металлургических агрегатов позволяет выполнить подготовку исходных данных по насыпной

плотности фрагментов металлического лома, размещенных в рабочих пространствах металлургических агрегатов и специального оснащения для определения величины насыпной плотности фрагментов металлического лома, размещенных в рабочем пространстве металлического агрегата.

Исходные данные предназначены для дальнейшего использования в человеко-машинной системе при определении насыпной плотности шихтовых материалов дуговой сталеплавильной печи и отображения в SCADA АСУТП плавки для ДСП-180.

#### СЕМАФОРНАЯ СИСТЕМА МОДУЛЯ ДВИЖЕНИЯ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ НА SCADA АСУТП ПЛАВКИ ДСП-180

Существующая SCADA система АСУТП плавки в условиях ЭСПЦ ПАО «ММК» построена на семафорном принципе индикации текущего состояния технологических агрегатов. Информация по состоянию агрегатов формируется по событийной логике, представляющей собой последовательную цепочку событий, приводящую к выявлению нарушений технологических режимов. Анализ АСУТП Плавки ДСП-180 показал отсутствие измерений насыпной плотности и семафорной индикации значений насыпной плотности (рис. 3).

Проектируемое алгоритмическое обеспечение семафорной системы модуля движения шихтовых материалов предназначено для отображения величины насыпной плотности фрагментов металлического лома, размещенных в рабочем пространстве металлического агрегата и сопровождающего специального оснащения. Система позволит оператору принимать решения о загружаемых шихтовых материалах. Структура алгоритмического обеспечения семафорной системы модуля движения шихтовых материалов представлено на рис. 4. В таблице приведено описание блоков, представленных на рис. 4.

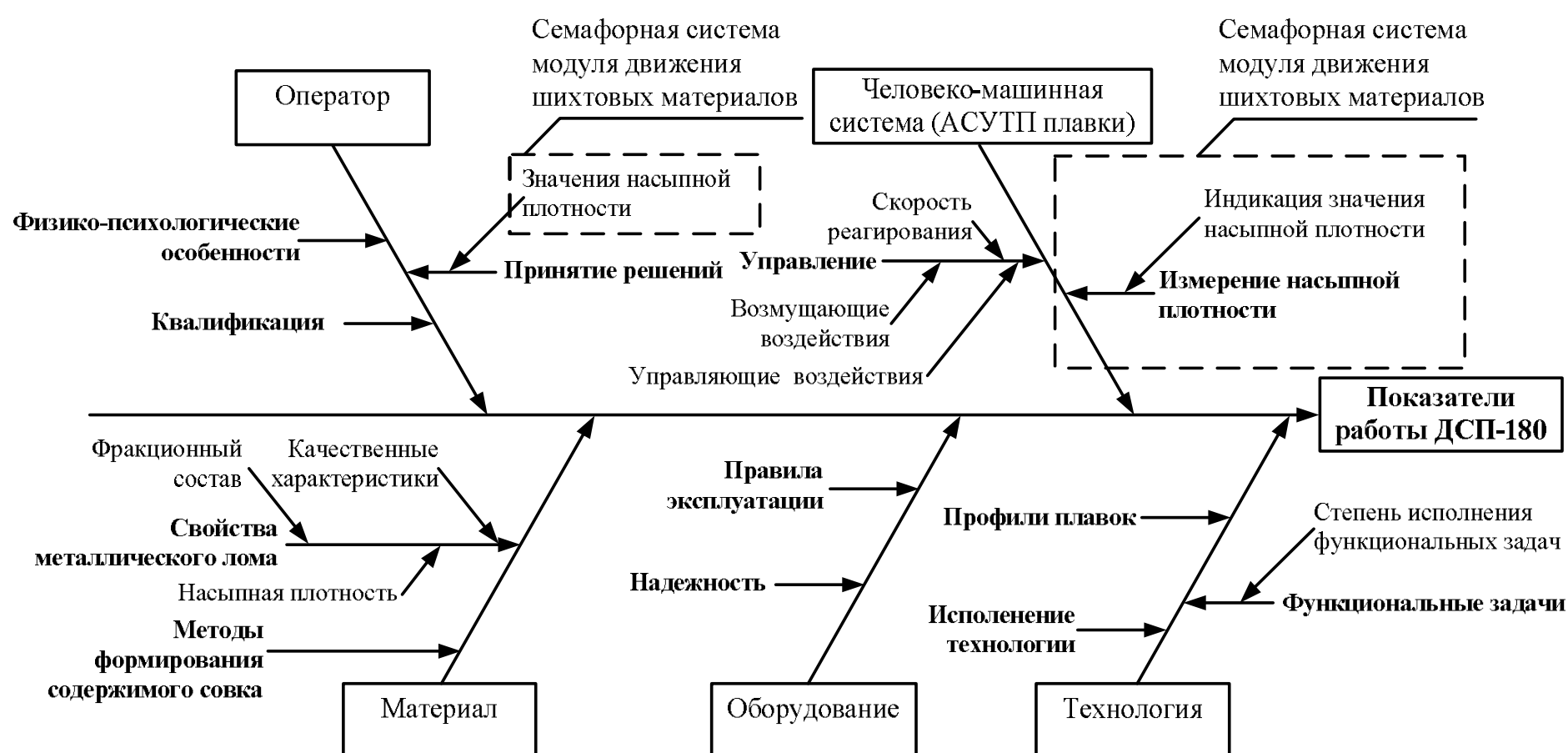
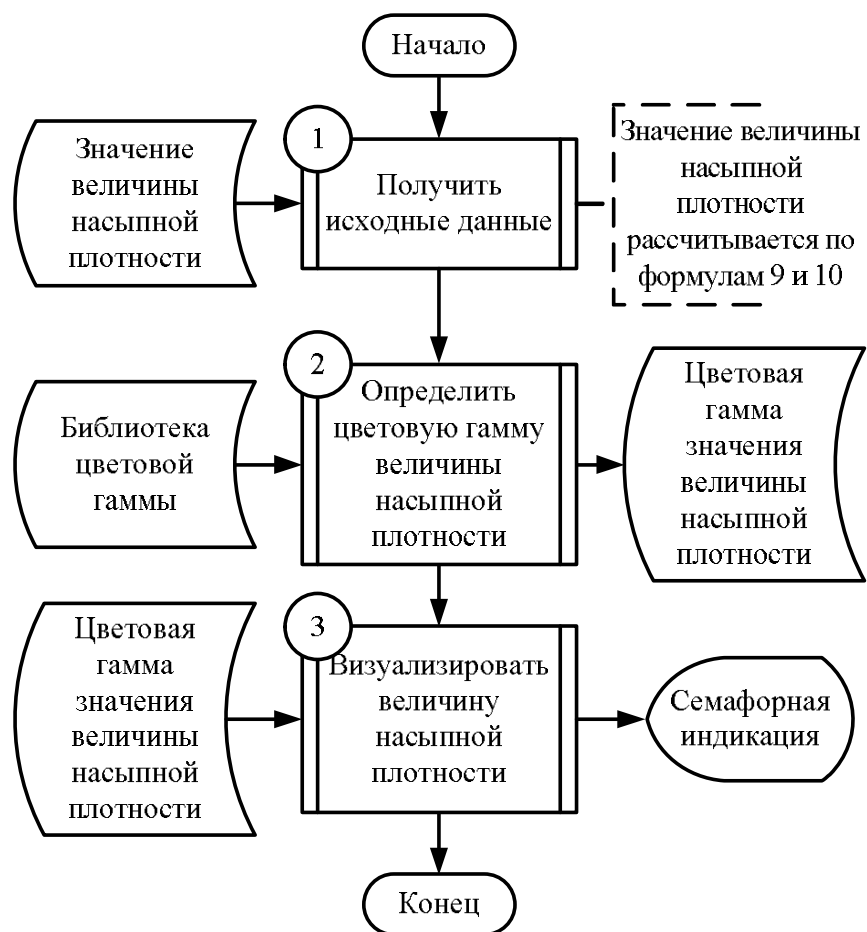


Рис. 3. Диаграмма влияния на показатели работы ДСП-180





**Рис. 4. Функциональная схема алгоритмического обеспечения семафорной системы модуля движения шихтовых материалов для отображения величины насыпной плотности фрагментов металлического лома на SCADA ACSUTP плавки ДСП-180**

**Описание последовательных шагов алгоритмического обеспечения семафорной системы**

Номер шага	Наименование шага	Описание шага
1	Получить исходные данные	Блок получения значения величины насыпной плотности, рассчитанные по формулам 9 и 10
2	Определить цветовую гамму величины насыпной плотности	Блок определения цветовой гаммы по величине насыпной плотности. Цветовая гамма величины насыпной плотности определяется по формуле (11).
3	Визуализировать величину насыпной плотности	Блок визуализации значения насыпной плотности с семафорной индикацией

Процедура определения цветовой гаммы величины насыпной плотности (11) основана на методике определения выхода значений за нормальные границы:

$$C = \begin{cases} 0, & \alpha \leq A \leq \beta, \text{ то зеленый и } Hi \text{ или } Lo; \\ 1, & A < \alpha, \text{ то красный и } LoLo; \\ 2, & > \beta, \text{ красный и } HiHi, \end{cases} \quad (11)$$

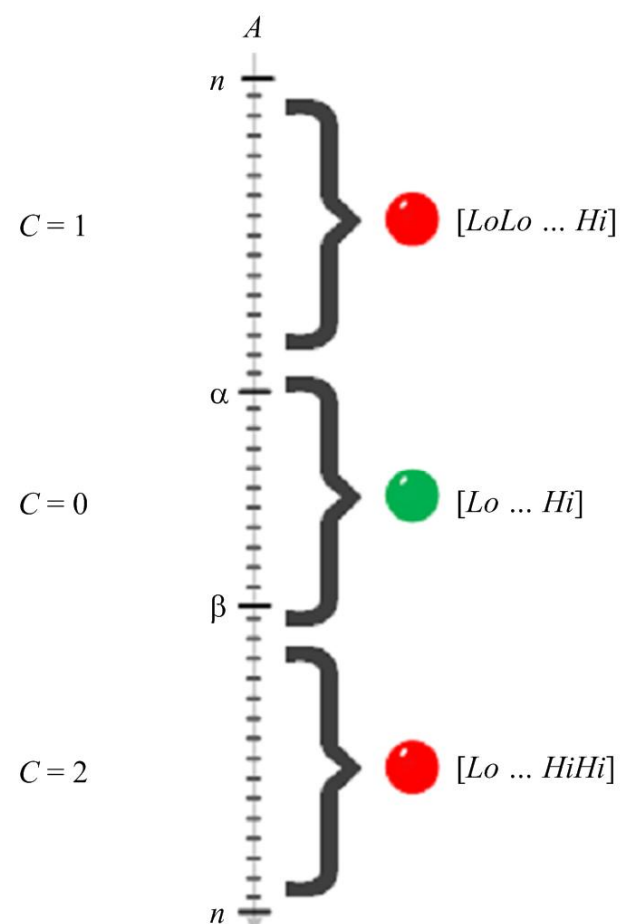
где  $C$  – переменная, характеризующая цветовую гамму величины насыпной плотности;  $HiHi$  – максимально допустимое значение величины насыпной плотности;  $LoLo$  – минимально допустимое значение величины насыпной плотности;  $Hi$  – максимально допустимый рабочий предел величины насыпной плотности;  $Lo$  – минимально допустимый рабочий предел величины насыпной плотности.

Схема цветового решения визуализации величины насыпной плотности представлена на рис. 5.

На рис. 5 введены сокращения и обозначения:  $HiHi$  – максимально допустимые величины насыпной плотности;  $LoLo$  – минимально допустимые величины насыпной плотности;  $Hi$  – максимально допустимый рабочий предел величины насыпной плотности;  $Lo$  – минимально допустимый рабочий предел величины насыпной плотности;  $n$  – предельные значения величины насыпной плотности;  $\alpha$ ,  $\beta$  – настроечные коэффициенты насыпной плотности фрагментов металлического лома, соответствующие минимальным и максимальным границам, указанным в технологических инструкциях металлургических агрегатов.

Согласно исследованиям, в ACSUTP Плавки ДСП-180 используется методика определения выхода значений за нормальные границы, поэтому принято решение использовать этот подход для семафорной системы модуля системы модуля движения шихтовых материалов. Эскиз главного окна модуля движения шихтовых материалов с обозначенной системой представлен на рис. 6.

На рис. 6 введены сокращения и обозначения: ЗБ – загрузочная бадья; ДСП – дуговая сталеплавильная печь;  $\rho$  – насыпная плотность;  $\alpha$ ,  $\beta$  – настроечные коэффициенты насыпной плотности фрагментов металлического лома, соответствующие минимальным и максимальным границам, указанным в технологических инструкциях металлургических агрегатов.



**Рис. 5. Схема цветового решения визуализации величины насыпной плотности**



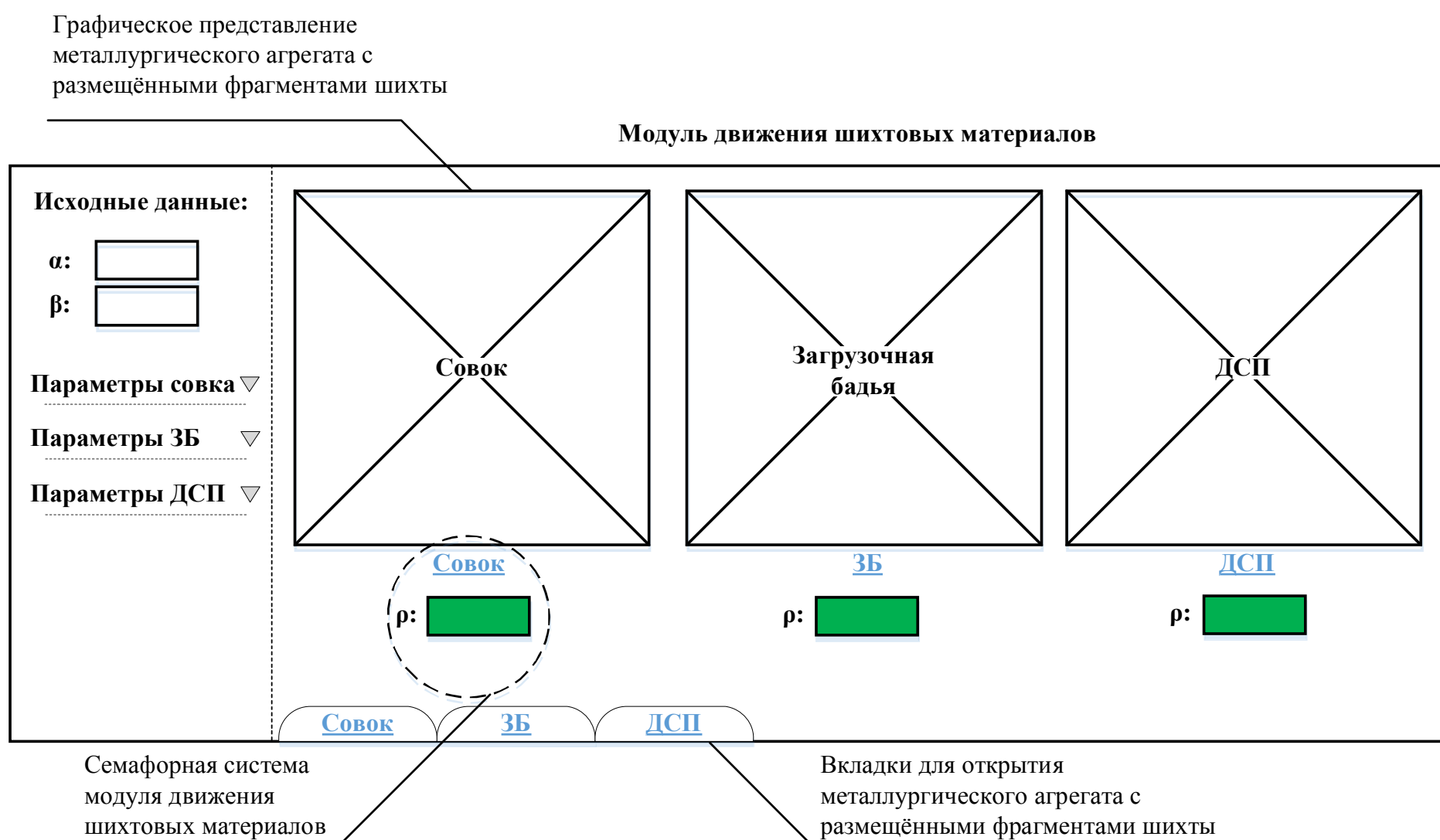


Рис. 6. Эскиз главного окна модуля движения шихтовых материалов

## Выводы

1. Анализ существующих исследований в области интеллектуализации принятия решений при оценке насыпной плотности материалов показал наличие упрощенных методик, которые не учитывают флуктуации плотности наполнения рабочего пространства агрегатов и специального оснащения.

2. На основе анализа процесса движения шихтовых материалов между рабочими пространствами металлургических агрегатов и специального оснащения создана методика построения функции объёмной насыпной плотности материалов в рабочих пространствах металлургических агрегатов и определения интегральной оценки для использования в семафорной системе визуализации в рамках АСУ ТП дуговой сталеплавильной печи.

3. Результаты исследования предназначены при построении модулей человеко-машинных систем для интеллектуальной поддержки выбора электрического режима выплавки стали на стадиях подготовки и загрузки шихтовых материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логунова О.С. Технология исследования информационных потоков на металлургическом предприятии // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2008. № 3. С. 32-36.
2. Николаев А.А. Разработка усовершенствованной методики выбора мощности статического тиристорного компенсатора дуговой сталеплавильной печи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 3. С. 74-94.
3. Варианты построения системы автоматического регулирования распределения долей энергетических ресурсов в дуговых печах / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Шулепов П.А., Петухова О.И. // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 4 (37). С. 32-37.

4. Электрометаллургия стали и ферросплавов / Поволоцкий Д.Я., Рощин В.Е., Рысс М.А. и др. М.: Металлургия, 1974. 551 с.
5. Кудрин В. А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов. М.: Мир; ООО «Издательство АСТ», 2003. 528 с.
6. Macchietto S. (2003) Dynamic Model Development: Methods. Theory and Applications, Elsevier Science, pp. 115-118.
7. Пат. 2552805 Российская Федерация, МПК C21C5/52. Способ выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи и устройство для его осуществления / Сосонкин О.М., Герцык С.И., Шишимиров М.В.; заявитель ФГБОУ ВПО «МГВМИ»; заявл. 23.05.2011; опубл. 10.04.2013.
8. Пат. 2478720 Российская Федерация, МПК C21C5/52. Способ выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи и устройство для его осуществления / Сосонкин О.М., Герцык С.И., Шишимиров М.В.; заявитель ФГБОУ ВПО «МГВМИ»; заявл. 23.05.2011; опубл. 10.04.2013.
9. Пат. 2552807 Российская Федерация, МПК C22B1/248. Способ подогрева металлического скрапа / Савин А.В., Никольский В.Е.; заявитель ФГБОУ ВПО «МГВМИ»; заявл. 18.04.2011; опубл. 05.05.2013.
10. Сазонов К.Е. Модельный эксперимент в океанологии. СПб: РГГМУ, 2011. 93 с.
11. Miller James George, Harding Robert, Michos Demetrius, Pryor James Neil. Zeolite particles for adsorption and/or desorption of gases and liquids. Patent US, no. 54288368, 2017.
12. Hashida Takashi, Yamada Muneto. Scale inhibitor, scale-inhibiting device using the same, and scale-inhibiting system. Patent US, no. 55063877, 2017.
13. Маслов Д.В. Разработка алгоритмов и систем управления дуговыми сталеплавильными печами, снижающих поломки электродов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / Маслов Дмитрий Владимирович. Москва, 2014.
14. Мордасов Д.М., Мордасов М.М. Технические измерения плотности сыпучих материалов: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 80 с.
15. Bulk and Tapped Density [Электронный ресурс]. Analyses

for the Pharmaceutical Industry. Режим доступа: <http://www.particle.dk/methods-analytical-laboratory/> (дата обращения: 01.10.2018).

16. Ишметьев Е.Н. Расчет насыпной плотности стального металлолома в совках для скрапа с использованием трехмерной камеры / Е.Н. Ишметьев, Д.В. Чистяков, А.Н. Панов, Е.Э. Бодров, Д.В. Рабаджи // Черные металлы. 2017. № 4. С. 22-28.
17. Dalmaz G., Dowson D., Priest M., Lubrecht A. (2001) Tribology Research: From Model Experiment to Industrial Problem. Elsevier Science, pp. 556-600.
18. Philippe Hendrickx, Mathieu Brochu. (2017) Process-structure-property relationships of the comminution processing

of Al scrap. Powder Technology, vol. 320, pp. 202-212.

19. Влияние фракционного состава металлолома на показатели работы дуговой сталеплавильной печи / Павлов В.В., Ивин Ю.А., Пехтерев С.В., Мацко И.И., Логунова О.С. // Электromеталлургия. 2011. № 11. С. 2-6.
20. Влияние фракционности металлического лома на вероятность возникновения очагов «кострения» в ДСП / Ошурков В.А., Логунова О.С., Павлов В.В., Чистяков Д.В., Панов А.Н., Щebleва Ю.В. // Сталь. 2017. №9. С. 14-20.
21. ТИ 101-СТ-ЭСЦ-64 Технологическая инструкция «Выплавка стали в электропечах». Магнитогорск, 2012. 44 с.

Поступила в редакцию 27 декабря 2018 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### METHOD OF METAL SCRAP FRAGMENTS FUNCTION CONSTRUCTION OF THE POURED BULK DENSITY IN AN ELECTRIC ARC FURNACE

Vyacheslav A. Oshurkov

Postgraduate Student, Computer Engineering and Software Engineering Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: oshurkov92@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9529-646X>

Lyudmila G. Egorova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Computer Engineering and Software Engineering Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: egorov-lyudmil@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8763-9653>.

Anatoly V. Lednov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Computer Engineering and Software Engineering Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: vt-pm@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7614-0534>.

Ilya D. Antipanov

Student, Computer Engineering and Software Engineering Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ilyaantipanov@mail.ru.

The task of this work is to form the function of the poured bulk density of metal scrap fragments in melting facilities workspace. The object of research is the electric arc furnace (EAF). The subject of research is simulation process modeling of material charging into the electric arc furnace. The research was carried out in laboratory of Nosov Magnitogorsk State Technical University and Magnitogorsk Iron and Steel Works. The methods of systems analysis, cause-and-effect analytic and empirical investigation were applied. In this paper, the description of the group the techniques of metal scrap fragments function construction of the poured bulk density in melting facilities workspace were applied; the description of the technique of the simulation process modeling of material charging technique; the description of metal scrap fragments function construction of the poured bulk density in the electric arc furnace; the description of the algorithm of mechanically worked semaphore signaling to visualize the poured bulk density of metal scrap fragments in melting facilities workspace on the SCADA system at MMK arc-furnace shop. The results of function construction of metal scrap fragments poured bulk density in melting facilities workspace (the bulk density value and properties of metal scrap fragments of melting facilities workspaces) are supposed to be used to create the metal scrap flow simulation modeling system. The metal scrap flow simulation modeling system will help decision making of the scrap fragments dimensions in electric arc furnace.

**Keywords:** poured bulk density, metal scrap, electric arc furnace, modeling technique, melting facilities, the poured bulk density of metal scrap.

## REFERENCES

1. Logunova O.S. Technology of data flow research at a metallurgical plant. *Informacionnye tehnologii v proektirovanii i proizvodstve* [Information technology in design and manufacture]. 2008, no.3, pp. 32-36. (In Russian)
2. Nikolaev A.A. Development of the improved method for the choice of the static var compensator of an electric arc furnace. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol.15, no.3, pp. 74-94. (In Russian)
3. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Shulepov P.A., Petuhova O.I. Different variants of design of the system of automatic control of power resource distribution in arc furnaces. *Jelektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2017, no.4(37), pp. 32-37. (In Russian)
4. Povolockij D.Ja., Roshhin V.E., Ryss M.A. and others *Jelektrometallurgija stali i ferrosplavov* [Electrometallurgy of steel and ferroalloys]. Moscow: Metallurgy, 1974. 551 p. (In Russian)
5. Kudrin V. A. *Teoriya i tehnologija proizvodstva stali* [Theory and technology of steel production]: Textbook for Universities. Moscow: «Mir», «ACT Publishing», 2003. 528 p. (In Russian)
6. Macchietto S. (2003) Dynamic Model Development: Methods. Theory and Applications, Elsevier Science, pp. 115-118.
7. Sosonkin O.M., Gercyk S.I., Shishimirov M.V. *Sposob vyplavki stali v dugovoj staleplavilnoj pechi i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija* [Method of steel production in an electric arc steel-making furnace]. Patent RF, no. 2552805, 2013.

8. Sosonkin O.M., Gercyk S.I., Shishimirov M.V. *Sposob vyplavki stali v dugovoj staleplavilnoj pechi i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija* [Method of steel production in an electric arc steel-making furnace]. Patent RF, no. 2478720, 2013.
9. Savin A.V., Nikolskij V.E. *Sposob podogreva metallicheskogo skrapa* [Method of metal scrap heating]. Patent RF, no. 2552807, 2013.
10. Sazonov K.E. *Modelnyj jeksperiment v okeanologii* [Simulation experiment in ocean science]. St. Petersburg: RGGMU, 2011. 93 p. (In Russian)
11. Miller James George, Harding Robert, Michos Demetrius, Pryor James Neil. Zeolite particles for adsorption and/or desorption of gases and liquids. Patent US, no. 54288368, 2017.
12. Hashida Takashi, Yamada Muneto. Scale inhibitor, scale-inhibiting device using the same, and scale-inhibiting system. Patent US, no. 55063877, 2017.
13. Maslov D.V. *Razrabotka algoritmov i sistem upravlenija dugovymi staleplavilnymi pechami, snizhajushhih polomki jelektrodov: Kand. Diss.* [Development of algorithms and control systems for electric arc steel-making furnaces to decrease the number of electrode breakdowns. Ph.D. Diss.] Moscow, 2014.
14. Mordasov D.M., Mordasov M.M. *Tekhnicheskie izmerenija plotnosti sypuchih materialov* [Technical measurement of bulk material density]: textbook. Tambov: Publishing center of Tambov State Technical University, 2004. 80 p. (In Russian)
15. Bulk and Tapped Density. Analyses for the Pharmaceutical Industry. Access mode: <http://www.particle.dk/methods-analytical-laboratory/> (access date: 01.10.2018).
16. Ishmetiev E.N. Calculation of bulk density of steel scrap in scrap baskets using a 3D camera / E.N. Ishmetiev, D.V. Chistjakov, A.N. Panov, E.Je. Bodrov, D.V. Rabadzhi. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2017, no. 4, pp. 22-28. (In Russian)
17. Dalmaz G., Dowson D., Priest M., Lubrecht A. (2001) *Tribology Research: From Model Experiment to Industrial Problem*. Elsevier Science, pp. 556-600.
18. Philippe Hendrickx, Mathieu Brochu. (2017) Process-structure-property relationships of the comminution processing of Al scrap. *Powder Technology*, vol. 320, pp. 202-212.
19. Pavlov V.V., Ivin Ju.A., Pehterev S.V., Macko I.I., Logunova O.S. Influence of fraction composition of metal scrap on operating parameters of the electric arc steel-making furnace. *Jelektrometallurgija* [Electrometallurgy]. 2011, no. 11, pp. 2-6. (In Russian)
20. Oshurkov V.A., Logunova O.S., Pavlov V.V., Chistjakov D.V., Panov A.N., Shhebleva Ju.V. Influence of fraction composition of scrap on development of flames in EAF. *Stal* [Steel]. 2017, no. 9, pp. 14-20.
21. TI 101-ST-JeSPC-64 Process instruction «Steel making in electric furnaces». Magnitogorsk, 2012. 44 p.

Ошурков В.А., Егорова Л.Г., Леднов А.В., Антипанов И.Д. Человеко-машинная система насыпной плотности шихтовых материалов дуговой сталеплавильной печи: функция объёмной насыпной плотности и семфорная система // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 1(42). С. 59-66. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-59-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-59-66)

Oshurkov V.A., Egorova L.G., Lednov A.V., Antipanov I.D. Method of Metal Scrap Fragments Function Construction of the Poured Bulk Density in an Electric Arc Furnace. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 59-66. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-59-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-59-66)

## ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

УДК 681.527

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-67-73](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-67-73)Ишметьев Е.Н.<sup>1,2</sup>, Чистяков Д.В.<sup>1,2</sup>, Панов А.Н.<sup>1,2</sup>, Бодров Е.Э.<sup>2</sup>, Вrabел М.<sup>3</sup><sup>1</sup> ЗАО «Консом СКС»<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова<sup>3</sup> ООО «ИФМ-электроник»

## СИСТЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ, ВИБРОКОНТРОЛЯ И ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Работа посвящена обзору основных технических решений по разработке мобильных и стационарных систем виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики промышленного оборудования по величине и характеру вибрации, реализуемых компанией ЗАО «Консом СКС». Проведен анализ разработанных и известных в литературе автоматизированных систем диагностики технического состояния электродвигателей, их опорных подшипников, а также промышленных агрегатов, в том числе систем, построенных по принципу анализа вибрации контролируемого механизма. Показано, что при возникновении и развитии дефекта вибрационная картина, наблюдаемая на элементе агрегата, содержащего дефект, изменяется. При этом меняется как общий уровень вибрации, так и амплитуда вибрации на определенных частотах, характерных для конкретного дефекта оборудования. Эти частоты определяются конструкцией, геометрическими и электрическими параметрами объекта. На мониторинге и анализе таких характерных частот основаны автоматизированные системы вибрационной диагностики, разрабатываемые компанией ЗАО «Консом СКС». Системы же виброзащиты и виброконтроля основаны на мониторинге общего уровня вибрации оборудования. Автоматизированные системы вибродиагностики являются наивысшей степенью развития систем мониторинга технического состояния технологического оборудования. Такие системы могут диагностировать дефекты подшипников качения или скольжения, электродвигателей постоянного или переменного тока, редукторов, соединительных муфт, валопроводов и других агрегатов. В работе также приведен обзор аппаратных средств, на основе которых возможно гибкое построение автоматизированной системы виброзащиты, виброконтроля или вибродиагностики в зависимости от требований к самой системе и к контролируемому объекту.

**Ключевые слова:** виброзащита, виброконтроль, вибродиагностика, подшипник, электрический двигатель, мониторинг, акселерометр, умный датчик, световая колонна, направленный микрофон, вибрация, спектральный анализ.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений компании ЗАО «Консом СКС» является диагностика технического состояния промышленного оборудования, включающего подшипники качения и скольжения, электродвигатели постоянного и переменного тока, редукторы, соединительные муфты, валопроводы. В технической литературе описано множество систем мониторинга и диагностики технического состояния технологических агрегатов [1-14]. Дефекты, возникающие в процессе работы промышленного оборудования, возможно диагностировать по величине и характеру вибрации. Любое промышленное оборудование, даже находясь в нормальном рабочем состоянии, подвержено вибрации. При возникновении и развитии дефекта вибрационная картина, наблюдаемая на элементе агрегата, содержащего очаг дефекта, изменяется. При этом меняется как общий уровень вибрации, так и амплитуда вибрации на определенных частотах, характерных для конкретного дефекта оборудования. На мониторинге общего уровня вибрации и характерных частот и основаны методики виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики, разработанные специалистами компании ЗАО «Консом СКС» [15].

### ВИБРОЗАЩИТА

Методика защиты оборудования при превышении на нем общего уровня вибрации больше определенного

значения предполагает отключение оборудования в автоматическом режиме с целью предотвращения риска аварии (**рис. 1**). На невращающихся частях агрегата (на подшипниках) устанавливаются датчики вибрации (акселерометры), которые подключены к электронному диагностическому прибору, который при увеличении вибрации больше допустимого уровня производит защитное отключение электродвигателя агрегата от сети питания.

В качестве характеристики общего уровня вибрации агрегата может быть использовано среднеквадратичное значение виброускорения, виброскорости или виброперемещения [16]. Это связано с тем, что среднеквадратичное значение любой из этих трех вибрационных величин характеризует энергию вибрации. Иными словами, среднеквадратичное значение вибрационного параметра прямо пропорционально разрушающей силе вибрации оборудования. Соответственно по увеличению среднеквадратичного значения вибрации можно спрогнозировать и предотвратить поломку оборудования своевременным его отключением. Однако после остановки агрегата обнаружить причину и место возникновения дефекта возможно только традиционным способом – разобрать агрегат и визуально найти элемент оборудования с дефектом. Это является основным ограничением как виброзащиты, так и виброконтроля, определяющим область применения данных методик на оборудовании не слишком критичном к отключению, например, в связи с наличием резервного агрегата, включаемого на время ремонта основного.





Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы виброзащиты

Для мониторинга общего уровня вибрации в равной степени могут быть использованы среднеквадратичное значение виброускорения, виброскорости, а также виброперемещения. Однако в ГОСТ [17] регламентируется только среднеквадратичное значение виброскорости.

Поэтому при построении автоматизированных систем виброзащиты и виброконтроля используется именно значение виброскорости.

Кроме того, при появлении и развитии дефекта в оборудовании (например, дефекты подшипников качения или скольжения) температура узла, в котором образовался дефект, начинает расти. Поэтому в дополнение к датчикам вибрации на подшипниковые опоры необходимо также устанавливать датчики температуры для увеличения информативности данных.

#### ВИБРОКОНТРОЛЬ

Так же как и в системе виброзащиты, автоматизированные системы виброконтроля, разрабатываемые ЗАО «Консом СКС», используют регламентированные ГОСТ среднеквадратичные значения виброскорости для мониторинга и контроля технического состояния оборудования. Однако здесь, в отличие от систем виброзащиты, данные о вибрации и температуре подшипников и других узлов и агрегатов, на которых установлены датчики вибрации (акселерометры), выводятся в виде мнемосхемы оператору, осуществляющему мониторинг технологического процесса (рис. 2).

На мнемосхеме параметры вибрации и температуры отображаются по принципу светофора:

- зеленый цвет означает нормальный режим функционирования оборудования;
- желтый цвет означает «Предупреждение»;
- красный цвет означает «Опасность», что говорит о критическом состоянии оборудования и требует принятия соответствующих мер.

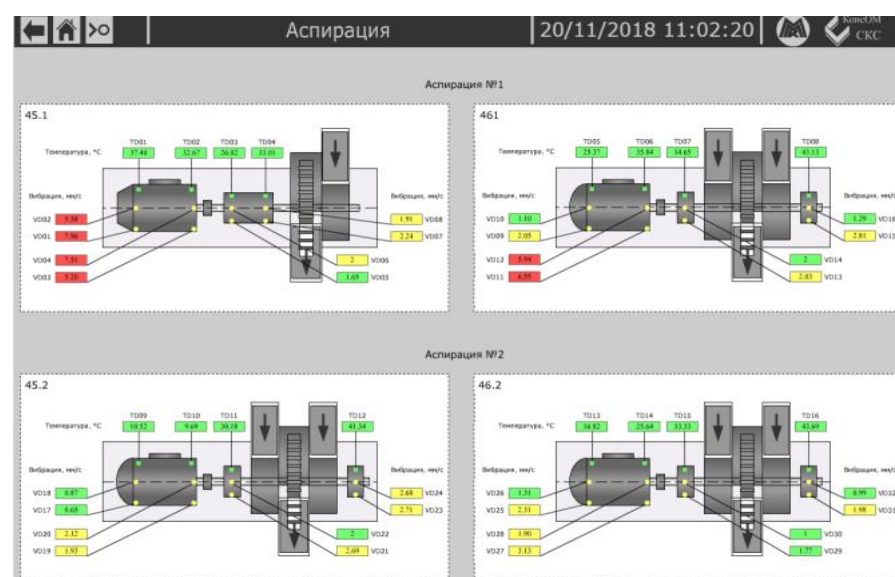


Рис. 2. Мнемосхема автоматизированной системы виброконтроля дымососов, установленных на аспирации горно-обогатительного предприятия

При переключении на мнемосхеме индикаторов с зеленого на желтый или красный ответственный за эксплуатацию оборудования принимает решение о необходимости и целесообразности его остановки.

Альтернативным решением вывода информации о вибрационном состоянии оборудования является использование вместо мнемосхемы светодиодной световой колонны DV1510 производства компании «ifm electronics», внешний вид которой приведен на рис. 3. Световая колонна состоит из пяти сегментов, каждый из которых настраивается по отдельности и может загораться одним из семи основных цветов. Таким образом для небольших объектов возможно настроить до пяти точек контроля на одну лампу, светящихся также по принципу светофора [18].

Для низковольтных асинхронных электродвигателей предлагается решение, основанное на использовании малогабаритного беспроводного умного датчика АВВ (рис. 4) [19].

Основные преимущества интеллектуального датчика заключаются в том, что он автономно осуществляет контроль за состоянием электродвигателя; обладает возможностью двустороннего обмена данными, самодиагностики, калибровки; имеет встроенный элемент питания, рассчитанный на срок эксплуатации, равный пяти годам; обмен данными осуществляется по беспроводному протоколу Bluetooth.

Датчик является миниатюрным и имеет габариты 90×55×12 мм. Он устанавливается на охлаждающие ребра электродвигателя и конфигурируется со смартфона или планшета. Данный датчик также обладает защитой от использования неавторизованными пользователями. Датчик имеет три встроенных акселерометра, расположенных ортогонально друг к другу, и термометр. Анализ данных, полученных с умного датчика, происходит с использованием облачных технологий. Информация шифруется и затем передается на защищенный сервер в облако через смартфон или планшет. Работа сервера полностью соответствует политике компьютерной безопасности.

Информация обрабатывается на сервере и в любой момент может быть получена посредством смартфона, планшета или рабочего компьютера любым пользователем, имеющим разрешенный доступ к этой информации. Рассматриваемый интеллектуальный датчик является автономным. Он может быть установлен на ребра охлаждения корпуса электродвигателя без непосредственного подключения к нему.





Рис. 3. Внешний вид 5-сегментной световой колонны



Рис. 4. Использование умного датчика ABB для мониторинга состояния асинхронного электродвигателя

По умолчанию датчик осуществляет измерения каждый час. При необходимости интервал измерений можно настроить. Датчик имеет встроенную память, рассчитанную на хранение измерений за один месяц, при условии выполнения измерений каждый час. Таким образом, один раз в месяц обслуживающий персонал должен сделать обход всех двигателей, на которых установлены интеллектуальные датчики, имея при себе смартфон или планшет с необходимым программным обеспечением. При этом данные с датчика передаются на облачный сервер, где происходит их обработка и анализ.

Интеллектуальный датчик выдает данные о таких параметрах электродвигателя, как:

- температура корпуса электродвигателя;
- индикация состояния подшипников;
- вибрация (общий уровень, мм/с).

Эти данные отображаются на экране смартфона, собирающего информацию с датчика, или смартфона, планшета или рабочего компьютера, подключенного

посредством Интернета к облаку. Информация о состоянии электродвигателя имеет вид, показанный на рис. 5. Диагностическая информация также может быть представлена в виде тренда, как показано на рис. 6.

Еще одним способом вибрационного контроля является использование направленного микрофона USB Noise Meter компании Spl-Lab, внешний вид которого показан на рис. 7 [20].

Направленный микрофон (шумомер) USB Noise Meter предназначен для измерения уровня шума, уровня звукового давления и амплитудно-частотной характеристики с повышенной точностью на всем слышимом диапазоне от 20 Гц до 20 кГц. Источником измеряемого сигнала могут быть как промышленное оборудование, так и акустические системы. Шумомер имеет широкий динамический диапазон измеряемого сигнала в 70 дБ и высокий предельный уровень звукового давления в 150 дБ. Измеряемый сигнал оцифровывается внутри прибора и передается через USB-порт на персональный компьютер, планшет или телефон с операционной системой Android в цифровом виде.

На основе такого направленного микрофона может быть изготовлена стационарная или переносная система виброконтроля. На рис. 8 приведен снимок экрана специализированного программного обеспечения Measuring Center, поставляемого вместе с микрофоном. Программное обеспечение Measuring Center представляет из себя многофункциональный измерительный центр для спектрального анализа звука.

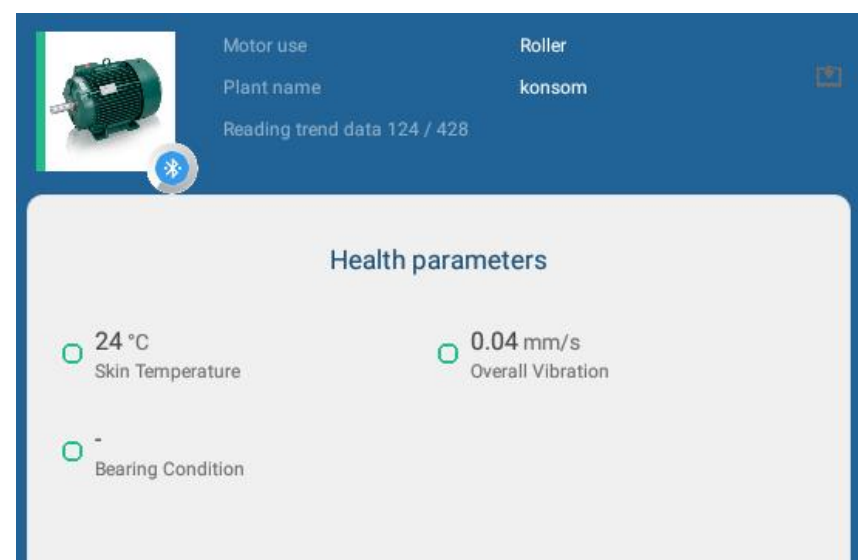


Рис. 5. Диагностическая информация, отображаемая на экране смартфона

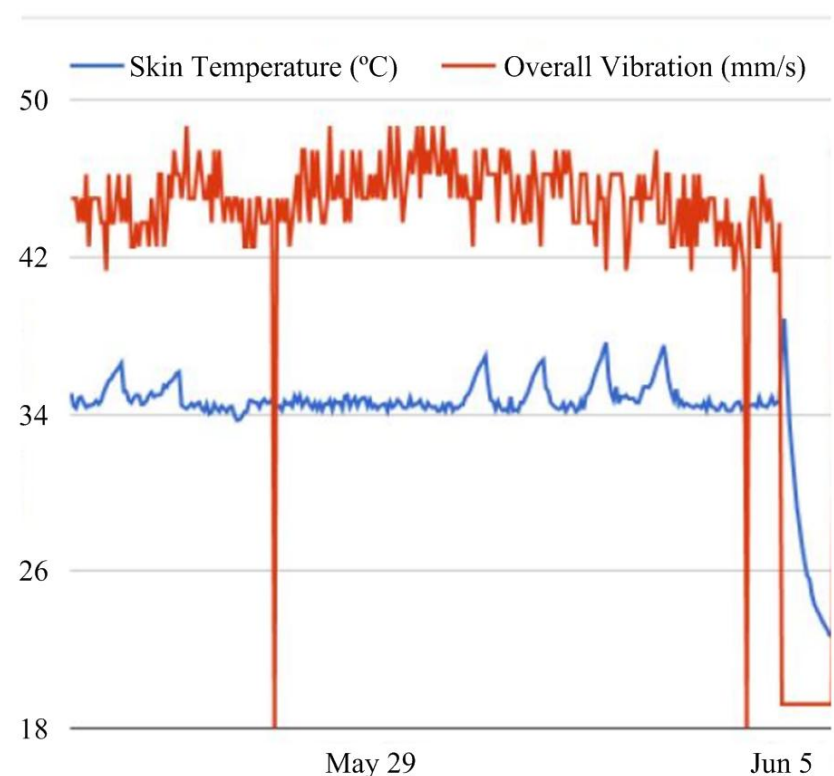


Рис. 6. Тренд вибрации и температуры корпуса двигателя



Рис. 7. Внешний вид направленного микрофона Spl-Lab USB Noise Meter



Рис. 8. Программа Measuring Center для работы с микрофоном Spl-Lab USB Noise Meter

ВИБРОДИАГНОСТИКА

Автоматизированная система вибродиагностики является наиболее развитым и сложным методом мониторинга и диагностики дефектов промышленного оборудования по его вибрации. В основе такой системы лежит одновременный анализ временных сигналов и спектров вибрации. Анализ производится в автоматическом режиме на основании измерений, записываемых, как правило, один раз в сутки и сохраняемых в базе данных.

В качестве аппаратных средств для стационарной автоматизированной системы вибродиагностики, разработанной специалистами ЗАО «Консом СКС», используются акселерометры VSA001 производства ifm electronics, которые подключаются к электронным диагностическим приборам VSE002 также производства «ifm electronics» (см. рис. 1). Измеряемые данные передаются на сервер. Визуализация диагностических данных осуществляется посредством специализированного программного обеспечения «Эверест», которое позволяет просматривать данные удалено с помощью интернет-браузера.

Основной страницей специализированного программного обеспечения «Эверест», предоставляющей пользователю диагностическую информацию об объекте мониторинга, является страница «Аналитика», внешний вид которой приведен на рис. 9.

- Страница «Аналитика» разделена на четыре колонки:
- Просмотр событий.
  - Тренд дефектов.
  - Пик-фактор.
  - Орбита/Зазор.

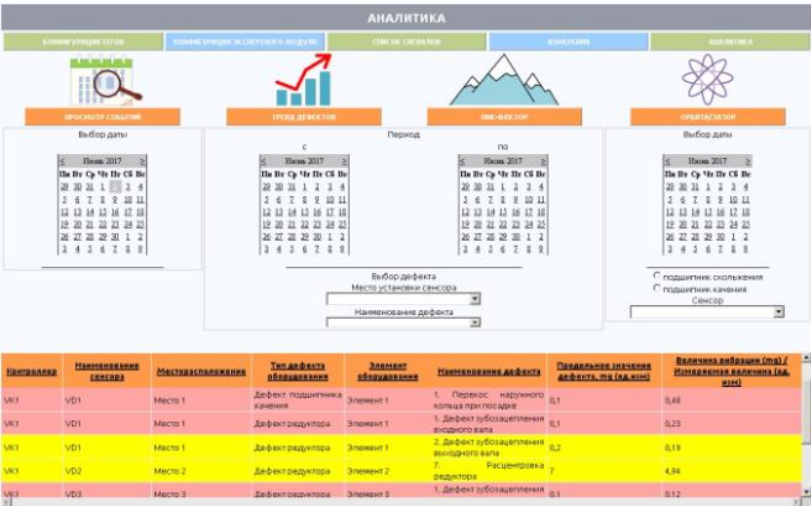


Рис. 9. Основная страница автоматизированной системы вибродиагностики

Вкладка «просмотр» событий предоставляет диагностическую информацию о дефектах оборудования в виде таблицы под названием «Журнал событий». Желтая строка в таблице означает «Предупреждение», красная строка означает – «Опасность», что говорит о критическом состоянии оборудования и требует принятия соответствующих мер. Система, в зависимости от оборудования, на котором она установлена, может быть настроена на распознавание необходимых типов дефектов, полный перечень которых приведен в таблице.

Типы дефектов и соответствующие им наименования дефектов оборудования

Тип дефекта (в зависимости от элемента оборудования)	Наименования дефекта
1. Дефект подшипника качения	1. Перекос наружного кольца при посадке
	2. Неоднородный радиальный натяг
	3. Проскальзывание в посадочном месте
	4. Ослабление крепления подшипника
	5. Задевания в подшипнике и уплотнениях
	6. Обкатывание наружного кольца
	7. Проблемы смазки
	8. Увеличенные зазоры в подшипнике
	9. Износ поверхности наружного кольца
	10. Износ поверхности тел качения
	11. Износ поверхности внутреннего кольца
	12. Дефект группы поверхностей трения
	13. Раковины (сколы) на наружном кольце
	14. Раковины (сколы) на внутреннем кольце
	15. Раковины (сколы) на телах качения
	16. Дефект сепаратора
2. Дефект подшипника скольжения	1. Увеличенный зазор в подшипнике
	2. Дефект шейки вала
	3. Дефект вкладышей
	4. Дефект установки вкладышей
	5. Эллипсность шейки вала
	6. Вибрации масляного клина
3. Дефект редуктора	1. Дефект зубозацепления входного вала
	2. Дефект зубозацепления выходного вала
	3. Износ зубчатой пары входного вала
	4. Износ зубчатой пары выходного вала
	5. Эксцентриситет шестерни входного вала
	6. Эксцентриситет шестерни выходного вала
	7. Расцентровка редуктора
	8. Треснутый (сломанный зуб) на входном валу
	9. Треснутый (сломанный зуб) на выходном валу
4. Дисбаланс и несоосность	1. Дисбаланс валов
	2. Осевая несоосность сочлененных валов
	3. Угловая несоосность сочлененных валов
	4. Дефект и дисбаланс муфт
	5. Дисбаланс и дефекты лопаток вентиляторов
5. Дефект крепления к фундаменту	Ослабление крепления «лапы» двигателя или редуктора
6. Дефект электродвигателей	1. Дефект статора асинхронного/синхронного двигателя
	2. Дефект ротора асинхронного двигателя (обрыв стержня, эксцентриситет)
	3. Дефект обмоток якоря двигателя постоянного тока



Автоматизированная система вибродиагностики позволяет также строить тренд выбранного дефекта оборудования, график пик-фактора, график орбиты вала (в случае подшипника скольжения), измерять радиальный зазор в подшипнике (в случае подшипника качения), а также просматривать любые сигналы, как временные, так и спектры (прямой спектр и спектр огибающей), в режиме online в широком диапазоне частот. Кроме того, система позволяет делать необходимые измерения вручную, сохранять их и удалять. Все предоставляемые системой функции делают ее мощным и гибким средством вибрационной диагностики в руках специалиста.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены основные типы систем оценки технического состояния оборудования по его вибрационной картине. Показано, что при возникновении и развитии дефектов в оборудовании, будь то подшипники качения или скольжения, электродвигатели постоянного или переменного тока, редукторы, соединительные муфты, валопроводы, вибрационная картина агрегата или узла изменяется. Поэтому принцип построения автоматизированных систем виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики основан на регистрации изменений в вибрационной картине, будь то увеличение среднеквадратичного значения вибрации или увеличение вибрации на определенных частотах, характерных для различных дефектов оборудования. В работе приведен обзор аппаратных средств, на основе которых возможно гибкое построение автоматизированной системы виброзащиты, виброконтроля или вибродиагностики в зависимости от требований к самой системе или контролируемому объекту.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / С.И. Лукьянов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, В.Р. Храмышин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 129-136.
2. M. Byrtus, J. Sobra, M. Krizek, T. Kavalir, V. Kindl, K. Hruska. Dynamic load of induction machine due to rotor's eccentricity and bearing clearance. 18th European Conference on Power Electronics and Applications, 2016, DOI: 10.1109/EPE.2016.7695684.
3. R. Mistry; B. Finley; S. Kreitzer; R. Queen. Influencing factors on motor vibration & rotor critical speed in design, test and field applications. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2014, DOI: 10.1109/PCICon.2014.6961887.
4. Орлов А.В. Вибрация в радиальном роликовом подшипнике, вызываемая износом // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 4. С. 63-69.
5. Степанов П.И., Лагуткин С.В., Никитин Ю.Р. Комплекс-

ная токовая и вибродиагностика электромеханических систем // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 2 (22). С. 160-165.

6. Леонтьев М.К., Снеткова Е.И., Дегтярев С.А. Динамика неуравновешенного ротора на роликовом подшипнике // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 1. С. 95-105.
7. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие. СПб.: СПбГМУ, 2004. 156 с.
8. Adams M.L. Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting. 2nd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
9. Zhanlu Yang, Shanming Wang, Jianfeng Hong, Jingsong Li. Analysis of electromagnetic exciting force and vibration of rotating armature permanent magnet synchronous motor // The Journal of Engineering. 2018, no.17, pp. 1903–1908.
10. Xiaowang Chen, Zhipeng Feng. Time-Frequency Analysis of Torsional Vibration Signals in Resonance Region for Planetary Gearbox Fault Diagnosis Under Variable Speed Conditions // IEEE Access. 2017, vol. 5, pp. 21918–21926.
11. Yumei Liu, Ningguo Qiao, Congcong Zhao, Jiaojiao Zhuang. Vibration Signal Prediction of Gearbox in High-Speed Train Based on Monitoring Data // IEEE Access. 2018, vol. 6, pp. 50709–50719.
12. Salman Abdi, Danilo Llano, Ehsan Abdi, Paul Malliband, Richard McMahon. Experimental analysis of noise and vibration for large brushless doubly fed machines // The Journal of Engineering. 2017, no.13, pp. 724–728.
13. Zhiqiang Huo, Yu Zhang, Pierre Francq, Lei Shu, Jianfeng Huang. Incipient Fault Diagnosis of Roller Bearing Using Optimized Wavelet Transform Based Multi-Speed Vibration Signatures // IEEE Access. 2017, vol. 5, pp. 19442–19456.
14. Dong Wang, Kwok-Leung Tsui, Qiang Miao. Prognostics and Health Management: A Review of Vibration Based Bearing and Gear Health Indicators // IEEE Access. 2018, vol. 6, pp. 665–676.
15. Ishmetyev E.N., Logunova O.S., Panov A.N., Cistyakov D.V., Bodrov E.E. Stationary automatic vibration control and analysis systems: application experience. Journal of Computational and Engineering Mathematics, 2017, vol.4, no. 1, pp. 3-15.
16. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2005. Т. 7. Кн. 2. 829 с.
17. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 1. Общие требования. Минск: ИПК Издательство стандартов, 1998. 16 с.
18. Operating instructions. 5-segment signal lamp DV15x0, DV25x0, 2018. 22 p.
19. Возможность применения интеллектуального датчика для диагностирования состояния электродвигателя / А.Н. Панов, Е.Э. Бодров, С.И. Бодрова, В.О. Михеева, А.А. Лысенко // Автоматизированные технологии и производства. 2018. № 1(17). С. 14-17.
20. USB Noise Meter (Pro Edition) – конденсаторный микрофон для замера АЧХ и уровня шума [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://spl-lab.ru/ru/products/microphones/usb-noise-meter-pro-edition.html> (дата обращения: 10.12.2018).

Поступила в редакцию 16 января 2019 г.



## VIBRATION PROTECTION, CONTROL AND ANALYSIS SYSTEMS FOR INDUSTRIAL APPLICATION

Evgeniy N. Ishmetiev

D.Sc. (Engineering), Director of Strategic Development, CJSC “KonsOM SKS”, Magnitogorsk, Russia. E-mail: eni@konsom.ru.

Dmitry V. Chistyakov

Ph.D. (Social Sciences), Executive Director, CJSC “KonsOM SKS”, Magnitogorsk, Russia. E-mail: dvc@konsom.ru.

Aleksandr N. Panov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Innovation, CJSC “KonsOM SKS”, Magnitogorsk, Russia. E-mail: panov.a@konsom.ru.

Evgeniy E. Bodrov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fortheartist@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-8213>.

Mikhal Vrabel

Sales Director, "IFM-electronics", Moscow, Russia. E-mail: michal.vrabel@ifm.com.

This paper describes basic CJSC “Konsom SKS” technical solutions overview for industrial equipment vibration protection, control and analysis systems, which can be mobile or stationary, and measure object vibration to determine its condition. The research group carried out analysis of known similar systems for diagnostics of electric motors, bearings and other units including those systems that use mechanism vibration analysis. It was shown that when the defect occurs in some part of the equipment, the vibration pattern there is changed. And not only overall vibration increases but also the vibration on specific frequencies is characteristic for a particular defect. Those frequencies depend on geometric and electric parameters of the mechanism. The automated vibration analysis systems developed by CJSC “Konsom SKS” are based on monitoring and analysis of those frequencies. On the other hand, vibration protection and vibration control systems are based on monitoring of the mechanism overall vibration. The automated vibration analysis systems are high end monitoring systems. These systems can diagnose defects in a roller or a sliding bearing, an AC or DC electric motor, gearbox, coupling, shaft etc. The paper also shows an overview of firmware that could be used interchangeably in vibration protection, vibration control and vibration analysis systems depending on the application.

**Keywords:** vibration protection, vibration control, vibration analysis, bearing, electric motor, monitoring, accelerometer, smart sensor, signal lamp, noise meter, vibration, spectral analysis.

## REFERENCES

1. Lukyanov S.I., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Ju., Khramshin V.R. Development and implementation of intelligent systems for diagnosing the technical condition of electrical equipment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol.16, no. 4, pp. 129-136. (In Russian)
2. M. Byrtus, J. Sobra, M. Krizek, T. Kavalir, V. Kindl, K. Hruska. Dynamic load of induction machine due to rotor's eccentricity and bearing clearance. 18th European Conference on Power Electronics and Applications, 2016. DOI: 10.1109/EPE.2016.7695684.
3. R. Mistry; B. Finley; S. Kreitzer; R. Queen. *Influencing factors on motor vibration & rotor critical speed in design, test and field applications*. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2014. DOI: 10.1109/PCIcon.2014.6961887.
4. Orlov A.V. Vibration in the radial roller bearing due to worn. *Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], 2013, no. 4, pp. 63-69. (In Russian)
5. Stepanov P.I., Lagutkin S.V., Nikitin Ju.R. Integrated current and vibration diagnostics of electromechanical systems. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], 2013, no. 2(22), pp. 160-165. (In Russian)
6. Leont'ev M.K., Snetkova E.I., Degtarev S.A. Dynamics of unbalanced rotor on a roller bearing. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta* [Bulletin of Moscow Aircraft Institute], 2013, vol. 20, no. 1, pp. 95-105. (In Russian)
7. Barkov A.V., Barkova N.A. *Vibracionnaja diagnostika mashin i oborudovanija. Analiz vibracii* [Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis]. St. Petersburg, Spbgmtu Publ., 2004. 156 p. (In Russian)
8. Adams M.L. *Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting*. 2nd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
9. Zhanlu Yang, Shanming Wang, Jianfeng Hong, Jingsong Li. Analysis of electromagnetic exciting force and vibration of rotating armature permanent magnet synchronous motor. *The Journal of Engineering*. 2018. no.17 pp. 1903–1908.
10. Xiaowang Chen, Zhipeng Feng. Time-Frequency Analysis of Torsional Vibration Signals in Resonance Region for Planetary Gearbox Fault Diagnosis Under Variable Speed Conditions. *IEEE Access*. 2017, vol. 5, pp. 21918–21926.
11. Yumei Liu, Ningguo Qiao, Congcong Zhao, Jiaojiao Zhuang. Vibration Signal Prediction of Gearbox in High-Speed Train Based on Monitoring Data. *IEEE Access*. 2018, Vol. 6, pp. 50709–50719.
12. Salman Abdi, Danilo Llano, Ehsan Abdi, Paul Malliband, Richard McMahon. Experimental analysis of noise and vibration for large brushless doubly fed machines. *The Journal of Engineering*. 2017, no. 13, pp. 724–728.
13. Zhiqiang Huo, Yu Zhang, Pierre Francq, Lei Shu, Jianfeng Huang. Incipient Fault Diagnosis of Roller Bearing Using Optimized Wavelet Transform Based Multi-Speed Vibration Signatures. *IEEE Access*. 2017, vol. 5. pp. 19442–19456.
14. Dong Wang, Kwok-Leung Tsui, Qiang Miao. Prognostics and Health Management: A Review of Vibration Based Bearing and Gear Health Indicators. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6, pp. 665–676.

15. Ishmetyev E.N., Logunova O.S., Panov A.N., Cistyakov D.V., Bodrov E.E. Stationary automatic vibration control and analysis systems: application experience. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, 2017, vol.4, no. 1, pp. 3-15.
16. *Nerazrushajushhij kontrol* [Nondestructive Inspection]. reference guide in 7 vol. under edition of V.V. Kluev, vol. 7, book 2. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2005. 829 p. (In Russian)
17. GOST ISO 10816-1-97. Vibration. Monitoring the state of the machines as measured by vibration on non-rotating parts. Part 1. General requirements. Minsk, IPK Publishing house of standards, 1998. 16 p. (in Russian)
18. Operating instructions. 5-segment signal lamp DV15x0, DV25x0, 2018. 22 p.
19. Panov A.N., Bodrov E.E., Bodrova S.I., Miheeva V.O., Lysenko A.A. The possibility of using an intelligent sensor to diagnose the state of the electric motor. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automated technology and production], 2018, no. 1(17), pp. 14-17. (In Russian)
20. USB Noise Meter (Pro Edition) – condenser microphone for measuring the frequency response and noise level [Electronic resource]. Available at: <http://spl-lab.ru/ru/products/microphones/usb-noise-meter-pro-edition.html>.

Ишметьев Е.Н. Чистяков Д.В. Панов А.Н. Бодров Е.Э., Врabel М. Системы виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики промышленного оборудования // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 1(42). С. 67-73. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-67-73](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-67-73)

Ishmetiev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E., Vrabel M. Vibration Protection, Control and Analysis Systems for Industrial Application. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 67-73. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-67-73](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-67-73)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Абдулвелеев Ильдар Равильевич** – старший преподаватель, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, институт энергетики и автоматизированных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: leggyild@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2748-6533>.

**Абдулвелеева Рауза Рашитовна** – канд. пед. наук, доцент, кафедра электроэнергетики и электротехники, факультет металлургических технологий, Новотроицкий филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС», г. Новотроицк, Россия.

**Антипанов Илья Дмитриевич** – студент, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [ilyaantipanov@mail.ru](mailto:ilyaantipanov@mail.ru).

**Богданов Дмитрий Юрьевич** – ассистент, кафедра электроснабжения и электропривода, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия. E-mail: [Bogdanov\\_dmitr@mail.ru](mailto:Bogdanov_dmitr@mail.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7851-6045>.

**Бойков Андрей Игоревич** – ассистент, кафедра электропривода, факультет автоматизации и информатики, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия. E-mail: [aboikov2013@gmail.com](mailto:aboikov2013@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0032-0683>.

**Бодров Евгений Эдуардович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроники и микроэлектроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [fortheartist@mail.ru](mailto:fortheartist@mail.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-8213>.

**Врабел Михал** – директор по продажам, «ИФМ-электроник», г. Москва, Россия. E-mail: [michal.vrabel@ifm.com](mailto:michal.vrabel@ifm.com).

**Дубина Ирина Алексеевна** – старший преподаватель, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

**Егорова Людмила Геннадьевна** – канд. техн. наук, доцент, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [egorov-lyudmil@yandex.ru](mailto:egorov-lyudmil@yandex.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8763-9653>.

**Ермолаев Артем Игоревич** – аспирант, кафедра электрооборудования, электропривода и автоматики, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: [acidwolfvx@rambler.ru](mailto:acidwolfvx@rambler.ru).

**Зюзов Анатолий Михайлович** – д-р техн. наук, профессор, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: [a.m.zyuzev@urfu.ru](mailto:a.m.zyuzev@urfu.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>.

**Ирихов Александр Сергеевич** – студент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [irihovalexandr@gmail.com](mailto:irihovalexandr@gmail.com).

**Ишметьев Евгений Николаевич** – д-р техн. наук, директор по стратегическому развитию, ЗАО «Консом СКС», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [eni@konsom.ru](mailto:eni@konsom.ru).

**Косматов Валерий Иванович** – канд. техн. наук, профессор, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

**Кравченко Олег Александрович** – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра электроснабжения и электропривода, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия. E-mail: [mvk346428@gmail.com](mailto:mvk346428@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2974-448X>.

**Корнилов Геннадий Петрович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, институт энергетики и автоматизированных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

**Ласточкин Денис Владимирович** – аспирант, кафедра электропривода, факультет автоматизации и информатики, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия. E-mail: [kaf-er@stu.lipetsk.ru](mailto:kaf-er@stu.lipetsk.ru).

**Леднов Анатолий Викторович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [vt-pm@magtu.ru](mailto:vt-pm@magtu.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7614-0534>.

**Маклаков Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, кафедра мехатроники и автоматизации, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: [maklakov.work@gmail.com](mailto:maklakov.work@gmail.com).

**Метельков Владимир Павлович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: [v.p.metelkov@urfu.ru](mailto:v.p.metelkov@urfu.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5640-1637>.

**Мещеряков Виктор Николаевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра электропривода, факультет автоматизации и информатики, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия. E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>.

**Ошурков Вячеслав Александрович** – аспирант, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: oshurkov92@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9529-646X>.

**Паздерин Андрей Владимирович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: a.v.pazderin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4826-2387>.

**Панов Александр Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, начальник отдела инновационных разработок, ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: panov.a@konsom.ru.

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

**Патшин Николай Трофимович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

**Плехов Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электрооборудования, электропривода и автоматики, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: aplehov@mail.ru.

**Радионов Андрей Александрович** – д-р техн. наук, профессор, кафедра мехатроники и автоматизации, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: RadionovAA@rambler.ru.

**Титов Дмитрий Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электрооборудования, электропривода и автоматики, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: d.titov@nntu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7320-984X>.

**Храмшин Тимур Рифхатович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, институт энергетики и автоматизированных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

**Цзин Тао** – аспирант, кафедра мехатроники и автоматизации, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия.

**Чернов Евгений Александрович** – д-р техн. наук, профессор, кафедра электрооборудования, электропривода и автоматики, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: evgenij.chernov.41@list.ru.

**Черных Илья Викторович** – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра техники высоких напряжений, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: i.v.chernykh@urfu.ru.

**Чистяков Дмитрий Владимирович** – канд. социол. наук, исполнительный директор, ЗАО «Консом СКС», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: dvc@konsom.ru.

**Чусовитин Павел Валерьевич** – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: pvchus@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5885-4821>.

**Шабалин Григорий Сергеевич** – инженер первой категории, старший преподаватель, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: g.s.shabalin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0776-011X>.



## **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](http://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.