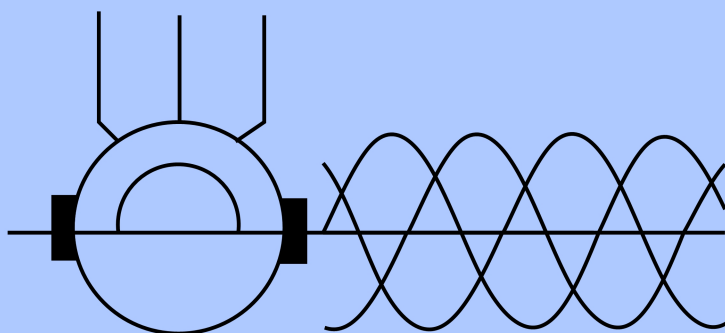
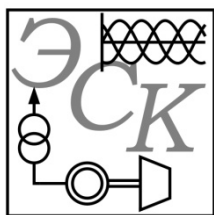


Электротехнические Системы и Комплексы





ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 2(39), ИЮНЬ 2018

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

Редакционная коллегия

Председатель редакционной коллегии:

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

Главный редактор:

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

Ответственный редактор:

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

Секция теории и практики автоматизированного электропривода:

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

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

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

Секция электро- и теплоэнергетики:

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

Е.Б. 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, гл. энергетик
ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

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

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

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

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

Секция электротехнологий в промышленности:

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

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

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

Секция мониторинга, контроля и диагностики электрооборудования:

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

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

Технические редакторы:

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

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

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2018

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

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

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

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:

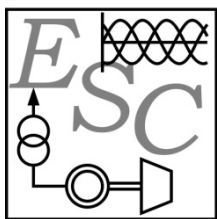
455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, д. 38. ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Журнал подготовлен к печати издательским центром
МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, Челябинская обл.,
г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

e-mail: ecis.red@gmail.com

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова,
455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выход в свет 25.06.2018. Заказ 243. Тираж 500 экз. Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 2(39) JUNE, 2018

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

Editorial Board

Head of the Editorial Board:

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

Editor in Chief:

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

Executive Editor:

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

Secton of Theory and Practice of Automated Electric Drive:

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

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

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

Secton of Power Engineerign:

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

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

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

Secton of Energy- and Resources-Economy:

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

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

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

Secton of Electric Power Supply:

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

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

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

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

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

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

Secton of Industrial Electro Technology:

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

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

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

Secton of Monitoring, Diagnostics and Control of Electric Equipment:

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

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

Technical Editors:

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

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

© FSBEI HE NMSTU, 2018

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

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

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

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:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
The Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University
Prepared for the publication by the NMSTU publishing center,
38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia
e-mail: ecis.red@gmail.com

Printed by the NMSTU printing section,
38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk, 455000, Russia.
Publication date: 25.06.2018. Order 243. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	4
<i>Зюзов А.М., Метельков В.П.</i> Двухканальная термодинамическая модель асинхронного двигателя для систем тепловой защиты.....	4
<i>Косматов В.И., Сарваров А.С., Данилов Е.И.</i> Исследование нагрузочных режимов электроприводов с асинхронным двигателем с двумя обмотками на статоре	12
ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА.....	18
<i>Поляков И.Д., Паздерин А.В.</i> Обзор подходов к трехфазному оцениванию состояния распределительных сетей	18
<i>Варганова А.В., Панова Е.А., Хатюшина Т.В., Кононенко В.С., Багаева Х.М.</i> Разработка базы данных электрооборудования 35-220 кВ для САПР «ОРУ CAD»	28
<i>Газизова О.В., Алляров А.А., Кондрашова Ю.Н., Патшин Н.Т.</i> Определение границ динамической устойчивости генераторов промышленной электростанции с учетом двигательной нагрузки.....	34
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	42
<i>Верзунов С.Н., Бочкарев И.В.</i> Разработка программного компонента трассоискателя на базе устройства сбора данных Л КАРД E502	42
<i>Гетопанов А.Ю., Табаров Б.Д., Климаш В.С.</i> Исследование регулировочных свойств и влияния на сеть реакторно-тиристорного устройства на высокой стороне печного трансформатора	49
<i>Панов А.Н., Бодров Е.Э., Бодрова С.И., Михеева В.О.</i> Использование эталонного измерения пустого совка при расчете объема металлолома в нем с помощью 3D-камер	57
ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	63
<i>Парсункин Б.Н., Васильев М.И., Сибилева Н.С.</i> Энергосберегающее автоматическое нечеткое управление давлением в рабочем пространстве нагревательных печей	63
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	70
<i>Соколова Е.М., Мощинский Ю.А., Шумов К.В.</i> Линейный генератор с постоянными магнитами в схеме электрического амортизатора.....	70
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	75

CONTENT

THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE.....	4
<i>Ziuzev A.M., Metelkov V.P.</i> Two-Channel Thermodynamic Model of the Induction Motor for the Heat Protection System	4
<i>Kosmatov V.I., Sarvarov A.S., Danilov E.I.</i> Investigation of the Operating Modes of Electric Drives with an Induction Motor with Two Stator Windings	12
ELECTRIC POWER SUPPLY	18
<i>Polyakov I.D., Pazderin A.V.</i> A Review on Three-Phase State Estimation Approaches of Distribution Networks.....	18
<i>Varganova A.V., Panova E.A., Khatushina T.V., Kononenko V.S., Bagaeva K.M.</i> Development of Electrical Equipment Database of 35-220 kV for "ORU CAD".....	28
<i>Gazizova O.V., Allayarov A.A., Kondrashova Yu.N., Patshin N.T.</i> Definition of Boundaries Of The Dynamic Stability of Generators at Industrial Power Plant Taking Into Account Motor Load.....	34
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS	42
<i>Verzunov S.N., Bochkarev I.V.</i> Development of Program Component of the Cable Tracer Based on the Device for the Data Acquisition Board L CARD E502.....	42
<i>Getopanov A.Yu., Tabarov B.D., Klimash V.S.</i> Investigation of Regulation Properties and Influence of the Reactor-Thyristor Device on the Network on the High-Voltage Side of the Furnace Transformer.....	49
<i>Panov A.N., Bodrov E.E., Bodrova S.I., Mikheeva V.O.</i> Using Reference Measurement of an Empty Chute when Calculating the Volume of Scrap Metal in it by means of 3D Camera	57
ENERGY- AND RESOURCES-ECONOMY.....	63
<i>Parsunkin B.N., Vasiliev M.I., Sibileva N.S.</i> Energy Efficient Fuzzy Pressure Control in the Working Space of Heating Furnaces	63
INDUSTRIAL ELECTRO TECHNOLOGY	70
<i>Moshhinskij J.A., Sokolova E.M., Shumov K.V.</i> Linear Generator with Permanent Magnets in the Electric Shock Absorber Circuit.....	70
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	75

ДВУХКАНАЛЬНАЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ

В статье изложен подход к построению системы тепловой защиты асинхронного двигателя на основе разделения термодинамических процессов на быстрые и медленные. Обоснована структура двухканальной термодинамической модели, в которой реализован этот принцип разделения процессов, получено математическое описание такой модели. Преимуществом предлагаемого подхода является небольшой объем исходных данных, необходимых для параметрирования системы тепловой защиты. Предлагаемый вариант системы тепловой защиты использует двухмассовую термодинамическую модель двигателя для вычисления превышения температуры обмотки статора над температурой окружающей среды, при этом обеспечивая более простое решение проблемы задания начальных условий для запуска в работу системы защиты после перерыва, чем системы контроля теплового состояния электродвигателя, использующие традиционные тепловые модели. Рассмотрены вопросы определения параметров предлагаемой двухканальной термодинамической модели. Приведены значения постоянных времени быстрого и медленного каналов модели для асинхронных двигателей закрытого исполнения различной мощности. Изложен подход к учету влияния изменения скорости на охлаждение двигателя. Проанализировано влияние погрешности, возникающей при переходе от исходной термодинамической модели (двухмассовой модели традиционного типа) к модели, преобразованной к двухканальному варианту. Описан алгоритм работы системы тепловой защиты на основе двухканальной модели для ситуаций медленного возрастания температуры и для кратковременной сильной перегрузки. Отмечены особенности задания начальных условий для рассматриваемой термодинамической модели после перерыва в работе системы. Приведены результаты моделирования в Matlab/Simulink работы этой системы защиты.

Ключевые слова: тепловая защита, асинхронный двигатель, термодинамическая модель, тепловая проводимость, теплоемкость, математическое моделирование, Matlab/Simulink, постоянная времени нагрева, термодинамические процессы, превышение температуры обмотки статора.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы тепловой защиты электродвигателей в настоящее время могут решаться различными путями – использованием тепловых реле, системами с датчиками температуры и системами, построенными на основе термодинамических моделей (ТДМ).

Тепловая защита с помощью тепловых реле, при невысокой стоимости и простоте, не всегда может обеспечить надежную защиту электродвигателей. Так, подобная защита практически непригодна для двигателей с самовентиляцией, работающих в режимах с переменной скоростью из-за существенно изменяющихся величин тепловых проводимостей и теплоотдачи в окружающую среду. Системы защиты, основанные на непосредственном измерении температуры обмотки, имеют очевидный недостаток – необходимость использования встроенных датчиков температуры.

Указанные обстоятельства делают актуальной задачу создания систем тепловой защиты на основе ТДМ защищаемых двигателей. В этом случае не требуется встраивать датчики температуры непосредственно в двигатель. Однако для реализации и обеспечения правильного функционирования ТДМ требуется достаточно большой объем информации о защищаемом двигателе, не всегда доступный для персонала, занимающегося эксплуатацией электропривода. В ряде случаев бывает не просто решить проблему определения начальных условий для запуска модели после паузы в работе электропривода.

Здесь рассмотрим возможности построения тепловой защиты на основе ТДМ асинхронного двигателя (АД) с учетом того факта, что при создании защиты, предназначенной для использования в электроприводах общего назначения, требуется минимизация требований к объему исходной информации для параметрирования модели и простота ее использования при перерывах в работе привода.

ОПИСАНИЕ ТДМ АД ЗАКРЫТОГО ИСПОЛНЕНИЯ

У АД закрытого исполнения тепловой поток от обмотки статора к окружающей среде проходит через элементы остальной части машины. Поэтому можно принять тепловую проводимость от обмотки статора к окружающему машину воздуху (λ_{10}) равной нулю. Это дает возможность представить ТДМ такого двигателя в виде двухмассовой модели, где в качестве первой массы выступает обмотка статора, а в качестве второй массы – вся остальная часть машины [1]. Такая двухмассовая ТДМ показана на **рис. 1**, где обозначено: 1 – обмотка статора; 2 – остальная часть машины; λ_{12} – тепловая проводимость от статора к остальной части машины; λ_{20} – тепловая проводимость к окружающему машину воздуху (охлаждающей среде).

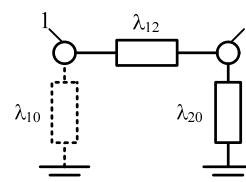


Рис. 1. Схема двухмассовой термодинамической модели АД

Запишем уравнения теплового баланса для 2-массовой ТДМ АД, показанной на **рис. 1**:

$$\begin{cases} C_1 (d\tau_1 / dt) + \lambda_{12} (\tau_1 - \tau_2) = \Delta P_1; \\ C_2 (d\tau_2 / dt) + \lambda_{12} (\tau_2 - \tau_1) + \lambda_{20} \tau_2 = \Delta P_2, \end{cases} \quad (1)$$

где C_1 и C_2 – теплоемкости первой и второй массы ТДМ; ΔP_1 и ΔP_2 – мощности потерь в этих массах.

Обозначим: $\Delta\tau_1 = \tau_1 - \tau_2$; $T_{1out} = C_1 / \lambda_{12}$ – постоянная времени теплоотдачи от обмотки статора к остальной части машины, которая является здесь внешней средой по отношению к обмотке статора; $T_{2out} = C_2 / \lambda_{20}$ – постоянная времени теплоотдачи от остальной части машины во внешнюю среду, под которой будем понимать окружающий машину воздух. С учетом введенных обозначений перепишем (1) в виде

$$\begin{cases} \Delta\tau_1 = \lambda_{12}^{-1} (\Delta P_1 - C_1 \tau_2) (T_{1out} p + 1)^{-1}; \\ \tau_2 = \lambda_{20}^{-1} (\Delta P_2 + \lambda_{12} \Delta\tau_1) (T_{2out} p + 1)^{-1}. \end{cases} \quad (2)$$

Систему уравнений (2) можно представить в виде структурной схемы, показанной на **рис. 2**.

ПРИНЦИП РАЗДЕЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ

Поскольку постоянные времени T_{1out} и T_{2out} отличаются друг от друга в десятки раз, можно использовать принцип разделения термодинамических процессов на быстрые (определяемые T_{1out}) и медленные (определяемые T_{2out}). Здесь медленный процесс будет выступать в роли регулярного процесса по Кондратьеву [2, 3]. Величина τ_2 изменяется значительно медленнее, чем τ_1 (а значит, и $\Delta\tau_1$). При этом C_1 много меньше, чем C_2 . Эти соображения позволяют пренебречь связью от τ_2 через $C_1 p$. В этом случае, учитывая, что $T_{1out} \ll T_{2out}$, можно принять $\lambda_{12} \Delta\tau_1 \approx \lambda_{12} \Delta\tau_{1уст}$. Поскольку $\lambda_{12} \Delta\tau_{1уст} = \Delta P_1$, эти соображения позволяют представить исходную схему на **рис. 2** в таком виде, как это показано на **рис. 3**.

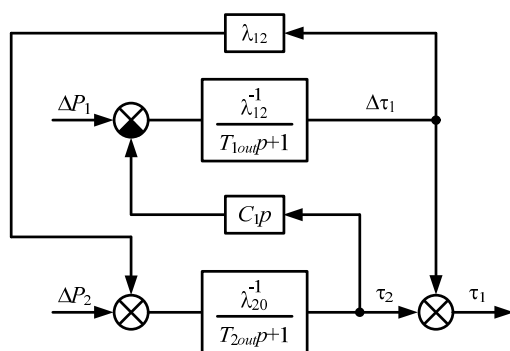


Рис. 2. Структурная схема двухмассовой ТДМ АД

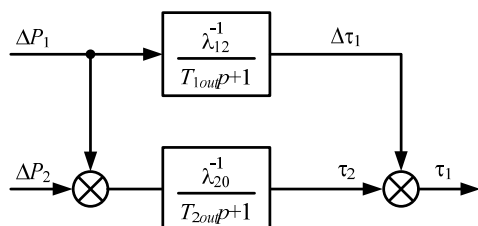


Рис. 3. Преобразованная структурная схема двухмассовой ТДМ АД с разделением процессов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВУХМАССОВОЙ ТДМ АД

Вопросы определения тепловых проводимостей двухмассовой ТДМ для АД закрытого исполнения подробно рассмотрены в [1]. Здесь остановимся кратко лишь на некоторых аспектах.

Определение λ_{12}

Из первого уравнения системы (1) можно получить для установившегося номинального режима

$$\lambda_{12} = \Delta P_{1N} (1 - \vartheta_N)^{-1} \tau_{1N}^{-1}, \quad (3)$$

где ΔP_{1N} – мощность потерь в первой массе в номинальном режиме; $\tau_{1N} = \tau_{1устN}$ – превышение температуры обмотки статора, допустимое по ГОСТ для данного класса нагревостойкости изоляции [4], $\vartheta_N = \tau_{2устN} / \tau_{1устN}$ – отношение установившихся превышений температуры узлов двухмассовой ТДМ в номинальном режиме.

Как показывают расчеты на примере двигателей серии 4А, величина ϑ_N находится, в большинстве случаев, в пределах от 0,75 до 0,85.

На **рис. 4** показана зависимость λ_{12} от номинального момента (M_N) для закрытых АД серии 4А с различным количеством полюсов, которая практически линейна. Также на **рис. 4** непрерывной линией показана аппроксимирующая зависимость

$$\lambda_{12} = k_{12} M_N^\delta, \quad (4)$$

найденная с использованием метода наименьших квадратов, которая обеспечивает аппроксимацию по указанной выборке двигателей с относительным средним квадратичным отклонением 9,02% (здесь $k_{12} = 4,025$ и $\delta = 0,520$). Эту зависимость можно использовать с целью приближенной оценки величины λ_{12} для двигателей разных габаритов.

Определение λ_{20}

Тепловая проводимость λ_{20} может быть найдена из соотношения (см. **рис. 3**)

$$\lambda_{20} = \Delta P_{\Sigma N} / \tau_{устN}, \quad (5)$$

где $\Delta P_{\Sigma N}$ – суммарная мощность потерь в двигателе при работе в номинальном режиме; $\tau_{устN}$ – среднее превышение температуры двигателя при работе в номинальном режиме,

$$\tau_{устN} = \tau_{1N} [c_1 + \vartheta_N (1 - c_1)], \quad (6)$$

где $c_1 = C_1 / C_\Sigma$; $C_\Sigma = C_1 + C_2$.

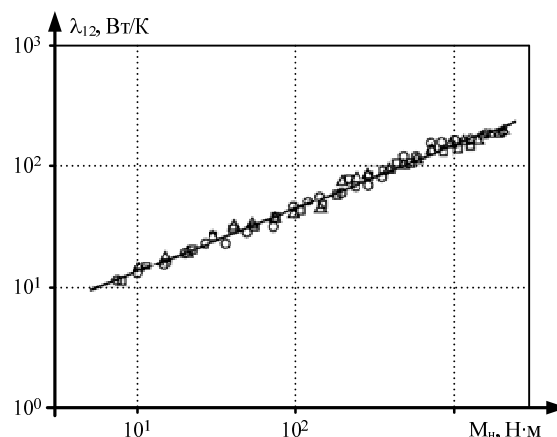


Рис. 4. Зависимость λ_{12} от номинального момента для закрытых АД серии 4А ($\circ$ – $2p=4$; $\square$ – $2p=6$; $\triangle$ – $2p=8$)

Выражение (6) позволяет записать (5) в виде

$$\lambda_{20} = \Delta P_{\Sigma N} \left[c_1 + \vartheta_N (1 - c_1) \right]^{-1} \tau_{1N}^{-1} \quad (7)$$

Определение C_1

Величину C_1 нетрудно определить экспериментально. При интенсивных термодинамических процессах нагрев обмотки статора можно считать близким к адиабатическому [5–7].

В таком случае начальный темп изменения температуры обмотки статора будет определяться выражением $\dot{t}_{1\text{нач}} = (d\tau_1/dt)_{\text{нач}} = \Delta P_1 / C_1$, которое дает возможность легко рассчитать величину C_1 по экспериментальным данным.

Также в литературе приводится информация, которая позволяет провести расчет или приближенную оценку C_1 . Так, в [8] приводятся сведения о $\dot{t}_{1\text{нач}}$ при заторможенном роторе для двигателей серии 4А. В [8–10] приводятся сведения о массе обмотки статора для двигателей 4А, МТФ, МТН, а в [8–10] – сведения о числе пазов статора, количестве элементарных проводников в эффективном, числе параллельных ветвей фазы, диаметре провода (или размере сечения провода), сопротивлении фазы статора (R_1) и некоторые другие данные. Если имеется информация о R_1 , то можно получить выражение для расчета теплоемкости меди обмотки, воспользовавшись выражением, связывающим R_1 с длиной и площадью сечения проводников [11, 12]. При наличии сведений о плотности тока в обмотке статора при номинальном токе или при пуске двигателя (такие сведения, например, приведены в [10] для двигателей 4МТКФ и 4МТКН, в [8] для серии 4А) также есть возможность определить C_1 . Подробнее вопросы оценки величины параметров ТДМ закрытых АД рассмотрены в [13]. Расчеты показывают, что большинство значений c_1 для двигателей 4А находится в пределах от 0,04 до 0,06, а у двигателей МТКФ все значения c_1 находятся в диапазоне от 0,03 до 0,05.

Определение постоянных T_{1out} и T_{2out}

Соотношения (3) и (7) позволяют записать выражения для постоянных времени.

$$T_{1out} = C_1 (1 - \vartheta_N) \tau_{1N} / \Delta P_{1N}, \quad (8)$$

$$T_{2out} = C_{\Sigma} (1 - c_1) \tau_{1N} \left[c_1 + \vartheta_N (1 - c_1) \right] / \Delta P_{\Sigma N}. \quad (9)$$

Суммарную теплоемкость машины C_{Σ} не трудно определить приближенно, используя информацию о массе машины. Постоянную T_{2out} можно представить как

$$T_{2out} = T (1 - c_1), \quad (10)$$

где T – постоянная времени для одномассовой ТДМ.

Из соотношения (10) видно, что, поскольку c_1 мала, то T_{2out} весьма близка к T . Величины T_{1out} и T_{2out} для двигателей серии 4А закрытого исполнения показаны на рис. 5 и 6. На этих рисунках обозначено: $\circ$ – $2p=4$; $\square$ – $2p=6$; Δ – $2p=8$, где $2p$ – число полюсов двигателя.

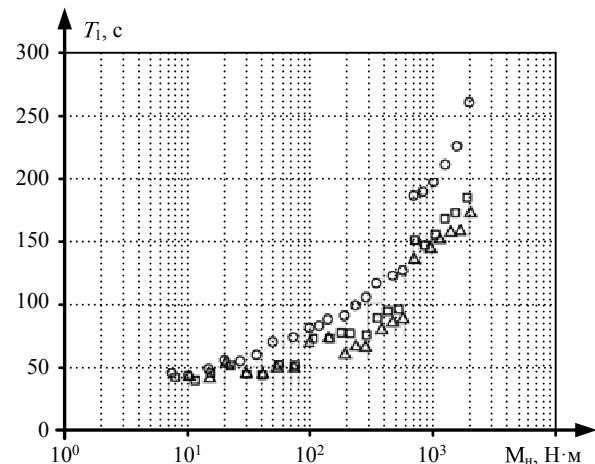


Рис. 5. Зависимость постоянной времени T_{1out} от номинального момента и числа полюсов

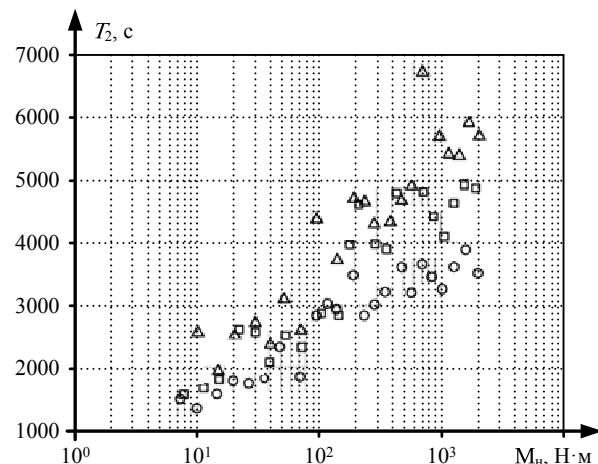


Рис. 6. Зависимость постоянной времени T_{2out} от номинального момента и числа полюсов

Учет влияния скорости на охлаждение машины

Учет влияния скорости на λ_{12} и T_{1out}

Тепловая проводимость λ_{12} складывается из тепловых проводимостей между лобовыми частями обмотки статора и внутренним воздухом ($\lambda_{лв}$) и между пазовыми частями обмотки статора и сталью статора $\lambda_{пс}$. Величина $\lambda_{пс}$ не зависит от скорости, так как определяется теплопередачей от пазовой части обмотки к стали статора. Величина $\lambda_{лв}$ зависит от скорости, так как определяется обдувом лобовых частей обмотки внутренним воздухом, и может быть представлена в следующем виде [14]

$$\lambda_{лв} = \lambda_{лв0} + (\lambda_{лвN} - \lambda_{лв0}) (\omega / \omega_N)^{\alpha_{12}}, \quad (11)$$

где $\lambda_{лв0}$ и $\lambda_{лвN}$ – тепловые проводимости при нулевой и номинальной скоростях; ω_N – номинальная скорость двигателя.

Исходя из (11) можем записать λ_{12} как

$$\lambda_{12} = \lambda_{12N} \left[a_{12} + (1 - a_{12}) (\omega / \omega_N)^{\alpha_{12}} \right], \quad (12)$$

где $a_{12} = (\lambda_{пс} + \lambda_{лв0}) / \lambda_{12N}$.

При учете введенных обозначений можем записать выражение для постоянной времени T_{1out} как

$$T_{out} = \frac{T_{outN}}{a_{12} + (1 - a_{12}) (\omega / \omega_N)^{\alpha_{12}}}, \quad (13)$$

где $T_{outN} = C_1 / \lambda_{12N}$ – постоянная времени T_{out} при номинальной скорости.

На рис. 7 показаны значения коэффициента a_{12} , рассчитанные для двигателей серии 4А закрытого исполнения. Здесь видно, что нет явной зависимости a_{12} от размеров машины, однако прослеживается зависимость от числа пар полюсов. Это связано с тем, что для более скоростных машин доля переменной (зависящей от скорости) составляющей теплоотдачи от лобовых частей к внутреннему воздуху больше. Из рис. 7 можно видеть, что для машин с $\omega_0 = 3000$ об/мин величина a_{12} , в среднем, близка к 0,6; для $\omega_0 = 1500$ об/мин – около 0,65; для $\omega_0 = 1000$ об/мин – около 0,7; для $\omega_0 < 1000$ об/мин – 0,7...0,85.

Степенной коэффициент $\alpha_{12} < 1$. Например, в [14] используется значение 0,8. В [15] предлагаются меньшие значения, причем зависящие от размеров и конструктивных особенностей машины. Необходим способ учета влияния скорости на λ_{12} и T_{out} , который был бы достаточно универсальным. С этой целью примем линейный закон зависимости относительной тепловой проводимости λ_{12} от скорости. На рис. 8 показаны зависимости $\lambda_{12}/\lambda_{12N}$ от скорости для $\alpha_{12} = 1$ и $\alpha_{12} < 1$. Здесь видно, что линейная аппроксимация несколько «недооценивает» величину λ_{12} в области $\omega < \omega_N$. Относительная погрешность $\delta\lambda_{12}^* = \delta\lambda_{12}/\lambda_{12N}$ составляет

$$\delta\lambda_{12}^* = (1 - a_{12}) (\omega / \omega_N) \left[(\omega / \omega_N)^{\alpha_{12}-1} - 1 \right]. \quad (14)$$

На рис. 9 показана зависимость погрешности $\delta\lambda_{12}^*$ от относительной скорости и α_{12} при $a_{12} = 0,5$. Учитывая, что, как правило, $a_{12} > 0,5$ и $\alpha_{12} > 0,5$, можно считать незначительной погрешность от линейной аппроксимации зависимости λ_{12} от скорости. При работе системы тепловой защиты это обстоятельство будет обеспечивать некоторый «запас» в оценке нагрева в области $\omega < \omega_N$.

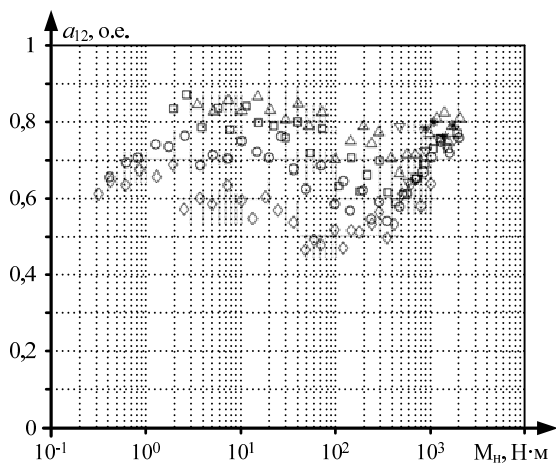


Рис. 7. Зависимости a_{12} от номинального момента для двигателей 4А ($\diamond - 2p=2$; $\circ - 2p=4$; $\square - 2p=6$; $\Delta - 2p=8$; $\nabla - 2p=10$; $*$ – $2p=12$)

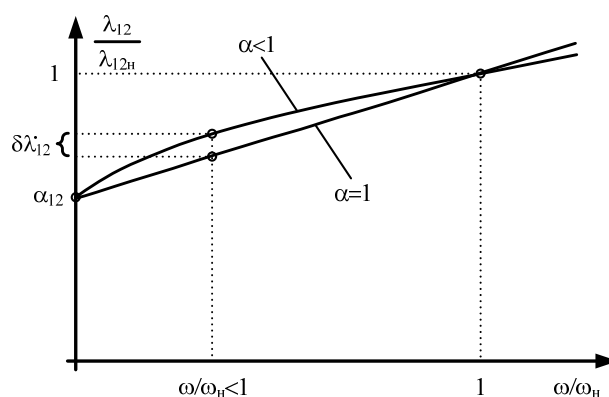


Рис. 8. Зависимости $\lambda_{12}/\lambda_{12N}$ от скорости для $\alpha_{12}=1$ и $\alpha_{12}<1$

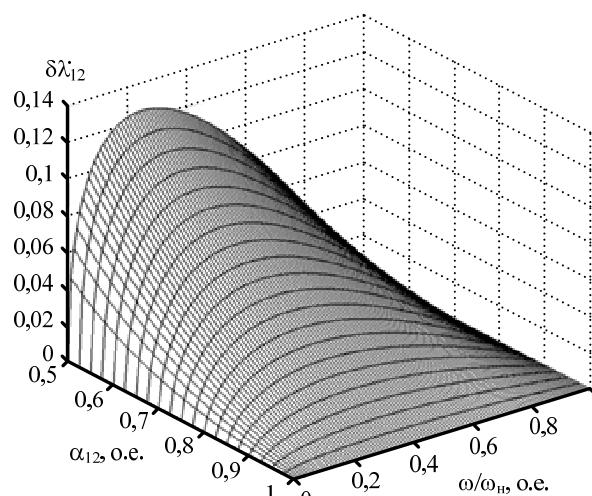


Рис. 9. Зависимость погрешности $\delta\lambda_{12}^*$ от относительной скорости и α_{12}

Учет влияния скорости на λ_{20} и T_{out}

Тепловая проводимость λ_{20} также складывается из двух частей – постоянной и переменной, зависящей от скорости. Для двигателей с самовентиляцией переменная составляющая оказывает существенное влияние на λ_{20} и T_{out} при изменении скорости. Учет влияния скорости на тепловую проводимость λ_{20} осложняет то, что теплоотдача от различных элементов корпуса машины в окружающую среду зависит от скорости в разной степени. Так, число Рейнольдса, пропорциональное скорости, входит в формулу для числа Нуссельта, определяющего коэффициент теплоотдачи с поверхности в степени, равной 0,500–0,685 для воздуха, входящего в межреберные каналы [15]. Для подшипниковых щитов предлагаются зависимости со степенью от 0,6 до 0,9 [14, 15].

По тем же соображениям, которые были изложены выше, при рассмотрении связи λ_{12} со скоростью, используем линейную аппроксимацию и для связи λ_{20} со скоростью. Для записи зависимости λ_{20} от скорости используем известное из литературы выражение для коэффициента ухудшения условий охлаждения [16] $\beta = \beta_0 + (1 - \beta_0)(\omega / \omega_N)$, с учетом которого запишем выражение для λ_{20} в виде

$$\lambda_{20} = \lambda_{20N} [\beta_0 + (1 - \beta_0)(\omega / \omega_N)], \quad (15)$$

где λ_{20N} – тепловая проводимость при номинальной скорости; β_0 – коэффициент ухудшения охлаждения при нулевой скорости.

Исходя из (15) можем записать выражение для постоянной времени T_{1out} как

$$T_{2out} = T_{2outN} [\beta_0 + (1 - \beta_0)(\omega / \omega_N)]^{-1}, \quad (16)$$

где $T_{2outN} = C_2 / \lambda_{20N}$ – постоянная времени при номинальной скорости.

В [16, 17] приводятся обобщенные данные по величине β_0 . В [18] приведены более детальные сведения о значениях β_0 для общепромышленных электродвигателей основного исполнения производства ОАО «ВЭМЗ», ОАО «НИПИЭМ».

СРАВНЕНИЕ ИСХОДНОЙ И ПРЕОБРАЗОВАННОЙ ДВУХМАССОВОЙ ТДМ АД

Проведем анализ погрешности, которую дает переход к ТДМ с разделением каналов от исходной двухмассовой модели. Для достижения большей общности результатов воспользуемся записью уравнений модели в относительных единицах. Используем следующую систему относительных единиц: $\lambda_{12}^* = \lambda_{12} / \lambda_{12N}$; $\lambda_{20}^* = \lambda_{20} / \lambda_{20N}$; $\Delta P_1^* = \Delta P_1 / \Delta P_{\Sigma N}$; $\Delta P_2^* = \Delta P_2 / \Delta P_{\Sigma N}$; $T_{1out}^* = T_{1out} / t_6$; $T_{2out}^* = T_{2out} / t_6$; $t_6 = C_{\Sigma} / \lambda_{20N}$; $\omega^* = \omega / \omega_N$.

На рис. 10 приведены зависимости ошибки расчета превышения температуры обмотки статора $\delta\tau_1$ при переходе к ТДМ с разделением каналов. Графики построены для $\lambda_{20}^* = 1,0$; $\lambda_{12}^* = 2,0$; $T_{1out}^* = 0,025$ и $T_{2out}^* = 0,975$. Здесь обозначено: 1 – при постоянных значениях ΔP_1^* и ΔP_2^* , равных 0,5; 2 – прямоугольные импульсы $\Delta P_1^* = 1,0$ с шириной 50% и периодом 0,5 о.е. при $\Delta P_2^* = 0,5$. Как видим, максимальная погрешность составляет порядка 2,5%.

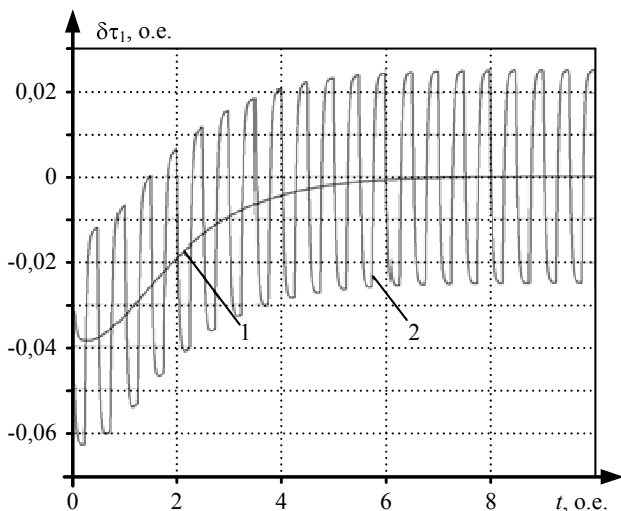


Рис. 10. Зависимость ошибки от времени при $\omega = \omega_N$

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ ТДМ АД С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПРОЦЕССОВ

Известны варианты системы тепловой защиты электродвигателей на основе полной термодинамической модели, например [19]. Преимущество такого варианта в том, что обеспечивается непосредственный расчет температуры обмотки (в том числе и при существенных изменениях скорости вращения), а это позволяет использовать для оценки теплового состояния двигателя вычисление расхода термического ресурса изоляции обмотки. Недостаток этого варианта связан с проблемой определения начальных условий для продолжения расчета процессов после перерыва в работе. Рассмотрим организацию работы системы защиты на основе двухмассовой ТДМ с разделением процессов, которая позволяет обойти эту проблему. При использовании только быстрого канала, в ходе длительной работы с пониженной скоростью, из-за ухудшения теплоотдачи во внешнюю среду, даже при эквивалентном токе меньшем номинального, может происходить рост средней температуры двигателя (а значит, и 2-й массы модели) выше уровня, характерного для работы в номинальном режиме, что не будет учитываться системой защиты.

Преодоление этого недостатка может быть осуществлено приближенно за счет суммирования с $\Delta\tau_1$ величины $\Delta\tau_2$, которая вычисляется с учетом изменения теплоотдачи от второй массы при изменении скорости двигателя. При изменении скорости двигателя или нагрузки на больших интервалах времени происходит заметное изменение превышения температуры второй массы термодинамической модели $\Delta\tau_2$.

Можно осуществить приближенный учет изменения температуры 2-й массы следующим образом.

Для номинального установившегося режима

$$\Delta\tau_{1N} = R_1 I_{1N}^2 / \lambda_{12N} \approx (1 - \vartheta_N) \tau_{1N}, \quad (17)$$

где R_1 – сопротивление статорной обмотки; I_{1N} – номинальный ток статора.

Запишем уравнения для ТДМ АД с разделением процессов, показанной на рис. 3, в следующем виде:

$$\begin{cases} \Delta\tau_1 = \frac{1}{T_{1outN} p} \left(\frac{\Delta P_1}{\lambda_{12N}} - \Delta\tau_1 F_1 \right); \\ \tau_2 = \frac{1}{T_{2outN} p} \left(\frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{\lambda_{20N}} - \tau_2 F_2 \right), \end{cases} \quad (18)$$

где

$$F_1 = a_{12} + (1 - a_{12}) \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^{\alpha_{12}}$$

и

$$F_2 = \beta_0 + (1 - \beta_0) \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right).$$

Из первого уравнения системы (18) получим

$$\Delta\tau_1 = \frac{1}{T_{1outN} p} \left[\frac{R_1 I_{1N}^2}{\lambda_{12N}} - \Delta\tau_1 F_1(\omega) \right]. \quad (19)$$

С учетом (17) перепишем (19) в виде

$$\Delta\tau_1 = \frac{1}{T_{outN}P} \left[\Delta\tau_{1N} \left(\frac{I_1}{I_{1N}} \right)^2 - \Delta\tau_1 F_1(\omega) \right]. \quad (20)$$

Из-за малой величины T_{out} даже после небольшого перерыва в работе системы (более нескольких десятков секунд) можно задавать нулевые начальные условия для $\Delta\tau_1$. Соотношение (20) позволяет учесть лишь влияние изменения скорости на теплоотдачу от обмотки статора к остальной части двигателя и не позволяет учесть изменение средней температуры машины.

Для номинального установившегося режима, исходя из схемы на рис. 3, получим

$$\tau_{2N} = (\Delta P_{1N} + \Delta P_{2N}) / \lambda_{20N}. \quad (21)$$

На самом деле отношение $(\Delta P_{1N} + \Delta P_{2N}) / \lambda_{20N}$ равно установившейся средней величине превышения температуры двигателя $\tau_{устN}$, но разница между τ_{2N} и $\tau_{устN}$ очень мала. Нетрудно показать, что при $c_1=0,05$ и $\theta_N=0,8$ она составляет лишь около 1,25% и ею можно пренебречь.

Выразив из второго уравнения системы (18) τ_2 и обозначив $\tau_{2N} = \theta_N \tau_{1N}$, получим следующее выражение:

$$\tau_2 = \frac{\theta_N \tau_{1N} [i_1^2 p_{1N} + H] - \tau_2 F_2(\omega)}{T_{outN}P}, \quad (22)$$

где $p_{1N} = \Delta P_{1N} / (\Delta P_{1N} + \Delta P_{2N})$; $H = (1 - p_{1N}) \Delta P_2 / \Delta P_{2N}$.

Построим параллельный канал расчета, который будет давать превышение температуры второй массы при условии номинальной нагрузки и скорости $\tau_{2(\omega N, PN)}$

$$\tau_{2(\omega N, PN)} = \frac{1}{T_{outN}P} [\theta_N \tau_{1N} - \tau_{2(\omega N, PN)}]. \quad (23)$$

Разность $\Delta\tau_{2(\omega N, PN)} = \tau_2 - \tau_{2(\omega N, PN)}$ показывает насколько отличается превышение температуры при работе с произвольной нагрузкой и скоростью от превышения, которое было бы в этот же момент времени при работе с номинальными значениями нагрузки и скорости. Отметим, что благодаря использованию в алгоритме разности $\tau_2 - \tau_{2(\omega N, PN)}$ здесь можно после перерыва в работе задавать нулевые начальные условия для τ_2 и $\tau_{2(\omega N, PN)}$ без большой погрешности.

При использовании (20), (22) и (23) имеется также возможность выполнить приближенную оценку абсолютного значения превышения температуры обмотки статора τ_1^0 в предположении о том, что среднее значение превышения температуры двигателя на больших интервалах времени не должно превышать уровень, соответствующий номинальному режиму. Для этого необходимо суммировать значения $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_{2(\omega N, PN)}$, а также превышение температуры второй массы при работе в номинальном режиме $\tau_{2N} = \theta_N \tau_{1N}$:

$$\tau_1^0 = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_{2(\omega N, PN)} + \theta_N \tau_{1N}. \quad (24)$$

Для оценки необходимости срабатывания тепловой защиты используем величину $\bar{\tau}_{1(t_w)}^0$ – значение оценки превышения температуры обмотки статора τ_1^0 , усредненное за время, равное ширине скользящего окна. Минимальную ширину окна можно принять равной 10 мин, как

границу длительности повторно-кратковременного режима. Максимальной шириной окна может быть значение, близкое к постоянной времени T_{out} . Условием срабатывания защиты является выполнение неравенства $\bar{\tau}_{1(t_w)}^0 > k_3 \tau_{1N}$, где k_3 – коэффициент запаса (например, 1,05–1,1). В принципе, величина $k_3 \tau_{1N}$ должна быть такой, чтобы абсолютная температура обмотки не превышала значение температуры срабатывания защиты при медленной нарастающей перегрузке по ГОСТ, например [20].

Сама величина τ_1^0 , полученная по (24) (без усреднения по ширине окна) может быть использована для определения ситуации, когда необходимо срабатывание защиты по причине кратковременной сильной перегрузки. Такая ситуация возможна при работе двигателя с током статора, равным уровню ограничения, установленному в САР электропривода. Этого уровня недостаточно для срабатывания устройства защиты на основе электромагнитного расцепителя, однако температура обмотки достаточно быстро растет и через некоторое время, меньшее ширины окна, может достигнуть недопустимых значений. Условием срабатывания защиты в такой ситуации должно быть выполнение условия $\tau_1^0 > \theta_{кр, доп} - \theta_0$, где $\theta_{кр, доп}$ – кратковременно допустимая температура для данного класса изоляции. В качестве основы для определения предельно допустимой температуры можно принять температуру срабатывания встроенной температурной защиты [8]. Значения предельно допустимой температуры устанавливаются ГОСТ [20], они зависят от категории защиты и класса нагревостойкости изоляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ

На рис. 11 показаны результаты моделирования работы тепловой защиты с использованием обоих каналов термодинамической модели: график изменения нагрузки (момента двигателя) во времени (а); график изменения скорости (б); график изменения величины $\bar{\tau}_{1(t_w)}^0$ и пороговый уровень срабатывания $k_3 \tau_{1N}$ (в); значение превышения температуры обмотки статора, рассчитанное с помощью термодинамической модели τ_1 (г). Использовалась ширина окна $t_w = T_{outN}$. Графики построены в относительных единицах, где в качестве базисных величин приняты следующие: $\omega_6 = \omega_N$ – базисная скорость; $M_6 = M_N$ – базисный момент; $\tau_6 = \Delta P_{\Sigma N} / \lambda_{20N}$ – базисное превышение температуры; $t_6 = C_{\Sigma} / \lambda_{20N}$ – базисное время.

Срабатывание защиты происходит в момент времени, отмеченный стрелкой на рис. 11, в, после чего происходит отключение привода. Разница уровней, к которым стремятся значения превышения температуры $\bar{\tau}_{1(t_w)}^0$ и τ_1 на рис. 11, в и 11, г после отключения, объясняется следующим. Превышение $\bar{\tau}_{1(t_w)}^0$ включает в себя постоянную составляющую $\theta_N \tau_{1N}$, не изменяющуюся во времени, позволяющую создать некоторый «запас», необходимый из-за отсутствия информации о тепловом состоянии термодинамической модели при начале ее работы после отключения системы. Соответственно, это превышение температуры после отключения двигателя стремится к уровню $\theta_N \tau_{1N}$. Превышение температуры τ_1 на рис. 11, г является реальным превышением температуры обмотки статора (при моделировании системы защиты оно рассчитывалось непосредственно по полной термодинамической модели двигателя), и после отключения двигателя стремится к нулю.

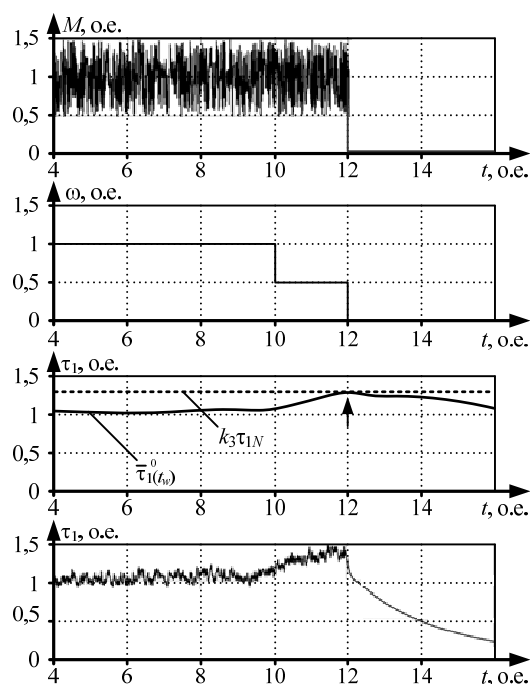


Рис. 11. Результаты моделирования работы тепловой защиты с использованием обоих каналов ТД

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к построению тепловой защиты АД на основе варианта двухмассовой ТДМ АД с разделением быстрых и медленных термодинамических процессов, что позволяет минимизировать объем информации, необходимой для параметрирования модели и организации работы системы защиты. Описан алгоритм работы системы тепловой защиты на основе предложенного подхода для ситуаций медленного возрастания температуры и для кратковременной сильной перегрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метельков В.П. О расчете параметров двухмассовой термодинамической модели асинхронного двигателя // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2016. Т. 16, №1. С. 58-65.
2. Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л. Переходные тепловые процессы в электрических машинах. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 216 с.
3. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М.: Гостехиздат, 1954. 408 с.
4. ГОСТ ИЕС 60034-1-2014. Машины электрические вращающиеся. Ч. 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики. М.: Стандартинформ, 2015. 58 с.
5. Расчетно-теоретическое определение изменения теплового состояния обдуваемых асинхронных двигателей в режиме короткого замыкания и после него / А.Н. Бурковский, О.И. Пилипенко, О.А. Рыбалко, А.А. Мельник // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. Киев, 2007. С.183-193.

6. Филиппов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах: учеб. пособие. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
7. Бурковский А.Н., Макеев В.В. Исследование и аппроксимация кривых нагрева обмоток статоров взрывозащищенных асинхронных двигателей в режимах S1, S2 // Техническая электродинамика. 1982. №3. С.8-14.
8. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
9. Крановое оборудование: Справочник / Алексеев Ю.И., Богословский А.П., Певзнер Е.М. и др.; под ред. А.А. Рабиновича. М.: Энергия, 1979. 240 с.
10. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1988. 344 с.
11. Гольдберг О.Д., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. О.Д. Гольдберга. 3-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 2006. 430 с.
12. Кацман М. М. Расчет и конструирование электрических машин: учеб. пособие. М.: Энергоатомиздат, 1984. 360 с.
13. Зюзев А.М., Метельков В.П., Максимова В.А. Расчет параметров двухмассовой термодинамической модели асинхронного двигателя // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: материалы VI Международной научно-технической интернет-конференции (г. Пермь, 1-30 ноября 2012 г.). Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. С. 121-131.
14. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. М.: Высш. шк., 1989. 239 с.
15. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
16. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: учебник для вузов. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.
17. Автоматизированный электропривод промышленных установок. Г.Б. Онищенко, М.И. Аксенов, В.П. Грехов, М.Н. Зарицкий, А.В. Куприков, А.И. Нитиевская; под общ. ред. Г.Б. Онищенко. М.: РАСХН, 2001. 520 с.
18. Захаров А.В., Кобелев А.С., Кудряшов С.В. Определение превышений температур и допустимых нагрузок закрытых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, эксплуатируемых в широком диапазоне частоты вращения // Электричество. 2010. №12. С. 35-42.
19. Пат. 2415504 Российская Федерация, МПК H02N7/08. Устройство для защиты трехфазных асинхронных двигателей / Филичев О.А., Поздеев Н.Д.; заявитель ГОУ ВПО «Вологодский государственный технический университет» (ВоГТУ). № 2009110614/07; заявл. 23.03.2009; опубл. 27.03.2011.
20. ГОСТ 27888-88. Машины электрические вращающиеся. Встроенная температурная защита. Правила защиты. М.: Изд-во стандартов, 1989. 18 с.

Поступила в редакцию 17 февраля 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

TWO-CHANNEL THERMODYNAMIC MODEL OF THE INDUCTION MOTOR FOR THE HEAT PROTECTION SYSTEM

Anatoliy M. Ziuzev

D.Sc. (Eng.), 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.ziuzev@urfu.ru.

Vladimir P. Metelkov

Ph.D. (Eng.), 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>.

The article describes the approach to constructing a thermal protection system for an induction motor based on the separation of thermodynamic processes into fast and slow. The structure of a two-channel thermodynamic model is substantiated, in which this principle of process separation is realized and the mathematical description of such a model is obtained. The advantage of the proposed approach is a small amount of initial data necessary for the parameterization of the thermal protection system. The proposed version of the thermal protection system uses a two-mass thermodynamic model of the motor to calculate the stator winding temperature rise above the ambient temperature, and at the same time providing a simpler solution to the problem of setting the initial conditions for starting the protection system after a break than the thermal control system of the electric motor using traditional thermal models. The problems of the proposed thermodynamic model parameters determining are considered. The values of fast and slow channel time constants for enclosed induction motors of different power are given. The approach to the account of the speed changes effect on motor cooling is set out. The influence of the error arising from the transition from the initial thermodynamic model (the two-mass model of the traditional type) to the model transformed to the two-channel version is analyzed. The algorithm of the thermal protection system operation based on the two-channel model for the situations of slow temperature increase and for short-term strong overload is described. The features of determining the initial conditions for the thermodynamic model under consideration after a break in the operation of the system are noted. The results of simulation of this protection system in Matlab/Simulink are given.

Keywords: thermal protection, induction motor, thermodynamic model, thermal conductivity, heat capacity, mathematical modeling, Matlab/Simulink, heating time constant, thermodynamic processes, temperature rise of the stator winding.

REFERENCES

1. Metelkov V.P. About calculation of parameters of two-mass thermodynamic model of induction motor. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika"* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Power engineering"], 2016, vol. 16, no. 1, pp. 58-65. (In Russian)
2. Gurevich E.I., Rybin Yu.L. *Perekhodnyye teplovyye protsessy v elektricheskikh mashinakh* [Transient thermal processes in electric machines]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1983. 216 p. (In Russian)
3. Kondratyev G.M. *Regulyarnyy teplovoy rezhim* [Regular thermal mode]. Moscow: Gostehizdat Publ., 1954. 408 p. (In Russian)
4. GOST IEC 60034-1-2014. Rotating electrical machines. Part. 1. Rating and performance. Moscow, Standartinform, 2015. 58 p. (In Russian)
5. Burkovskiy A.N., Pilipenko O.I., Rybalko O.A., Melnik A.A. Calculation-theoretical determination of the change in the thermal state of blown induction motors in the short-circuit and after-fault mode. *Vzryvozashchishchennoye elektrooborudovaniye: sb. nauch. tr. UkrNIIVE* [Explosion-proof electrical equipment: a collection of scientific works of UkrNIIVE], 2007, pp. 183-193. (In Russian)
6. Filippov I.F. *Teploobmen v elektricheskikh mashinakh* [Heat transfer in electrical machine]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 256 p.
7. Burkovskiy A.N., Makeyev V.V. Investigation and approximation of the heating curves of explosion-proof induction motors stator windings in S1, S2 modes. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical electrodynamics], 1982, no. 3, pp. 8-14. (In Russian)
8. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A. *Asinkhronnyye dvigateli serii 4A: Spravochnik* [Asynchronous motors of 4A series: Reference book]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 504 p. (In Russian)
9. Alekseyev Yu.I., Bogoslovskiy A.P., Pevzner E.M., et al. *Kranovoye oborudovaniye: Spravochnik* [Crane equipment: Reference book]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 240 p. (In Russian)
10. Yaure A.G., Pevzner E.M. *Kranovyy elektropriwod* [Crane electric drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 344 p. (In Russian)
11. Goldberg O. D., Sviridenko I. S. *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 430 p. (In Russian)
12. Katsman M.M. *Raschet i konstruirovaniye elektricheskikh mashin* [Calculation and design of electrical machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 360 p. (In Russian)
13. Zyuzev A.M., Metelkov V.P., Maksimova V.A. Calculation parameters of the two-mass thermodynamic model of asynchronous motor. *Energetika. Innovatsionnyye napravleniya v energetike. CALS-tehnologii v energetike* [Power engineering. Innovative directions in the energy sector. CALS-technologies in the energy sector.]. Materials of the VI Int. Sc. and Techn. Internet Conference (Perm, 1-30 Nov. 2012). Perm, National research polytechnic university Publ., 2013, pp. 121-131. (In Russian)
14. Sipaylov G.A., Sannikov D.I., Zhadan V.A. *Teplovyye, gidravlicheskiye i aerodinamicheskiye raschety v elektricheskikh mashinakh* [Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electric machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 239 p. (In Russian)
15. Borisenko A.I., Kostikov O.N., Yakovlev A.I. *Okhlazhdeniye promyshlennykh elektricheskikh mashin* [Cooling of industrial electric machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 296 p. (In Russian)
16. Chilikin M.G., Sandler A.S. *Obshchiy kurs elektropriroda* [General course of the electric drive]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 576 p. (In Russian)
17. Onishchenko G.B., Aksenov M.I., Grekhov V.P., Zaritskiy M.N., Kuprikov A.V., Nitiyevskaya A.I. *Avtomatizirovanny elektropriwod promyshlennykh ustanovok* [Automated electric drive of industrial installations]. Moscow, RASHN Publ., 2001. 520 p. (In Russian)
18. Zakharov A.V., Kobelev A.S., Kudryashov S.V. Determination of temperature extremes and permissible loads of enclosed induction motors with squirrel cage rotor, operated in a wide range of rotation speed. *Elektrichestvo* [Electricity], 2010, no. 12, pp. 35-42. (In Russian)
19. Filichev O.A., Pozdeyev N.D. *Ustroystvo dlya zashchity trekhfaznykh asinkhronnykh dvigateley* [Device for protection of three-phase asynchronous motors]. Patent RF, no. 2415504, 2011. (In Russian)
20. GOST 27888-88. Rotating electrical machines. Built-in thermal protection. Rules for protection. Moscow, Publishing house of standards, 1989. 18 p. (In Russian)

Зюзов А.М., Метельков В.П. Двухканальная термодинамическая модель асинхронного двигателя для систем тепловой защиты // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2(39). С. 4-11. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-4-11)

Ziuzev A.M., Metelkov V.P. Two-Channel Thermodynamic Model of the Induction Motor for the Heat Protection System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 4-11. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-4-11)

Косматов В.И., Сарваров А.С., Данилов Е.И.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ДВУМЯ ОБМОТКАМИ НА СТАТОРЕ

Обоснована актуальность проблемы повышения энергетических показателей нерегулируемого асинхронного электропривода при работе в режимах систематической недогрузки. Проанализированы основные пути решения проблемы, и в частности, акцентируется внимание на переход к статорным обмоткам новой конструкции в результате проведения ремонтных мероприятий. В этой связи отмечается интерес к реализации концепции энергосбережения в асинхронных электроприводах за счет применения индивидуальной компенсации при закладке в пазы ротора обмоток новой конструкции. Разработано математическое описание нагрузочных режимов асинхронных электроприводов с энергосберегающим двигателем с двумя обмотками на статоре. Рассматриваются два варианта: первый – между обмотками статора существует только электромагнитная связь; второй – между обмотками есть электромагнитная связь и электрическая через источники питания. На основе систем уравнений, составленных для исследуемых вариантов схем замещения АД с двумя обмотками на статоре, и их решения получены аналитические зависимости для расчета комплексов действующих значений фазных токов. Методом комплексных амплитуд и пространственных векторов (структурное моделирование) проведены исследования нагрузочных режимов электроприводов в статике и построена зависимость энергетического КПД для вариантов, когда существует только электромагнитная связь с компенсирующей обмоткой и когда наряду с электромагнитной связью осуществляется раздельное питание обмоток с различным фазовым сдвигом питающих напряжений источников. Установлено, что при наличии только электромагнитной связи достигается заметное повышение энергетического КПД. При осуществлении раздельного питания можно получить дополнительное незначительное повышение данного показателя (менее 0,5%) при определенных значениях фазового сдвига питающих напряжений. Полученный энергосберегающий эффект незначителен, что позволяет считать предпочтительным вариант, в котором реализована только электромагнитная связь.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, двухслойная обмотка, компенсирующая обмотка, электромагнитная связь, раздельное питание, схемы замещения, математическое описание, энергетический коэффициент полезного действия.

ВВЕДЕНИЕ

Электроприводы с асинхронными короткозамкнутыми двигателями широко применяются во многих отраслях промышленности, на транспорте, сельском хозяйстве и в быту ввиду известных существенных преимуществ по сравнению с другими типами двигателей.

Однако они имеют два серьезных недостатка:

1. Низкие регулировочные и пусковые показатели при питании от промышленной сети.
2. Относительно низкий коэффициент мощности ($\cos\varphi_H=0,7-0,9$) ввиду потребления из сети реактивной мощности, величина которой составляет 30-70% от полной мощности двигателя.

Дополнительным увеличением доли потребляемой электрической энергии из сети в асинхронных электроприводах является завышенная мощность электродвигателей, т.е. несоответствие их мощности потребностям технологического процесса [1]. Это приводит к значительному снижению электрического и энергетического КПД [2]. В частности [3], для двигателей мощностью 5 кВт при 50% нагрузке КПД = 55%, а для двигателей мощностью 150 кВт при 50% нагрузке КПД составляет 65%. Номинальное значение КПД для мощных двигателей находится на уровне 90% с небольшим превышением.

Недогрузка АД по мощности обусловлена в первую очередь тем, что значительная часть нерегулируемых электроприводов в промышленности вводилась в эксплуатацию в условиях, когда число типоразмеров массовых двигателей было крайне ограниченным, что

приводило к выбору двигателей при проектировании с явным завышением мощности (в ряде случаев до 40%) [4]. Известно, что средняя загрузка электродвигателя (отношение мощности, потребляемой рабочим органом машины, к номинальной мощности электродвигателя) в отечественной промышленности составляет 0,3-0,4 (в европейской практике эта величина составляет 0,6) [5]. Это значит, что традиционные АД работают с КПД значительно ниже номинального, и проблема повышения их энергетических показателей является актуальной.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время можно обозначить несколько путей решения проблемы повышения энергетической эффективности асинхронного электропривода:

1. Создание новых серий асинхронных электродвигателей высоких классов энергоэффективности. В мировой и отечественной практике данному направлению уделяется особое внимание [6].
2. Замена недогруженных электродвигателей на двигатели меньшей мощности.
3. В последние 15–20 лет в рамках концепции энергосбережения возрос интерес к созданию электроприводов на базе асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией на основе применения 2-слойных обмоток [7].

Массового перехода в промышленности на энергоэффективные двигатели в ближайшее время трудно ожидать в силу того, что процесс от их разработки до широкого применения часто затягивается на годы.

Принятие решения на замену недогруженного двигателя связано с оценкой капитальных затрат [3]. При

загрузке менее 45% однозначно необходимо проводить замену электродвигателя, а при загрузке 45–75% требуется проводить экономическую оценку мероприятия. При загрузке 70% и более замена нецелесообразна [3].

Технических проблем для перехода на 2-слойные обмотки в статоре не существует. При проведении ремонтов АД, связанных с заменой статорной обмотки, достаточно закладывать в пазы новые конструкции обмоток, в частности 2-слойные обмотки [4,6-12]. Общеизвестно, что существующий парк стандартных АД во многих отраслях промышленности проходит многократные ремонты с заменой статорной обмотки. Это обстоятельство позволяет ремонтным службам закладывать в пазы статора новые конструкции обмоток, как, например, наряду с основной – дополнительную обмотку для компенсации реактивной мощности [7-9], или совмещенную двухслойную обмотку [5,10-16]. Для недогруженных двигателей такая модернизация не будет ущербной, хотя отдельные специалисты высказывают сомнения, что из-за двух обмоток ухудшится использование сечения паза.

Совмещенные двухслойные обмотки по сути представляют собой две трехфазные обмотки статора, одна из которых соединена по схеме «треугольник», а другая – «звезда». Энергосберегающий эффект в таких двигателях достигается за счет заметного улучшения формы поля в воздушном зазоре. В стандартном двигателе поле имеет «условно синусоидальную» форму, а совмещенные обмотки позволяют создать практически синусоидальное распределение магнитной индукции в зазоре. Это достигается за счет того, что результирующее магнитное поле образуется путем суммирования результирующих векторов магнитной индукции полюсов одноименных фаз «треугольника» и «звезды», которые образуют между собой угол 30 эл. градусов.

В данной работе проводится исследование энергоэффективного двигателя с двумя обмотками на статоре с целью разработки методики расчета нагрузочных режимов и один из вариантов повышения $\cos \varphi$, основанный на создании энергосберегающего асинхронного двигателя (АД) с двумя обмотками на статоре. Новизной этой работы является разработка методики расчета нагрузочных режимов электропривода с АД с двумя обмотками на статоре с питанием их от одного или двух источников. Приводятся результаты исследований нагрузочных режимов и энергетических показателей рассматриваемых вариантов исполнения и питания обмоток АД.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Математическое описание стационарных режимов работы электропривода с двумя обмотками на статоре производится методом комплексных амплитуд [2].

Из многочисленных вариантов схем включения двухслойных обмоток статора предлагается рассмотреть следующие системы с двумя обмотками на статоре (рис. 1):

1) рабочая обмотка 1 включена на сеть с напряжением $\dot{U}_1$, компенсационная обмотка 2 замкнута на конденсаторную батарею C ; в этом случае обмотки взаимосвязаны только электромагнитно (рис. 1, а);

2) обе обмотки питаются от сети, в общем случае с напряжениями $\dot{U}_1 = U_{1m} e^{j\theta}$ и $\dot{U}_2 = U_{2m} e^{j\gamma}$, где γ – угол сдвига векторов $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$; в этом случае обмотки взаимосвязаны электрически через питающую сеть и электромагнитно (рис. 1, б).

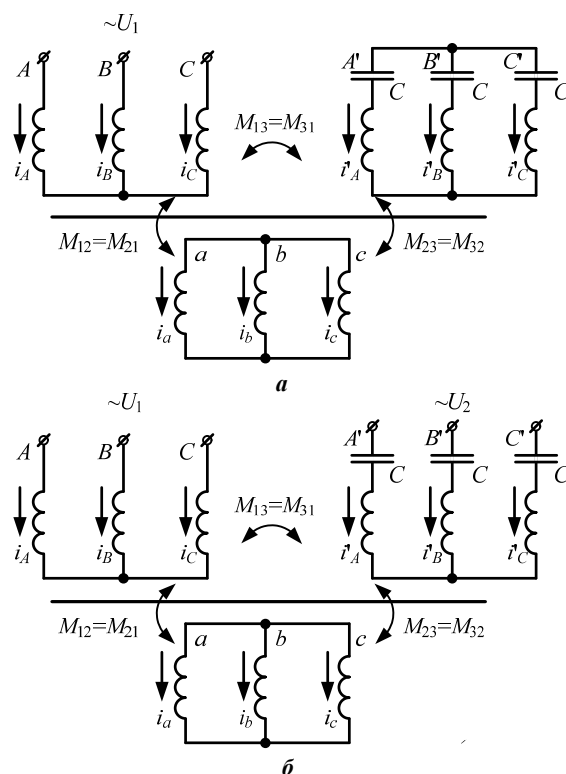


Рис. 1. Системы с двумя обмотками на статоре

Этим системам соответствуют электрические схемы замещения, представленные на рис. 2, а и б.

Математическое описание стационарного нагрузочного режима АД с двумя обмотками на статоре с учетом электромагнитных процессов по схемам рис. 1 и 2 в общем случае может быть представлено системой уравнений, записанных в комплексном виде [1]:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = (R_1 + jX_1)\dot{I}_1 + jX_m\dot{I}_2 + jX_m\dot{I}_3; \\ 0 = jX_m\dot{I}_1 + ((R_2/S) + jX_2)\dot{I}_2 + jX_m\dot{I}_3; \\ \dot{U}_2 = jX_m\dot{I}_1 + jX_m\dot{I}_2 + [R_3 + j(X_3 - X_C)]\dot{I}_3; \\ \dot{I}_m = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3; \\ \dot{I}_C = \dot{I}_1 + \dot{I}_3; \\ \dot{U}_1 = U_{1m}e^{j\theta}; \\ \dot{U}_2 = U_{2m}e^{j\gamma}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\dot{U}_1 = U_{1m}e^{j\theta}$ – вектор фазного напряжения, приложенного к обмотке 1 статора (рис. 3); $\dot{U}_2 = U_{2m}e^{j\gamma} = U_2(\cos\gamma + js\sin\gamma)$ – вектор фазного напряжения, приложенного к обмотке 2 статора; U_1, U_2 – действующие значения фазных напряжений обмоток; $\gamma = 0 \div (\pm 180^\circ)$ – фазовый сдвиг вектора напряжения $\dot{U}_2$ относительно вектора $\dot{U}_1$; $\dot{I}_C = \dot{I}_1 + \dot{I}_3$ – суммарный ток статора; R_1, R_2, R_3 – активные сопротивления обмоток двигателя; $X_1 = 1,5X_{mf} + X_{16}$; $X_2 = 1,5X_{mf} + X_{26}$; $X_3 = 1,5X_{mf} + X_{36}$; $X_m = 1,5X_{mf}$; X_m – индуктивные сопротивления обмоток и намагничивающего контура двигателя; X_{mf} – индуктивное сопротивление намагничивающего контура фазы двигателя; X_C – сопротивление конденсаторной батареи фазы.

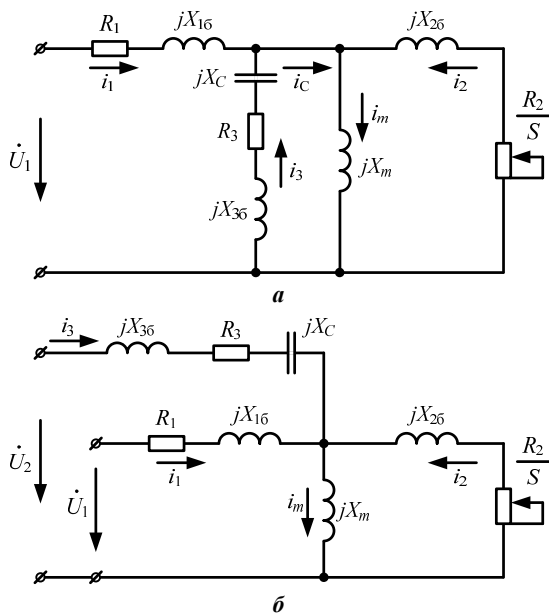


Рис. 2. Схемы замещения АД с двумя обмотками на статоре для вариантов систем:
а – с электромагнитной связью; б – с электромагнитной связью и раздельным питанием обмоток статора

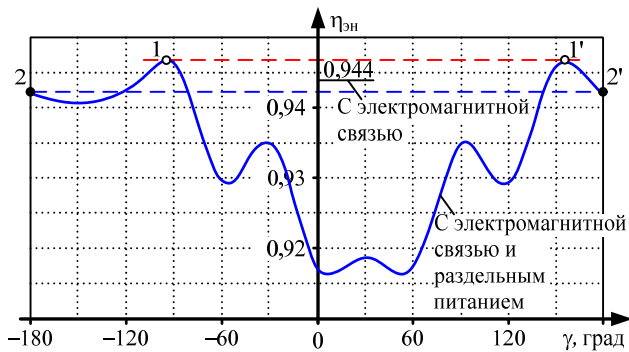


Рис. 3. Зависимость энергетического КПД от фазового сдвига векторов напряжения $\eta_{эн} = f(\gamma)$ (0,944 – значение $\eta_{эн}$ для АД с электромагнитной связью обмоток статора)

Для системы уравнений (1) матрица третьего порядка

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_1 + jX_1 & jX_m & jX_m \\ jX_m & (R_2 / S) + jX_2 & jX_m \\ jX_m & jX_m & R_3 + j(X_3 - X_c) \end{vmatrix} \quad (2)$$

Определитель (детерминант) третьего порядка, соответствующий этой матрице, вычисляется по правилу

$$\Delta = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix}.$$

Решение матрицы после перемножения сомножителей и группировки слагаемых на вещественную и мнимую части имеет следующее выражение:

$$\begin{aligned} \Delta = & (R_2 / S) [R_1 R_3 - X_1 (X_3 - X_c) + X_m^2] + \\ & + R_1 [X_m^2 - X_2 (X_3 - X_c)] + R_3 (X_m^2 - X_1 X_2) + \\ & + R_3 (X_m^2 - X_1 X_2) + \\ & + j \{ (R_2 / S) [R_1 (X_3 - X_c) + R_3 X_1] + \\ & + X_m^2 [X_1 + X_2 + (X_3 - X_c) - \\ & - 2X_m^3 + R_1 R_3 X_2 - X_1 X_2 (X_3 - X_c)] \}. \end{aligned} \quad (3)$$

При $\Delta = \det A \neq 0$ решение системы уравнений (1) единственно и находится по формулам Крамера: $X_i = \Delta_i / \Delta$, $i = 1, 2, 3$. В них определитель Δ_i называется определителем неизвестного X_i и получается из определителя A заменой i -го столбца столбцом свободных членов.

Для тока I_1

$$\begin{aligned} \Delta_1 = & \begin{vmatrix} \dot{U}_1 & jX_m & jX_m \\ 0 & (R_2 / S) + jX_2 & jX_m \\ \dot{U}_2 & jX_m & R_3 + j(X_3 - X_c) \end{vmatrix} = \\ = & \dot{U}_1 \{ (R_2 / S) R_3 + X_m^2 - X_m (X_3 - X_c) + \\ & + j [R_3 X_m + (R_2 / S) (X_3 - X_c)] \} + \\ & + \dot{U}_2 (X_m^2 - j(R_2 / S) X_m). \end{aligned} \quad (4)$$

Для тока I_2

$$\begin{aligned} \Delta_2 = & \begin{vmatrix} R_1 + jX_1 & \dot{U}_1 & jX_m \\ jX_m & 0 & jX_m \\ jX_m & \dot{U}_2 & R_3 + j(X_3 - X_c) \end{vmatrix} = \\ = & \dot{U}_1 [X_m (X_3 - X_c) - X_m^2 - jR_3 X_m] + \\ & + \dot{U}_2 [X_m^2 + X_1 X_m - jR_1 X_m]. \end{aligned} \quad (5)$$

Для тока I_3

$$\begin{aligned} \Delta_3 = & \begin{vmatrix} R_1 + jX_1 & jX_m & \dot{U}_1 \\ jX_m & (R_2 / S) + jX_2 & 0 \\ jX_m & jX_m & \dot{U}_2 \end{vmatrix} = \\ = & \dot{U}_1 [X_m (X_2 - X_m) - j(R_2 / S) X_m] + \\ & + \dot{U}_2 [(X_m^2 - X_1 X_2 + (R_2 / S) R_1) + \\ & + j((R_2 / S) X_1 + R_1 X_1)]. \end{aligned} \quad (6)$$

Как следует из формул (4), (5), (6), токи в обмотках двигателя имеют две составляющие: одна от действия источника напряжения $\dot{U}_1$, другая – от $\dot{U}_2 = U_2 (\cos \gamma + j \sin \gamma)$. После подстановки значения $\dot{U}_2$ в формулы (4), (5), (6), имеем следующие выражения для определителей Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 :

$$\Delta_1 = \dot{U}_1 \left\{ (R_2 / S) R_3 - X_m^2 - X_m (X_3 - X_c) + \right. \\ \left. + j \left[R_3 X_m + (R_2 / S) (X_3 - X_c) \right] \right\} + \\ + \dot{U}_2 \left[(X_m^2 \cos \gamma + (R_2 / S) X_m \sin \gamma) + \right. \\ \left. + j (X_m^2 \sin \gamma - (R_2 / S) X_m \cos \gamma) \right]; \quad (7)$$

$$\Delta_2 = \dot{U}_1 \left\{ [(X_m (X_3 - X_c) - X_m^2) - j R_3 X_m] + \right. \\ \left. + \dot{U}_2 \left\{ [(X_m^2 + X_1 X_m) \cos \gamma + R_1 X_m \sin \gamma] + \right. \right. \\ \left. \left. + j [(X_m^2 + X_1 X_m) \sin \gamma - R_1 X_m \cos \gamma] \right\} \right\}; \quad (8)$$

$$\Delta_3 = \dot{U}_1 \left\{ [X_m (X_2 - X_m)] - (j (R_2 / S) X_m) \right\} + \\ + \dot{U}_2 \left\{ [(X_m^2 - X_1 X_2 + (R_2 / S) R_1) \cos \gamma - \right. \\ \left. - ((R_2 / S) X_1) + R_1 X_2) \sin \gamma] + \right. \\ \left. + j [(X_m^2 - X_1 X_2 + (R_2 / S) R_1) \sin \gamma + \right. \\ \left. + ((R_2 / S) X_1 + R_1 X_2) \cos \gamma] \right\}. \quad (9)$$

Обозначая коэффициентами вещественные и мнимые части в формулах (3), (7), (8), (9) последовательно через $a_1, a_2, a_3, a_3', a_4, a_4', a_5, a_5', a_6, a_6', a_7, a_7', a_8, a_8'$, составим окончательные формулы для расчетов токов $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_c, \dot{I}_m$

$$\dot{I}_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \dot{U}_1 \left[\frac{a_1 a_3 + a_2 a_4}{a_1^2 + a_2^2} + j \frac{a_1 a_4 - a_2 a_3}{a_1^2 + a_2^2} \right] + \\ + \dot{U}_2 \left[\frac{a_1 a_3' + a_2 a_4'}{a_1^2 + a_2^2} + j \frac{a_1 a_4' - a_2 a_3'}{a_1^2 + a_2^2} \right]; \quad (10)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \dot{U}_1 \left[\frac{a_1 a_5 + a_2 a_6}{a_1^2 + a_2^2} + j \frac{a_1 a_6 - a_2 a_5}{a_1^2 + a_2^2} \right] + \\ + \dot{U}_2 \left[\frac{a_1 a_5' + a_2 a_6'}{a_1^2 + a_2^2} + j \frac{a_1 a_6' - a_2 a_5'}{a_1^2 + a_2^2} \right]; \quad (11)$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \dot{U}_1 \left[\frac{a_1 a_7 + a_2 a_8}{a_1^2 + a_2^2} + j \frac{a_1 a_8 - a_2 a_7}{a_1^2 + a_2^2} \right] + \\ + \dot{U}_2 \left[\frac{a_1 a_7' + a_2 a_8'}{a_1^2 + a_2^2} + j \frac{a_1 a_8' - a_2 a_7'}{a_1^2 + a_2^2} \right]. \quad (12)$$

Для энергосберегающего АД, реконструированного на основе двигателя 4A225M4Y3 со следующими параметрами: $P_n = 55$ кВт, $U_{нф} = 220$ В, $I_n = 100,1$ А, $f_{1н} = 50$ Гц, $\omega_0 = 157,1$ 1/с, $X_m = 20,57$ Ом, $X_1 = 20,67$ Ом, $X_2 = 20,73$ Ом, $X_3 = 20,65$ Ом, $R_1 = 0,055$ Ом, $R_2 = 0,065$ Ом, $R_3 = 0,046$ Ом, $S_n = 0,0274$, $M_n = 360$ Нм (параметры двигателя приведены в обмотке статора), произведены расчеты действующих значений токов $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_c, \dot{I}_m$, КПД $\eta = P_2 / P_c \cos \phi_c$, энергетический КПД $\eta_{эн} = \eta \cos \phi_c$ для схем **рис. 1, 2** при $X_c = 10$ Ом ($C = 319$ мкФ) и различных фазовых сдвигах векторов напряжений $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$. Значения величины скольжения взяты из материалов исследования динамических режимов энергосберегающего АД [2].

Результаты расчетов представлены в виде графика зависимости энергетического КПД $\eta_{эн} = f(\gamma)$, которая представлена на **рис. 3**. Здесь же показано значение $\eta_{эн}$ для нагрузочного режима энергосберегающего АД только с электромагнитной связью обмоток статора. Его значение составляет 0,944.

Для сопоставления следует отметить, что энергетический КПД базового двигателя до реконструкции имел значение $\eta_{энн} = \eta_n \cos \phi_{нн} = 0,925 \cdot 0,9 = 0,833$. Откуда видно, что реконструкция двигателя позволила на 11% повысить энергетический КПД двигателя.

Для случая отдельного питания обмоток статора в экстремальных точках 1 и 1' энергетический КПД имеет незначительное превышение. Точки 2 и 2' на **рис. 3** соответствуют подаче напряжения U_2 на компенсирующую обмотку в противофазе напряжению U_1 . Откуда видно, что питание компенсирующей обмотки от сети не дает дополнительного эффекта.

Выводы

1. Разработано математическое описание стационарного режима энергосберегающего АД с двумя обмотками на статоре и питанием от источников напряжения с фазовым сдвигом векторов $\dot{U}_1, \dot{U}_2$ с электрической и электромагнитной связью этих обмоток, позволяющее производить расчеты показателей энергетической эффективности различных систем АД с совмещенными обмотками.

2. Расчеты нагрузочных режимов доказали, что энергетические показатели энергосберегающего АД с двумя обмотками на статоре и питанием их от двух источников $\dot{U}_1 = U_{1m} e^{j0}$ и $\dot{U}_2 = U_{2m} e^{j\gamma}$ зависят от фазового сдвига векторов γ . Энергетический КПД $\eta_{эн} = \eta \cos \phi_c$ является сложной функцией фазового сдвига векторов напряжения, а его значения меняются в пределах от 0,917 ($\gamma = 0$) до 0,946 ($\gamma = 150^\circ$).

3. Наиболее экономичный режим энергосберегающего АД достигается в варианте системы при наличии только электромагнитной связи обмоток. Для исследуемого двигателя при емкости конденсаторной батареи $C = 319$ мкФ ($X_c = 10$ Ом энергетический КПД оценивается величиной $\eta_{эн} = 0,944$, что на 11% превышает номинальное значение (**рис. 3**).

4. Система с электромагнитной связью и отдельным питанием обмоток с регулированием фазового сдвига между напряжениями $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ не дает заметного эффекта в повышении энергетического КПД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный электропривод / под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. М.: Энергоатомиздат, 1990, 544 с.: ил.
2. Мугалимов Р.Г., Косматов В.И., Мугалимова А.Р. Математическое описание электропривода на основе энергосберегающего асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал (Russian Internet Journal of Industrial Engineering). 2013. №2. С. 78–89.
3. Никифоров Г.В. Энерго- и ресурсосбережение – основные направления развития электроприводов ОАО «ММК» в условиях рыночной экономики // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004, Магнитогорск, 14–17 сентября 2004 г.) Ч. I. Магнитогорск, 2004. С. 5–8.

4. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Проблемы и перспективы развития электропривода // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Т. 1. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 5–9.
5. Дуюнов Д.А. Асинхронный двигатель с совмещенными обмотками // Энергосвет. 2013. №2(27). С.19–25.
6. Разработка и освоение асинхронных электродвигателей АЭД энергоэффективности 7AVE: некоторые итоги и дальнейшие задачи / В.Я. Беспалов, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров // Труды VII Международной (XIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2012. С. 13–16.
7. Мугалимов Р.Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и электроприводы на их основе: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 250 с.
8. Пат. 2112307 RU, МКИ 6 H02 K 17/28. Асинхронная компенсированная электрическая машина / Р.Г. Мугалимов, А.Л. Савицкий, Л.Д. Савицкая // Открытия. Изобретения. 2009. №15.
9. Мугалимов Р.Г. Концепция повышения энергоэффективности асинхронных двигателей и электроприводов на их основе // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №1. С. 59–63.
10. Мухаматшин А.И., Корнилов В.Ю. Метод контроля энергетических характеристик электропривода на базе асинхронного электродвигателя с комбинированной двухслойной обмоткой // Труды IX Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. 2016. С.77–80.
11. Холбаев Д.Ж., Файзуллаев К.М. Энергосбережение при внедрении в производство асинхронных двигателей с совмещенными обмотками (АДСО) // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2016. URL: <https://online-electric.ru/articles.php?id=152>
12. Лесков И.А., Троценко В.М., Калимуллин А.Т. Новые разработки в плане энергоэффективности асинхронных двигателей. Экономический расчет асинхронного двигателя с совмещенной обмоткой // Естественные и технические науки. 2015. №2.
13. Yuji O., Kazuto Sakai. Permanent Magnet Motor Capable of Changing the Number of Poles by a Factor of Three // International Conference on Electrical Machines and Systems. 2013. Busan, Korea. P. 1122–1126.
14. William R., William Finley, Mark Hodowanec, Warren Holter. Diagnosing motor vibration problems // Conference Record of 2000 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. 2000. 19–23. P. 165–180.
15. Bose B. Modern Power Electronics and AC Drives. Beijing, China Machine Press, 2003.
16. Hao Z., Rong-xiang Zhao, Huan Yang, Hui Cai. A Vibration Mitigation Approach for Inverter-fed Permanent Magnet Motor Drive System // IEEE SENSORS JOURNAL. 2009. P. 2017–2022.

Поступила в редакцию 01 марта 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INVESTIGATION OF THE OPERATING MODES OF ELECTRIC DRIVES WITH AN INDUCTION MOTOR WITH TWO STATOR WINDINGS

Valeriy I. Kosmatov

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

Anvar S. Sarvarov

Ph.D. (Eng.), Professor, the Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: anvar@magtu.ru.

Egor I. Danilov

Master's degree student, the Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The authors demonstrated the importance of the problem of improving the energy characteristics of the constant speed induction electric drive when it operates in the modes of systematic underload. The main solutions to the problem were analyzed, in particular, the attention was paid to the transfer to stator windings of new design as a result of repair operations. Thus, it is noted that it is of special interest to implement the concept of energy saving in induction electric drives due to application of individual compensation when windings of new design are placed in the rotor slots. Mathematical description of load modes was developed for induction electric drives with an energy saving motor with two stator windings. Two variants of design are considered, the first one, where only electromagnetic link is provided between the stator windings, and the second one providing both electromagnetic and electric connection through the power source between the windings. A set of equations made for the investigated variants of replacement induction motors with the one with two stator windings and the solution of these equations were used to obtain analytic dependences, which make it possible to calculate the actual

values of phase currents. Complex amplitude method and the method of space vectors (structure modeling) were used to study the load modes of electric drives in static and the dependence of energy efficiency was developed for the variant where only electromagnetic connection with the compensating winding is provided and for the variant where both electromagnetic connection and separate power supply of windings is provided from power sources. It was found that when only electromagnetic connection is provided, significant improvement of energy efficiency is achieved. When separate power supply is provided, one can obtain additional insignificant improvement of this characteristic (less than 0.5%) for certain values of phase shift of supply voltages. The obtained energy saving effect is insignificant, thus, it is believed that the variant of design with the electromagnetic connection only is more preferable.

Keywords: induction motor, double-layer winding, compensating winding, electromagnetic connection, separate power supply, equivalent circuits, mathematical description, energy efficiency.

REFERENCES

1. *Avtomatizirovannyi electropriwod* [Automatic electric drive]. Ed/ N.F. Ilyinskiy, M.G. Yunkov. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 544 p. (In Russian)
2. Mugalimov R.G., Kosmatov V.I., Mugalimova A.R. Mathematical description of electric drive based on an energy saving induction motor with individual compensation of reactive power. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2, pp. 78-89. (In Russian)
3. Nikiforov G.V. Energy and resource saving as the main fields of electric drive development at OJSC MMK in the market economy. *Trudy IV Mezhdunarodnoy (XV Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu «Avtomatizirovannyi elektroprivod v XXI veke: puti razvitiya»* [Papers of IV International (XV All-Russian) conference on automatic electric drive "Automatic electric drive in the XXI century: development trends"] (AEP-2004, Magnitogorsk, September 14-17, 2004). Part I. Magnitogorsk, 2004, pp. 5-8. (In Russian)
4. Onischenko G.B., Yunkov M.G. Problems and development prospects of electric drive. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Papers of VIII International (XIX All-Russian) conference on electric drive AEP-2014]. Vol. 1. Saransk: Publishing center of Mordoviya University, 2014, pp. 5-9. (In Russian)
5. Duyunov D.A. Induction motor with combined windings. *Energosovet* [Energy council], 2013, no. 2(27), pp.19-25. (In Russian)
6. Bepalov V.Ya., Kobelev A.S., Kruglikov O.V., Makarov L.N. Design and application of induction motors AED of 7AVE energy efficiency class: results and further tasks. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Papers of International (XIII All-Russian) scientific conference on automatic electric drive]: Ivanovo Lenin State Power University». Ivanovo, 2012, pp. 13-16. (In Russian)
7. Mugalimov R.G. *Asinkhronnye dvigateli s individualnoy kompensatsiey reaktivnoy moschnosti i elektroprivody na ikh osnove* [Induction motors with individual compensation of reactive power and electric drives based on them]. Magnitogorsk: Pub. Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011. 250 p. (In Russian)
8. Mugalimov R.G., Savitskiy A.L., Savitskaya L.D. *Asinkhronnaya kompensirovannaya elektricheskaya mashina* [Induction compensated electrical machine]. Patent RF, no. 2112307, 2009.
9. Mugalimov R.G. Improvement of energy efficiency of induction motors and electric drives based on them. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 1, pp. 59-63. (In Russian)
10. Mukhametshin A.I., Kornilov V.Yu. Method of control of energy characteristics of the electric drive based on an induction electric drive with combined two-layer winding. *Trudy LX Mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016* [Papers of IX International (XX All-Russian) scientific conference on automatic electric drive AEP-2016]. 2016, pp. 77-80. (In Russian)
11. Kholbaev D.Zh., Faizullaev K.M. Energy saving during introduction of induction motors with combined windings. On-line electrician: Electrical engineering. New technology, 2016. URL: <https://online-electric.ru/articles.php?id=152> (In Russian)
12. Leskov I.A., Trotsenko V.M., Kalimullin A.T. Recent developments in the field of energy efficiency of induction motors. Economic design of an induction motor with combined winding. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Electronic scientific journal "Natural and technical sciences"]. 2015, no. 2. (In Russian)
13. Yuji O., Kazuto Sakai. Permanent Magnet Motor Capable of Changing the Number of Poles by a Factor of Three. International Conference on Electrical Machines and Systems. 2013. Busan, Korea. pp. 1122-1126.
14. William R., William Finley, Mark Hodowanec, Warren Holter. Diagnosing motor vibration problems. Conference Record of 2000 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. 2000, 19-23, pp. 165-180.
15. Bose B. Modern Power Electronics and AC Drives. Beijing, China Machine Press, 2003.
16. Hao Z., Rong-xiang Zhao, Huan Yang, Hui Cai. A Vibration Mitigation Approach for Inverter-fed Permanent Magnet Motor Drive System. IEEE SENSORS JOURNAL. 2009, pp. 2017-2022.

Косматов В.И., Сарваров А.С., Данилов Е.И. Исследование нагрузочных режимов электроприводов с асинхронным двигателем с двумя обмотками на статоре // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2(39). С. 12-17. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-12-17](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-12-17)

Kosmatov V.I., Sarvarov A.S., Danilov E.I. Investigation of the Operating Modes of Electric Drives with an Induction Motor with Two Stator Windings. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 12-17. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-12-17](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-12-17)

ОБЗОР ПОДХОДОВ К ТРЕХФАЗНОМУ ОЦЕНИВАНИЮ СОСТОЯНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

В последнее время в энергетике все большее внимание уделяется распределительным сетям (РС). Улучшается их техническое оснащение, растет потребность в применении современных комплексов и методов, направленных на совершенствование подходов к управлению режимами работы РС. Ввиду грядущих перспектив: внедрения технологий умных сетей в данной области, а также постепенного преобразования РС в более сложные структуры, частично напоминающие по своей основе магистральные сети, в ближайшем будущем может появиться потребность в оценивании состояния (ОС) РС. В статье рассматриваются наиболее распространенные способы ОС, применимые к РС любого вида, как отечественным, так и зарубежным. Ввиду отличий РС от магистральных сетей для их оценивания предложено использование трехфазной модели электрической сети (ЭС) и алгоритмов, где в качестве элементов вектора состояния выступают параметры каждой из фаз. Для трехфазной модели приведен разбор плюсов и минусов постановок задачи ОС, базирующихся на методе взвешенных наименьших квадратов (МВНК), когда в качестве элементов вектора состояния выступают токи и напряжения, записанные в полярной или прямоугольной формах. Анализируются достоинства и недостатки применения альтернативных формулировок задачи ОС. В статье рассматриваются актуальные проблемы РС, решение которых можно найти путем применения алгоритмов ОС, а также строящихся на их основе методов. Кроме того, анализируются возможности использования методов анализа наблюдаемости трехфазной модели, а также поиска топологических ошибок и поиска плохих данных в векторе измерений.

Ключевые слова: оценивание состояния, распределительные сети, трехфазное оценивание состояния, трехфазная модель электрической сети, измерения трехфазной сети, анализ наблюдаемости трехфазной сети, поиск плохих данных трехфазной сети, поиск топологических ошибок в конфигурации трехфазной сети, метод взвешенных наименьших квадратов, умные сети.

ВВЕДЕНИЕ

Изначально РС проектировались исключительно для передачи электрической энергии до потребителей, но со временем их применение перестало ограничиваться только данным функционалом. У потребителей появлялись небольшие источники генерации, стали внедряться и развиваться концепции умных РС, создаваться розничные рынки электроэнергии и мощности, позволяющие потребителям оптимизировать расходы при выстраивании своего потребления в зависимости от рыночной цены [1-5]. В распределительные системы стали внедряться технологии зависимого потребления от спроса [6]. К данным факторам можно также добавить рост числа устройств с емкостными энергетическими накопителями и электромобилей, которые, находясь на парковке, в теории могут использоваться, как дополнительный источник аккумулирования энергии в часы минимума потребления и ее выдачи в часы пиковой нагрузки [7]. Потоки мощности в РС перестают быть однонаправленными, в таких сетях начинают появляться новые измерительные комплексы [1, 3, 6]. Для определения действительного режима работы РС у ее диспетчеров возрастает потребность в применении алгоритмов ОС.

Повышается качество информационно-управляющих систем, эксплуатируемых в РС для диспетчеризации, о чем можно судить по вводу современных оперативно-информационных комплексов. АО «Теласи», одна из крупнейших сетевых компаний Грузии, осуществляющая эксплуатацию РС г. Тбилиси, в декабре 2014 года ввела в промышленную эксплуатацию оперативно-информационный комплекс СК-2007. Екатеринбургская

электросетевая компания в марте 2016 года ввела в опытную эксплуатацию программно-технологический комплекс автоматизированной системы диспетчерского управления СК-11. Стоит отметить, что на тот момент СК-11 являлся самым современным комплексом в линейке производителя и параллельно проходил опытную эксплуатацию в Системном операторе ЕЭС России.

По версии авторов [1], на настоящий момент одной из основных причин отсутствия примеров внедрения алгоритмов ОС в РС является недостаточное финансирование последних. Также к этому можно добавить наличие более приоритетных проблем, которые требуют первоочередного решения в данной области. Пока модернизация РС только идет и существующие подходы к оценке режима их работы будут давать хорошие результаты, велика вероятность, что методы ОС внедряться в них не будут. С дальнейшим развитием рынков и внедрением новых технологий ОС РС должно стать широко востребованным.

Основные отличия распределительных сетей от магистральных

Для наибольшей эффективности подход к ОС должен максимально просто учитывать имеющиеся особенности систем, к которым его применяют. По версии авторов [2], для магистральных сетей наибольшее распространение получил метод ОС, где в качестве вектора состояния выступают напряжения в полярной форме, так как получаемая с помощью него система уравнений будет содержать минимальное число неизвестных, ввиду кольцевой топологии, и может быть разделена на две подзадачи: для активных и реактивных мощностей.

В таблице приведено сравнение основных параметров магистральных и РС, оказывающих наибольшее влияние на различные постановки задачи ОС.

Сравнение параметров магистральных и распределительных сетей

Сравниваемый параметр	Магистральные сети	Распределительные сети
Распределение нагрузок в фазах	Нагрузки распределены симметрично	Нагрузки по фазам распределены несимметрично
Параметры схемы замещения	ВЛ, связывающие участки сети, могут быть короткими и длинными, что ухудшает обусловленность некоторых постановок. Отношение R/X мало. Связывающие участки сети элементы могут быть только трехфазными. Телесигналы состояния имеют все объекты, о состоянии которых необходимо знать для управления сетями	Если рассматривать различные виды РС и классы их напряжений, то проблема протяженностей линий может быть выражена еще сильнее, чем для магистральных сетей [8]. Отношение R/X велико. В зависимости от класса напряжения в РС могут встречаться неполнофазные ответвления. Телесигналы состояния имеет малая часть оборудования [9, 10]
Конфигурация сети	Закольцованная сеть, где порядок узлов в модели приблизительно равен 1000	Радиальная сеть с перспективами работы в кольце. Порядок узлов в модели исчисляется 10 000–100 000
Доступные измерения	Присутствует избыточность измерений. Распространены измерения потоков/инъекций мощности, напряжений, векторные измерения (на некоторых важных объектах), нулевой последовательности токов и напряжений (на фидерах подстанций)	В типовой РС отсутствует избыточность измерений. Измерениями обычно оснащены только фидеры подстанций. Наиболее распространены измерения потоков/инъекций тока, напряжений, нулевой последовательности токов и напряжений (встречаются на фидерах подстанций). В последнее время стали активно внедряются умные счетчики

Исходя из **таблицы**, можно сделать вывод, что успешно применяемые к магистральным сетям методы ОС нельзя напрямую использовать для РС ввиду ряда их особенностей. Получившая широкое распространение в магистральных сетях классическая постановка задачи ОС в напряжениях теряет свои преимущества при использовании в области РС. Следовательно, необходима разработка, адаптация подходов к ОС РС, учитывающая их особенности.

Актуальные проблемы распределительных сетей, решаемые с применением алгоритмов оценивания состояния

Перед тем как делать заключение о необходимости разработки алгоритмов ОС для РС, важно выделить перечень их актуальных проблем, которые могут быть решены с помощью разрабатываемых методов. Для текущего уровня развития РС довольно остро стоят проблемы получения актуальной режимной схемы, поиска повреждений, снижения потерь и оптимизации режимов работы, диспетчеризации распределенной генерации, получения наиболее вероятного режима, контроля напряжений и токовой нагрузки [11, 12]. Важной проблемой для диспетчеров РС является определение текущего состояния ее сетевых элементов. Для РС разных стран эта проблема имеет даже большую важность, чем само по себе ОС ЭС [13]. Проблема осложняется недостаточным количеством измерительных устройств в этих сетях, поэтому определить область нахождения отключенного участка, например в результате аварии, чаще удается только по телефонным звонкам от потребителей. Решение перечисленных задач может быть получено при внедрении алгоритмов ОС в РС, а также созданных на их основе методов, описание которых в классической форме может быть найдено в [14–16]. В ближайшей перспективе ОС РС должно решать проблему получения данных, необ-

ходимых для построения умных сетей [5], внедрения современных рыночных механизмов, достоверизации телеметрии.

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Важной частью любого алгоритма ОС является математическая модель ЭС. В первых исследованиях по данной тематике для ОС РС применялась линейная модель, основанная на прямой последовательности, хорошо зарекомендовавшая себя в ОС магистральных сетей. Дальнейшие исследования в данной области привели к выводу, что такое упрощение применять нельзя ввиду несимметричности режимов работы РС [3, 8], так как оно может привести к существенным ошибкам в результатах решения задач ОС и расчета установившегося режима (УР). Несмотря на старания энергетических компаний равномерно распределить нагрузку потребителей по фазам сети, небаланса избежать не удастся. При анализе фазовых нагрузок одной из компаний РС авторами в [17] был сделан вывод, что уровень несимметрии доходит до 17%, что существенно. Поэтому последние работы в области ОС РС в большей мере сосредотачиваются на трехфазной модели, о чем можно судить исходя из представленного в конце данной статьи списка литературы.

В [17–19] представлены результаты исследований, как отсутствие транспозиции и наличие небаланса в фазах влияет на конечные результаты ОС и расчета УР при использовании линейной модели, основанной на прямой последовательности, и полной трехфазной модели. Отсутствие транспозиции оказывает незначительное влияние, в то время как наличие небалансов может сильно повлиять на результат расчета. Также в некоторых ситуациях при значительном уровне фазного небаланса и использовании однолинейной модели алгоритмы поиска плохих данных могут давать невер-

ный результат [19]. В [20] на примере типовой 13 узловой РС приведены графики, как в процессе ОС будет снижаться СКО ошибок начального набора измерений при использовании однолинейной и трехфазной моделей. Для рассматриваемой сети, если СКО ошибок измерений начального набора было меньше 1,5%, то получаемый после ОС набор имел большее отклонение.

На первых этапах некоторые методы ОС для РС разрабатывались с допущением, что данный вид сетей обычно имеет радиальную структуру [21, 22]. При дальнейшем развитии РС стало очевидным, что из-за ряда факторов такие сети постепенно будут становиться закольцованными, а значит, в разрабатываемых методах ОС нельзя закладываться на их текущую, преимущественно радиальную, структуру [23].

При разработке алгоритмов ОС необходимо помнить, что отношение $г/х$ в РС является гораздо большей величиной, чем в магистральных, а значит, невозможно выполнять разделение задачи без потери точности решения [24]. Конечно, возможность разделения задачи будет зависеть от параметров конкретной модели ЭС и для некоторых моделей, вероятно, разделение будет приемлемо [25]. Но если же рассматривать общий случай, то от разделения стоит отказаться для повышения точности алгоритма ОС.

ИЗМЕРЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Для ОС РС требуется разработка и применение методов, способных учитывать псевдоизмерения, а также большое количество разнотипной измеренной информации, взаимодействовать с аналоговыми и цифровыми данными, использовать данные таких источников, как SCADA, векторных измерений, умных счетчиков и т.д. [1-3, 6]. В текущем разделе будут рассмотрены основные источники исходной информации, используемые для ОС ЭС.

Существующие виды измерительных приборов

Основным источником данных для получения наиболее вероятного режима работы РС алгоритмами ОС являются измерения, передаваемые в диспетчерские центры с различных энергетических объектов, состояние которых должно контролироваться. В связи с развитием РС отмечается рост внедрения различных измерительных устройств [26]. В РС могут встречаться следующие типы измерений:

1. Модули потоков/инъекций тока – наиболее распространенный тип измерений [6, 9, 10, 12, 27, 28], могут измеряться для каждой фазы [29].
2. Напряжения – встречаются в основном на подстанциях [6, 9, 10, 27, 28, 30], наиболее распространены измерения междупазных напряжений [29].
3. Измерения умных счетчиков – активно устанавливаются в современных РС [1, 10, 12, 13, 29].
4. Напряжения и токи нулевой последовательности – встречаются на фидерах подстанций [17].
5. Потоки/инъекции активной/реактивной мощности – в РС практически не встречаются [1, 9, 10, 29-31].
6. Векторные измерения – отсутствуют, могут быть установлены на подстанциях, о перспективах их применения в РС упоминается лишь в нескольких источниках [4, 5, 32, 33].

Алгоритмы ОС РС обязательно должны обрабатывать стандартный набор измерений, преобладающий

в сетях данного вида – потоки/инъекции тока, напряжения в узлах системы [30, 34]. Активно появляющиеся в последнее время измерения умных счетчиков также должны учитываться в задаче. Согласно [5] они способны предоставлять данные о мощности, модуле напряжения, а также потреблении энергии на интервалах 5, 15, 60 мин. Необходимо, чтобы алгоритмы ОС учитывали различную дискретность измеряемых параметров. Помимо стандартно используемых, в трехфазную постановку задачи ОС для улучшения наблюдаемости могут быть включены также такие измерения, как суммарная мощность трех фаз, междупазное напряжение, токи и напряжения нулевой последовательности [17].

Псевдоизмерения

Огромное внимание в задаче ОС для РС уделяется созданию псевдозамеров для восполнения дефицита информации, необходимой для оценивания [10, 24]. Существует большое количество методов работы со статистическими данными, с помощью которых могут быть получены псевдоизмерения. В качестве источников для их генерации могут выступать:

- типовые графики, применяемые при прогнозировании [9, 10, 12, 13, 34];
- счета потребителей [9, 10, 13, 22, 34];
- ретроспективные данные [13, 34, 35];
- данные умных счетчиков [1, 12, 13].

Однако необходимую информацию для их формирования можно найти далеко не в каждом диспетчерском центре РС, поэтому другим способом получения псевдозамеров может стать метод, предложенный в [22]. В его основе лежит применение групповых коэффициентов распределения нагрузок по узлам расчетной модели, где нагрузки потребителей внутри нагрузочной группы сильно коррелируют друг с другом. В качестве псевдозамеров могут также использоваться модели, где величина каждой нагрузки будет зависеть от времени, типа дня и погодных условий. Иногда, при значительном преобладании псевдоизмерений, измеренные параметры в постановке задачи ОС могут учитываться в формате ограничений типа равенств.

Применение псевдоизмерений для восполнения дефицита данных приводит к зашумлению решения, снижению его точности, а также может порождать и другие проблемы. Так как исходный набор информации для создания псевдозамеров обычно содержит только данные об активной мощности/энергии, могут возникнуть трудности с определением реактивной нагрузки [9, 10]. Кроме того, для разных схемно-режимных ситуаций предпочтительнее иметь отличающиеся наборы ретроспективных данных [5], в противном случае это также может оказать негативное влияние на получаемое решение. При большом количестве псевдоизмерений в системе возникает ряд дополнительных проблем. Во-первых, велика вероятность отклонения от действительного состояния системы [34]. В [36] предлагается объединять, при наличии возможности, псевдозамеры в группы, что поможет улучшить точность их прогнозирования и уменьшить размерность задачи. Во-вторых, если несколько псевдоизмерений согласуется с существующими измерениями, ОС не сможет должным образом их изменить [24]. Следовательно, если согласующийся набор

псевдозамеров совместно с реальными измерениями образует критическую группу и содержит ошибки, то определить действительное состояние системы будет невозможно. В [21] отмечается, что эту проблему не удастся решить использованием маленьких величин весов или их настройкой для псевдозамеров. Также в таких условиях не удастся идентифицировать и удалить плохие данные [6].

В качестве исходной информации для формирования псевдоизмерений могут использоваться данные коммерческого учета. Это приводит к новой проблеме, хорошо описанной в [13]. Так как, исходя из квитанций потребителей, бывает сложно определить их точное место подключения, при формировании расчетной модели потребитель может быть отнесен к неправильному узлу/фазе, что скажется на дальнейших результатах. Эта проблема могла бы быть частично решена при использовании современных счетчиков, которые при снятии показаний имеют связь со спутником для определения точного времени, а значит, эту технологию можно также использовать при определении точного места подключения потребителя. В данном случае остаются сложности при определении фазы подключения, также при плохой связи со спутником местоположение измерительного комплекса может быть определено неточно.

ВАРИАНТЫ ПОСТАНОВОК ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Разновидности постановок задачи ОС в первую очередь определяются элементами вектора состояния, выбираемыми в качестве базиса, на основании которого будет находиться решение. Наиболее распространенными являются постановки в токах ветвей и напряжениях узлов (как в прямоугольных координатах, так и в полярных), также в литературе можно встретить постановку в мощностях ветвей, но данный метод не получил распространения и далее не рассматривается.

Передаваемые в диспетчерские центры измерения могут содержать ошибки. При использовании вектора состояния могут быть получены расчетные значения измерений по следующему выражению:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $z^T = [z_1, z_2, \dots, z_m]$ – вектор измерений; m – количество измерений; $x^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ – вектор состояния; n – количество переменных вектора состояния; $h^T(x) = [h_1(x_1, x_2, \dots, x_n), h_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, h_m(x_1, x_2, \dots, x_n)]$ – вектор нелинейных функций; $h_i(x)$ – нелинейная функция, с помощью которой i -е измерение z_i может быть рассчитано через вектор состояния x ; i – индекс измерения; $e^T = [e_1, e_2, \dots, e_m]$ – вектор ошибок измерений.

При использовании трехфазной модели в качестве элементов вектора состояния для различных постановок выступают параметры каждой из существующих фаз, что увеличивает размерность задачи до 3 раз относительно однолинейной постановки. Обычно задача ОС решается при применении МВНК, минимизи-

рующего квадраты невязок измерений в рамках целевой функции.

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(x))^2}{R_{ii}}, \quad (2)$$

где R – диагональная матрица дисперсий ошибок измерений.

Функция (2) может быть записана как

$$J(x) = [z - h(x)]^T \cdot [R]^{-1} \cdot [z - h(x)]. \quad (3)$$

Тогда решение (3) может быть получено итерационно при линеаризации функций измерений, где вектор состояния и его приращение находятся следующим образом:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^{k+1}, \quad (4)$$

$$\Delta x^{k+1} = (H^{(k)T} \cdot R^{-1} \cdot H^{(k)})^{-1} \times \\ \times H^{(k)T} R^{-1} (z - h(x^k)), \quad (5)$$

где k – номер итерации; H – матрица частных производных нелинейных функций измерений по переменным вектора состояния (Якобиан). Для трехфазной модели каждый измеренный параметр и каждый элемент вектора состояния должны быть включены в данную матрицу.

Помимо рассмотренного, существуют и альтернативные подходы, которые, как правило, предполагают дополнительные упрощения задачи без существенной потери в точности получаемого решения. Дальнейшее описание постановок ориентировано на использование трехфазной модели ЭС.

Классические подходы при использовании в качестве элементов вектора состояния токов

Согласно [6] наибольшее распространение для ОС РС получили подходы, где в качестве вектора состояния используются токи ветвей в полярной [23, 32, 37, 38] или прямоугольной формах [4, 30-32, 38, 39]. На каждой итерации ОС в данной постановке состоит из двух этапов – получения уточненных значений измерений и расчета напряжений в узлах системы. В первоначальном виде такие подходы учитывали только измерения потоков и инъекций тока, а также мощностей, которые переводились в токи на каждой итерации расчета, после обновления напряжений [31]. Среди плюсов данной постановки для трехфазной модели РС обычно выделяют:

- простоту функций зависимости измеренных величин от переменных вектора состояния и снижение вычислительной нагрузки;
 - возможность разделения задачи на 3 подзадачи, решаемые независимо для каждой фазы, без ввода дополнительных упрощений;
 - возможность быстрого эквивалентирования для снижения размерности;
 - отсутствие сопротивлений ЛЭП в Якобиане, что решает проблему плохой обусловленности;
 - неизменность Якобиана во время расчета.
- К минусам подхода можно отнести:
- игнорирование узловых напряжений в качестве измерений;

- выполняемый на каждой итерации расчет узловых напряжений и необходимость обновления токовых эквивалентных измерений, получаемых из измерений мощностей;

- необходимость для каждого кольца сети добавления в систему уравнения, составленного по первому закону Кирхгофа.

В целом, проведенные в [31] расчеты показали, что ОС в токах для радиальной сети выполняется приблизительно в пять раз быстрее, чем классическое ОС в напряжениях, а полученные с помощью данных подходов результаты являются аналогичными.

Необходимое приведение измерений мощностей к токам требует перерасчет весов измерений [6]. Если действий по коррекции весов не предпринимать, то при ОС не удастся учесть полученные измерения в контексте их новой погрешности. Также минус приведения заключается в том, что для его выполнения необходимо иметь как измерение активной мощности, так и измерение реактивной мощности в узле.

Для приведенной постановки поиск плохих данных в наборе измерений можно производить по значениям нормализованных невязок, а поиск плохих данных в измерениях напряжения может быть выполнен, если сравнить расчетные значения напряжений в узлах с измеренными. Так как в данной постановке расчетные значения напряжений в узлах сети зависят от принятого напряжения базисного узла, то о наличии в нем ошибки будут свидетельствовать отклонения прочих замеров напряжений от расчетных значений.

Принятое в постановке исключение напряжений из вектора измерений приводит к снижению уровня избыточности измерений, а для РС может привести и к потере наблюдаемости. Для решения этой проблемы дальнейшие модификации подхода были направлены на реализацию возможности учета напряжений в векторе измерений формулировки задачи ОС в токах без потери ее простоты и преимуществ [4, 30, 32, 37, 39]. Исходя из опубликованных результатов исследований, учет в постановке напряжений существенно улучшает точность получаемого решения, в частности величин напряжений, но возвращает параметры сопротивлений линий в матрицу Якобиана, что скажется на обусловленности задачи. В отличие от постановки в [39], при вводе измерений напряжений в [30, 37] предлагается взаимное влияние фаз не учитывать, следовательно, задачу по-прежнему можно будет разделить и решать для каждой фазы в отдельности. В [4, 32] предлагается включить в вектор состояния модуль напряжения балансирующего узла для возможности подавления в нем ошибок. В [31, 39] подчеркивается, что неправильный учет напряжений в задаче ОС РС может оказать серьезное негативное влияние на итоговое решение. Согласно [4, 32] для учета векторного измерения напряжения балансирующего узла лучше использовать прямоугольную постановку, где оно будет иметь действительную и мнимую части. Плюсом прямоугольной формы записи является сохранение линейности функций элементов Якобиана. При учете векторных измерений в постановке задачи в токах, выраженных в полярной форме, среди элементов Якобиана появляется нелинейность.

Обычно при ОС в токах на каждой итерации расчет узловых напряжений выполняется методом прямо-

го спуска. Расчет узловых напряжений существенно влияет на вычислительные характеристики ОС в токах. В [23] рассматривается возможность использования метода Ньютона-Рафсона для расчета узловых напряжений, так как он получил широкое распространение в расчетах УР и может некоторые внутренние действия выполнять параллельно. Для современной вычислительной техники применение параллельных вычислений может оказать положительное влияние на итоговое время, требующееся для решения задачи ОС, особенно, если анализируемая сеть имеет местами закольцованную структуру.

Классические подходы при использовании в качестве элементов вектора состояния напряжений

Постановки, где в качестве элементов вектора состояния используются напряжения, получили наиболее широкое распространение в сфере магистральных сетей в однолинейном виде. Для РС предпринимались попытки их адаптации как в полярной [3, 17, 20, 24, 25, 29, 34, 35, 40], так и прямоугольной [5, 25, 28, 34, 41] формах. Среди преимуществ их использования в качестве алгоритмов ОС РС выделяют:

- распространение подхода в магистральных сетях и множество примеров его успешного практического применения;
- учет широкого спектра измерений;
- возможность работы с сетями, имеющими кольцевую структуру.
- К недостаткам постановки для РС относят:
- проблему плохой обусловленности, которая для РС стоит еще более остро;
- нелинейность, усугубляющуюся при учете взаимного влияния фаз;
- отсутствие возможности разделения задачи без ввода дополнительных упрощений;
- трудности учета измерений тока как при выборе начального приближения для вектора состояния, так и для сходимости итерационного расчета.

Как можно видеть из приведенных выше характеристик, постановка имеет множество недостатков. Одним из основных является проблема плохой обусловленности. Для ее решения можно выполнять эквивалентирование коротких линий в узлы, применять блочную постановку, метод Лагранжа или Хачела для точного учета нулевого потребления транзитных узлов [16].

Другой важной проблемой рассматриваемого подхода является высокий уровень нелинейности в выражениях, на основании которых определяются расчетные значения измерений и элементы Якобиана. Так как на каждой итерации ОС выполняется их обновление, это требует времени и значительных вычислительных ресурсов [24]. Данные нелинейные функции являются более сложными, чем в постановке для однолинейной модели, и в некоторых исследованиях предпринимались попытки их упрощения. В частности, в [24] предлагается ввести упрощения, при которых тригонометрические функции примут постоянные значения ($\cos(\theta) = 1$, $\sin(\theta) = 0$) для получения неизменного Якобиана, что в ряде ситуаций может оказать негативное влияние на результаты оценивания. В [34] представлена постановка в прямоугольной форме напряжений, где для упрощения рассматривается возможность использования

токов взамен измерений мощностей, что также приводит к Якобиану, элементами которого будут являться константы. В [28] в дополнении к прошлому подходу пренебрегают взаимной индуктивностью фаз, что позволяет упростить постановку и выполнять разделение задачи. Демонстрационный расчет в [28] показал, что предложенный авторами алгоритм позволил выполнять ОС быстрее, чем представленный в [34].

Для решения проблемы, связанной с возникновением нулевых строк в Якобиане на месте измерений тока при начальном приближении вектора состояния, в [24] предлагается исключение измерений тока на первой итерации расчета. Это может привести к потере наблюдаемости ЭС. Другим методом может стать внесение небольших случайных отклонений в начальное приближение вектора состояния [16], что позволит использовать измерения тока в процессе всего итерационного расчета. В [24] показано, как наличие токовых измерений приводит к тому, что задача на каждой итерации перестает монотонно сходиться к итоговому решению, что следует относить к недостаткам подхода.

Первоначальные попытки адаптации постановки ОС в напряжениях были направлены на повышение скорости проводимых расчетов, что было связано дефицитом вычислительных мощностей. На сегодняшний день использование параллельных вычислений может дать хорошее быстродействие алгоритма даже при применении классической постановки для трехфазной модели, без дополнительных упрощений [42]. Поэтому в последних статьях по ОС РС в напряжениях большее внимание уделяется возможности учета полного спектра измерений, моделированию оборудования [29, 35].

Альтернативные подходы

В работах по ОС РС часто приводится множество отличительных характеристик магистральных сетей от распределительных. Можно встретить упоминания, что адаптировать подходы ОС магистральных сетей для РС нецелесообразно. По большей мере сторонниками этих суждений и были представлены альтернативные подходы к ОС РС, рассмотренные в данном разделе. Обычно такие алгоритмы имеют ряд упрощений: рассчитаны на сети радиальной структуры, используют только наиболее распространенные виды измерений (токи и напряжения). Большинство из альтернативных подходов к ОС РС основываются на методе последовательных приближений [13, 22, 26], когда, двигаясь от конечных потребителей к питающему узлу, выполняется балансировка измерений в соответствии с их весами, а при движении в обратном направлении выполняется расчет узловых напряжений. В дополнение к такому подходу в [26] представлен способ, позволяющий во время топологического анализа на основании имеющихся измерений получать дорасчетные параметры, а также производить установку и расчет весов. Дорасчеты могут быть довольно актуальным источником данных для РС, так как большинство их схем являются радиальными. Подобный тип данных будет гораздо точнее, чем прогнозируемые, статистические псевдоизмерения. Согласно [13] основанное на методе последовательных приближений ОС хорошо приспособлено к измерениям потоков и плохо к учету измерений напряжений. Оно может быть наиболее эф-

фективно применено только для радиальных систем. При наличии колец в нем выполняются итерационные расчеты уравнивающего тока.

В [11] представлен альтернативный подход для однолинейной модели, основанный на расчете УР, позволяющий с помощью измерений и псевдопараметров согласно их статистическим характеристикам получать приближенный электрический режим. В [12] предлагается алгоритм на основе УР и ОС МВНК для трехфазной модели, где ОС применяется для создания баланса между прогнозными значениями потребления нагрузочных групп и измеренных параметров, а расчет УР для определения потерь и, в соответствии с ними, изменения коэффициентов, используемых при расчете нагрузочных групп.

Сравнение рассмотренных подходов

Как можно видеть из предыдущих подразделов, существует множество подходов к ОС РС. В [2, 28, 34] представлено сравнение некоторых из них. Наибольший интерес среди найденных источников представляет [2]. В нем сравнение методов ОС выполняется в условиях, когда в тестовой модели ЭС число элементов вектора состояния для каждого из подходов было одинаковым. Сравнение затронуло постановки ОС в напряжениях (полярных [24] и прямоугольных [28, 31]) и токах (полярных [4] и прямоугольных [43]). Анализ показал, что результаты расчетов этими методами практически не зависят от выбора элементов вектора состояния и формы их записи, но влияют на время выполнения вычислений. Лучшими характеристиками обладали постановки задачи ОС в прямоугольной форме. Когда количество измерений напряжений преобладает над числом других измерений, постановка в напряжениях будет давать лучший результат, но так как в РС измерения напряжений обычно занимают малую часть от общего числа, выгоднее использовать постановку в токах. В [28, 34] выводы аналогичны. Согласно [2, 28, 34] метод ОС в прямоугольных токах имеет лучшие вычислительные характеристики для реальных систем, так как количество измерений напряжения в них обычно мало, по сравнению с другими типами.

АНАЛИЗ НАБЛЮДАЕМОСТИ СИСТЕМЫ

При ОС анализ наблюдаемости выполняется для определения, что для рассматриваемой модели ЭС с заданной конфигурацией измерительной аппаратуры может быть получено единственное решение. В [17, 21, 34] исследуется возможность применения классических методов анализа наблюдаемости к трехфазной модели ЭС. Делается вывод, что топологический анализ наблюдаемости в классической форме не применим к трехфазным моделям, так как за счет междофазных связей фаза без измерения согласно ему может быть идентифицирована как наблюдаемая. Но за счет того, что междофазные магнитные связи оказывают гораздо меньшее влияние, чем проводниковая, это в дальнейшем может привести к тому, что решение для данной системы в рамках ОС не будет найдено. Численные методы анализа наблюдаемости могут быть применимы к трехфазным моделям в своей стандартной постановке и подобных проблем не имеют.

Также стоит учитывать, что в трехфазную постановку задачи ОС могут быть включены разнообразные

типы измерений, например общая мощность трех фаз, величина междуфазного напряжения, токи и напряжения нулевой последовательности. Нужно принимать во внимание, что применяемые алгоритмы анализа наблюдаемости должны иметь возможность учета всех типов измерительных устройств, используемых в рамках задачи ОС.

ПОИСК ПЛОХИХ ДАННЫХ

Методы поиска плохих данных для использующих трехфазные модели алгоритмов ОС в математической постановке практически не отличаются от подходов, применяемых для однолинейной модели. К примеру, плохие данные в РС могут быть обнаружены при анализе невязок измерений или применении алгоритмов робастного ОС. Описание данных методов для однолинейной модели можно найти в [17, 38].

При поиске ошибок измерений в РС, создании специализированных алгоритмов, необходимо учитывать особенности трехфазных моделей. Во время формирования расчетной модели для ОС или привязки поступающей телеметрии могут быть поменяны местами измерения двух фаз одного узла [17]. Тогда, если режим в течение долгого времени будет сбалансированным, такую ошибку будет невозможно идентифицировать. Также в обычной ситуации будет сложно определить ошибку в параметрах линии, если они несимметричны и также были перепутаны между фазами на этапе создания модели.

ПОИСК ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ОШИБОК

Как было отмечено ранее, проблема получения актуальной топологии для РС стоит наиболее остро. Ввиду их размерности, а также слабой оснащенности измерительными устройствами, передающими в диспетчерские центры информацию об актуальном состоянии оборудования, в конфигурациях РС могут присутствовать ошибки. Обычно в постановке задачи ОС учитывается, что действительная топология ЭС известна, в противном случае результаты оценивания будут содержать ошибки, а алгоритмы поиска плохих данных будут работать неверно. Для поиска топологических ошибок, возникающих из-за неверно определенного состояния оборудования, могут использоваться алгоритмы, построенные на базе ОС.

Как было отмечено ранее, проблема получения актуальной топологии для РС стоит наиболее остро. Ввиду их размерности, а также слабой оснащенности измерительными устройствами, передающими в диспетчерские центры информацию об актуальном состоянии оборудования, в конфигурациях РС могут присутствовать ошибки. Обычно в постановке задачи ОС учитывается, что действительная топология ЭС известна, в противном случае результаты оценивания будут содержать ошибки, а алгоритмы поиска плохих данных будут работать неверно. Для поиска топологических ошибок, возникающих из-за неверно определенного состояния оборудования, могут использоваться алгоритмы, построенные на базе ОС.

В [44, 45] предлагается алгоритм поиска ошибок топологии для трехфазной РС, основанный на взвешенной сумме невязок, проверке критерия χ^2 , а также переборе возможных конфигураций для участков сети,

в которых подозревается наличие топологической ошибки. Для анализа схемы РС большой размерности, содержащей кольца и множество возможных точек разрыва, данный метод плохо применим, так как перебор возможных конфигураций потребует значительного времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние годы РС сделали существенный шаг вперед. Понятен перечень актуальных проблем РС, требующих решения с учетом ближайших перспектив. Существенную роль в их решении могут сыграть алгоритмы ОС. Ввиду особенностей РС подход к ОС должен основываться на трехфазной модели ЭС. Проведенный обзор показал, что с учетом особенностей РС наилучшим для них будет постановка задачи ОС, когда в качестве элементов вектора состояния выступают токи в прямоугольной форме. Другие подходы могут также применяться, но это может негативно сказаться на скорости выполнения расчетов.

В статье было показано, что анализ наблюдаемости трехфазной модели РС может выполняться численными методами, в то время как методы топологического анализа в классической постановке иногда приводит к ошибочному результату. Поиск плохих данных при ОС РС может осуществляться стандартными методами, например с помощью алгоритмов робастного ОС или анализа невязок, полученных в результате оценивания. Несмотря на то, что поиск топологических ошибок является наиболее приоритетной проблемой, в настоящий момент быстрые, универсальные методы ее решения для трехфазной модели сети отсутствуют, что является перспективной областью для дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Hayes and M. Prodanovic, "State Estimation Techniques for Electric Power Distribution Systems", in 2014 European Modelling Symposium, 2014, pp. 303–308.
2. M. Pau, P.A. Pegoraro, and S. Sulis, "Performance of three-phase WLS Distribution System State Estimation approaches", in 2015 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), 2015, pp. 138–143.
3. J. Chen, Y. Dong, and H. Zhang, "Distribution system state estimation: A survey of some relevant work", in 2016 35th Chinese Control Conference (CCC), 2016, pp. 9985–9989.
4. M. Pau, P.A. Pegoraro, and S. Sulis, "Branch current state estimator for distribution system based on synchronized measurements", in 2012 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS) Proceedings, 2012, pp. 1–6.
5. D.A. Haughton and G.T. Heydt, "A Linear State Estimation Formulation for Smart Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1187–1195, May 2013.
6. A. Primadianto and C.N. Lu, "A Review on Distribution System State Estimation", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 5, pp. 3875–3883, Sep. 2017.
7. U. Kuhar, J. Jurše, K. Alič, G. Kandus, and A. Švigelj, "A unified three-phase branch model for a distribution-system state estimation", in 2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2016, pp. 1–6.
8. Z. Zhang, M. Liu, and S. Xiao, "A Survey on State Estimation Algorithm of Distribution Grid", in 2012 Spring Congress on Engineering and Technology, 2012, pp. 1–4.
9. M. Baran and T.E. McDermott, "State estimation for real time monitoring of distribution feeders", in 2009 IEEE Power Energy Society General Meeting, 2009, pp. 1–4.

10. M. Baran and T. E. McDermott, "Distribution system state estimation using AMI data", in 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 2009, pp. 1–3.
11. I. Roytelman and S. M. Shahidehpour, "State estimation for electric power distribution systems in quasi real-time conditions", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 4, pp. 2009–2015, Oct. 1993.
12. I. Džafić, M. Gilles, R.A. Jabr, B.C. Pal, and S. Henselmeyer, "Real Time Estimation of Loads in Radial and Unsymmetrical Three-Phase Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 4, pp. 4839–4848, Nov. 2013.
13. R. Hoffman, "Practical state estimation for electric distribution networks", in Proc. Power Syst. Conf. Exp., Atlanta, GA, USA, 2006, pp. 510–517.
14. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1976. 220 с.
15. Гамм А.З., Голуб И.И. Наблюдаемость электроэнергетических систем. М.: Наука, 1990. 200 с.
16. A. Abur, A. Gomez-Exposito, "Power System State Estimation: Theory and Implementation", New-York: Marcel Dekker, 2004, pp. 327.
17. C. W. Hansen and A. S. Debs, "Power system state estimation using three-phase models", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 2, pp. 818–824, May 1995.
18. M.-S. Chen and T.-H. Chen, "Application of three-phase load flow to power system distribution automation", in 1991 International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-91., 1991, pp. 472–478 vol.2.
19. S. Zhong and A. Abur, "Effects of nontransposed lines and unbalanced loads on state estimation", in Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 2, Jan. 2002, pp. 975–979.
20. P. Chusovitin, I. Polyakov, and A. Pazderin, "Three-phase state estimation model for distribution grids", in 2016 IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering (ICSEE), 2016, pp. 1–5.
21. A.P.S. Meliopoulos and F. Zhang, "Multiphase power flow and state estimation for power distribution systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 2, pp. 939–946, May 1996.
22. A.K. Ghosh, D.L. Lubkeman, M.J. Downey, and R.H. Jones, "Distribution circuit state estimation using a probabilistic approach", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 1, pp. 45–51, Feb. 1997.
23. N. Blaauwbroek, P. Nguyen, M. Gibescu, and H. Sloopweg, "Branch current state estimation of three phase distribution networks suitable for parallelization", in 2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2016, pp. 1–5.
24. M.E. Baran and A. W. Kelley, "State estimation for real-time monitoring of distribution systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 3, pp. 1601–1609, Aug. 1994.
25. W.-M. Lin and J.-H. Teng, "State estimation for distribution systems with zero-injection constraints", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 1, pp. 518–524, Feb. 1996.
26. D. Thukaram, J. Jerome, and C. Surapong, "A robust three-phase state estimation algorithm for distribution networks", Electric Power Systems Research, vol. 55, no. 3, pp. 191–200, 2000.
27. W.-M. Lin, J.-H. Teng, and S.-J. Chen, "A highly efficient algorithm in treating current measurements for the branch-current-based distribution state estimation", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, no. 3, pp. 433–439, Jul. 2001.
28. W.M. Lin and J.H. Teng, "Distribution fast decoupled state estimation by measurement pairing", Transmission and Distribution IEE Proceedings - Generation, vol. 143, no. 1, pp. 43–48, Jan. 1996.
29. Y. Gao and N. Yu, "State estimation for unbalanced electric power distribution systems using AMI data", in 2017 IEEE Power Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2017, pp. 1–5.
30. J.H. Teng, "Using voltage measurements to improve the results of branch-current-based state estimators for distribution systems", Transmission and Distribution IEE Proceedings - Generation, vol. 149, no. 6, pp. 667–672, Nov. 2002.
31. M.E. Baran and A.W. Kelley, "A branch-current-based state estimation method for distribution systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 1, pp. 483–491, Feb. 1995.
32. M. Pau, P.A. Pegoraro, and S. Sulis, "Efficient Branch-Current-Based Distribution System State Estimation Including Synchronized Measurements", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 62, no. 9, pp. 2419–2429, Sep. 2013.
33. S. Sarri, M. Paolone, R. Cherkaoui, A. Borghetti, F. Napolitano, and C.A. Nucci, "State estimation of Active Distribution Networks: Comparison between WLS and iterated kalman-filter algorithm integrating PMUs", in 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), 2012, pp. 1–8.
34. C.N. Lu, J.H. Teng, and W.H.E. Liu, "Distribution system state estimation", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 1, pp. 229–240, Feb. 1995.
35. A. Majumdar and B.C. Pal, "A three-phase state estimation in unbalanced distribution networks with switch modelling", 2016 IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI), Kolkata, 2016, pp. 474–478.
36. K. Li, "State estimation for power distribution system and measurement impacts", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 2, pp. 911–916, May 1996.
37. H. Wang and N.N. Schulz, "A revised branch current-based distribution system state estimation algorithm and meter placement impact", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 1, pp. 207–213, Feb. 2004.
38. R. Lukomski, T. Okon, and K. Wilkosz, "Power System Modelling", Wroclaw University of technology: Wroclaw, 2011, 252 p.
39. M.E. Baran, J. Jung, and T.E. McDermott, "Including voltage measurements in branch current state estimation for distribution systems", in 2009 IEEE Power Energy Society General Meeting, 2009, pp. 1–5.
40. F. Magnago, L. Zhang, and R. Nagarkar, "Three phase distribution state estimation utilizing common information model", in 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, 2015, pp. 1–6.
41. Болоев Е.В., Голуб И.И., Федчишин В.В. Оценивание состояния распределительной сети низкого напряжения по измерениям интеллектуальных счетчиков // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. № 2. С. 95–106.
42. P. Chusovitin, I. Polyakov, O. Malozemova and A. Pazderin, "The usage of parallel calculations in state estimation algorithms", in 2017 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2017, pp. 1–5.
43. M. Pau, P.A. Pegoraro, and S. Sulis, "WLS distribution system state estimator based on voltages or branch-currents: Accuracy and performance comparison", in 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013, pp. 493–498.
44. M.E. Baran, J. Jung, and T.E. McDermott, "Topology error identification using branch current state estimation for distribution systems", in 2009 Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific, 2009, pp. 1–4.
45. V. Zamani and M. Baran, "Topology processing in distribution systems by Branch Current based state estimation", in 2015 North American Power Symposium (NAPS), 2015, pp. 1–5.

Поступила в редакцию 10 марта 2018 г.

A REVIEW ON THREE-PHASE STATE ESTIMATION APPROACHES OF DISTRIBUTION NETWORKS

Ilya D. Polyakov

Posgraduate Student, the Automated electrical systems department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.pazderin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0983-7021>

Andrey V. Pazderin

Ph.D. (Eng.), the Head of the Automated electrical systems department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.pazderin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4826-2387>

Recently, more attention has been paid to distribution networks in power industry. They technological infrastructure is improved and the need for modern programs and methods is growing. They should be aimed at improving approaches of distribution network control. In the near future, necessity in state estimation distribution networks can arise because smart grids technologies are introduced in this area and gradually distribution networks are transformed into more complex structures.

The most accepted state estimation approaches for any types of distribution networks are considered in the paper. In view of the differences between distribution networks and transmission grids, the usage of power system three-phase model is proposed for state estimation. A state vector in this task consists of phase parameters. The benefits and drawbacks analysis of three-phase state estimation approaches based on the weighted least squares method is presented. In this method a system state vector consists of currents or voltages written in polar or rectangular forms. The strengths and weaknesses of alternative state estimation methods applying are analyzed. Current distribution network problems are listed in the paper. They can be solved by making use of state estimation algorithms and other methods based on them. Furthermore, different approaches for network observability analysis of three-phase model, topology errors processing and bad data identification in a measurement vector are discussed.

Keywords: state estimation, distribution networks, three-phase state estimation, three-phase model of power system, three-phase measurements, network observability analysis of three-phase model, bad data identification, topology error processing in three-phase model, weighted least squares method, smart grids.

REFERENCES

1. B. Hayes and M. Prodanovic, "State Estimation Techniques for Electric Power Distribution Systems", in 2014 European Modelling Symposium, 2014, pp. 303–308.
2. M. Pau, P.A. Pegoraro, and S. Sulis, "Performance of three-phase WLS Distribution System State Estimation approaches", in 2015 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), 2015, pp. 138–143.
3. J. Chen, Y. Dong, and H. Zhang, "Distribution system state estimation: A survey of some relevant work", in 2016 35th Chinese Control Conference (CCC), 2016, pp. 9985–9989.
4. M. Pau, P.A. Pegoraro, and S. Sulis, "Branch current state estimator for distribution system based on synchronized measurements", in 2012 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS) Proceedings, 2012, pp. 1–6.
5. D.A. Haughton and G.T. Heydt, "A Linear State Estimation Formulation for Smart Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1187–1195, May 2013.
6. A. Primadianto and C.N. Lu, "A Review on Distribution System State Estimation", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 5, pp. 3875–3883, Sep. 2017.
7. U. Kuhar, J. Jurše, K. Alič, G. Kandus, and A. Švigelj, "A unified three-phase branch model for a distribution-system state estimation", in 2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2016, pp. 1–6.
8. Z. Zhang, M. Liu, and S. Xiao, "A Survey on State Estimation Algorithm of Distribution Grid", in 2012 Spring Congress on Engineering and Technology, 2012, pp. 1–4.
9. M. Baran and T.E. McDermott, "State estimation for real time monitoring of distribution feeders", in 2009 IEEE Power Energy Society General Meeting, 2009, pp. 1–4.
10. M. Baran and T.E. McDermott, "Distribution system state estimation using AMI data", in 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 2009, pp. 1–3.
11. I. Roytelman and S.M. Shahidehpour, "State estimation for electric power distribution systems in quasi real-time conditions", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 4, pp. 2009–2015, Oct. 1993.
12. I. Džafić, M. Gilles, R.A. Jabr, B.C. Pal, and S. Henselmeyer, "Real Time Estimation of Loads in Radial and Unsymmetrical Three-Phase Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 4, pp. 4839–4848, Nov. 2013.
13. R. Hoffman, "Practical state estimation for electric distribution networks", in Proc. Power Syst. Conf. Exp., Atlanta, GA, USA, 2006, pp. 510–517.
14. Gamm A.Z. Statisticheskie metody ocenivaniia sostoianiia elektroenergeticheskikh sistem. Moscow: Nauka, 1976. 220 p. (In Russian)
15. Gamm A.Z., Golub I.I. Nabludaemost elektroenergeticheskikh sistem. Moscow: Nauka, 1990. 200 p. (In Russian)
16. A. Abur, A. Gomez-Exposito, "Power System State Estimation: Theory and Implementation", New-York: Marcel Dekker, 2004, 327 p.
17. C. W. Hansen and A. S. Debs, "Power system state estimation using three-phase models", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 2, pp. 818–824, May 1995.
18. M.-S. Chen and T.-H. Chen, "Application of three-phase load flow to power system distribution automation", in 1991 International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-91., 1991, pp. 472–478 vol. 2.
19. S. Zhong and A. Abur, "Effects of nontransposed lines and unbalanced loads on state estimation", in Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 2, Jan. 2002, pp. 975–979.
20. P. Chusovitín, I. Polyakov, and A. Pazderin, "Three-phase state estimation model for distribution grids", in 2016 IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering (ICSEE), 2016, pp. 1–5.
21. A.P.S. Meliopoulos and F. Zhang, "Multiphase power flow and state estimation for power distribution systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 2, pp. 939–946, May 1996.
22. A.K. Ghosh, D.L. Lubkeman, M.J. Downey, and R.H. Jones, "Distribution circuit state estimation using a probabilistic approach", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12,

- no. 1, pp. 45–51, Feb. 1997.
23. N. Blaauwbroek, P. Nguyen, M. Gibescu, and H. Slootweg, “Branch current state estimation of three phase distribution networks suitable for parallelization”, in 2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2016, pp. 1–5.
 24. M.E. Baran and A.W. Kelley, “State estimation for real-time monitoring of distribution systems”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 3, pp. 1601–1609, Aug. 1994.
 25. W.-M. Lin and J.-H. Teng, “State estimation for distribution systems with zero-injection constraints”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 1, pp. 518–524, Feb. 1996.
 26. D. Thukaram, J. Jerome, and C. Surapong, “A robust three-phase state estimation algorithm for distribution networks”, Electric Power Systems Research, vol. 55, no. 3, pp. 191–200, 2000.
 27. W.-M. Lin, J.-H. Teng, and S.-J. Chen, “A highly efficient algorithm in treating current measurements for the branch-current-based distribution state estimation”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, no. 3, pp. 433–439, Jul. 2001.
 28. W.M. Lin and J.H. Teng, “Distribution fast decoupled state estimation by measurement pairing”, Transmission and Distribution IEE Proceedings - Generation, vol. 143, no. 1, pp. 43–48, Jan. 1996.
 29. Y. Gao and N. Yu, “State estimation for unbalanced electric power distribution systems using AMI data”, in 2017 IEEE Power Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2017, pp. 1–5.
 30. J.H. Teng, “Using voltage measurements to improve the results of branch-current-based state estimators for distribution systems”, Transmission and Distribution IEE Proceedings - Generation, vol. 149, no. 6, pp. 667–672, Nov. 2002.
 31. M.E. Baran and A.W. Kelley, “A branch-current-based state estimation method for distribution systems”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 1, pp. 483–491, Feb. 1995.
 32. M. Pau, P.A. Pegoraro, and S. Sulis, “Efficient Branch-Current-Based Distribution System State Estimation Including Synchronized Measurements”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 62, no. 9, pp. 2419–2429, Sep. 2013.
 33. S. Sarri, M. Paolone, R. Cherkaoui, A. Borghetti, F. Napolitano, and C.A. Nucci, “State estimation of Active Distribution Networks: Comparison between WLS and iterated kalman-filter algorithm integrating PMUs”, in 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), 2012, pp. 1–8.
 34. C.N. Lu, J.H. Teng, and W.H.E. Liu, “Distribution system state estimation”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 1, pp. 229–240, Feb. 1995.
 35. A. Majumdar and B.C. Pal, “A three-phase state estimation in unbalanced distribution networks with switch modelling”, 2016 IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI), Kolkata, 2016, pp. 474–478.
 36. K. Li, “State estimation for power distribution system and measurement impacts”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 2, pp. 911–916, May 1996.
 37. H. Wang and N.N. Schulz, “A revised branch current-based distribution system state estimation algorithm and meter placement impact”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 1, pp. 207–213, Feb. 2004.
 38. R. Lukomski, T. Okon, and K. Wilkosz, “Power System Modelling”, Wroclaw University of technology: Wroclaw, 2011, 252 p.
 39. M.E. Baran, J. Jung, and T. E. McDermott, “Including voltage measurements in branch current state estimation for distribution systems”, in 2009 IEEE Power Energy Society General Meeting, 2009, pp. 1–5.
 40. F. Magnago, L. Zhang, and R. Nagarkar, “Three phase distribution state estimation utilizing common information model”, in 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, 2015, pp. 1–6.
 41. Boloev E.V., Golub I.I., Fedchishin V.V. Otcenivanie sostoiania raspredelitelnoi seti nizkogo napriazheniia po izmereniiam intellektualnykh schetchikov. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, no. 2, pp. 95–106. (In Russian)
 42. P. Chusovitin, I. Polyakov, O. Malozemova and A. Pazderin, “The usage of parallel calculations in state estimation algorithms”, in 2017 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2017, pp. 1–5.
 43. M. Pau, P.A. Pegoraro, and S. Sulis, “WLS distribution system state estimator based on voltages or branch-currents: Accuracy and performance comparison”, in 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013, pp. 493–498.
 44. M.E. Baran, J. Jung, and T.E. McDermott, “Topology error identification using branch current state estimation for distribution systems”, in 2009 Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific, 2009, pp. 1–4.
 45. V. Zamani and M. Baran, “Topology processing in distribution systems by Branch Current based state estimation”, in 2015 North American Power Symposium (NAPS), 2015, pp. 1–5.

Поляков И.Д., Паздерин А.В. Обзор подходов к трех-фазному оцениванию состояния распределительных сетей // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2(39). С. 18–27. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-18-27](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-18-27)

Polyakov I.D., Pazderin A.V. A Review on Three-Phase State Estimation Approaches of Distribution Networks. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 18–27. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-18-27](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-18-27)

Варганова А.В., Панова Е.А., Хатюшина Т.В., Кононенко В.С., Багаева Х.М.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ 35-220 кВ для САПР «ОРУ CAD»

Работа посвящена описанию системы автоматизированного проектирования схем открытых распределительных устройств с использованием оригинального программного продукта «ОРУ CAD». Данный пакет позволяет на основании исходных данных для проектирования (номинального напряжения, числа присоединений, типа подстанции и величины нагрузки) разработать однолинейную схему распределительного устройства в среде «KOMPAS», составить спецификацию оборудования с использованием базы данных. При разработке программного продукта разработчики ориентировались на действующие нормы и правила проектирования открытых распределительных устройств. Приведено описание построения базы данных основного оборудования открытых распределительных устройств 35-220 кВ, адаптированной к условиям проектирования схем распределительных устройств и технико-экономическому сравнению их возможных вариантов. В базе данных приведены основные технические параметры, показатели надежности (параметр потока отказов, время восстановления), а также цены на силовые трансформаторы, выключатели, трансформаторы тока и напряжения, ограничители перенапряжения, разъединители, токопроводы. С целью перспективного построения планов распределительных устройств в базе данных для каждого элемента хранится графическое отображение, спроектированное в среде «KOMPAS». Для унификации базы данных отображение элементов на планах выполнено в одном масштабе с нанесением габаритных размеров. Для осуществления технико-экономического сравнения вариантов схем цены на оборудование приведены в укрупненных стоимостных показателях относительно 2002 г. База данных спроектирована таким образом, что пользователь самостоятельно может вносить дополнительное оборудование и корректировать ценовые показатели уже существующего оборудования. Программный пакет разработан для электротехнических отделов проектных организаций с целью ускорения процесса работы инженера-проектировщика.

Ключевые слова: электроэнергетика, система автоматизированного проектирования, открытое распределительное устройство, подстанция, база данных, электрооборудование, трансформатор, коммутационное оборудование.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электроэнергетика является одной из отраслей, определяющих научно-технический прогресс, характеризующихся высокими темпами развития, что невозможно без средств вычислительной техники, в частности создания различных систем автоматизированного проектирования.

Современные САПР нашли широкое применение в области электроэнергетики. Большой спрос на разработку САПР связан с улучшением качества расчетов, снижением времени их выполнения работ.

Так, А.А. Ковалевым и А.А. Головиным в [1] рассматривается разработанный программный продукт *DIAL GmbH*, который позволяет рассчитывать освещенность помещений и рабочих мест с помощью САПР. Моделирование помогает проектировщикам понять, какие компромиссы и решения в области проекта они должны сделать для улучшения качества своей продукции.

В [2] авторами описываются основные возможности программного комплекса *TracePro*, а также методы и инструменты для анализа и проектирования систем освещения и оптических систем световых приборов.

В работе [3] автором описан новый подход к проектированию и исследованию электросетевого оборудования с использованием САПР «Транслайн». Автор утверждает, что применение данной САПР облегчает и ускоряет численные эксперименты в научных исследованиях, позволяет снизить временные и трудовые затраты при оценке напряженно-деформированного состояния реконструируемых сооружений, усилении и проектировании новых сооружений в электроэнергетике.

Большое число работ посвящено конструированию электрических машин [4-7]. Авторами в работе [8] описывается САПР трансформаторов, которая реализуется с использованием современных доступных математических пакетов. По результатам полученного расчета генерируется 3D-модель трансформатора, для которой автоматически строится комплект чертежей.

В работе [9] авторами Агаповым А.А. и Черных Т.Е. рассматриваются способы использования 3D-моделей для моделирования обмоток электрических машин.

В [10] описываются современные условия производства трансформаторов, которые требуют от инженеров-проектировщиков минимальных затрат времени на проектирование при сохранении высокой точности расчетов.

И.А. Бершадским, А.П. Ковалевым, А.В. Згарбулом в работе [11] описывается реализация САПР системы электроснабжения цеха промышленного предприятия, для которого предусмотрена радиальная схема электроснабжения на напряжении 0,4 кВ, выполненная с помощью распределительных пунктов. В работе [12] приведен подход, позволяющий на основании заданных исходных данных осуществить выбор и проверку оборудования до 1 кВ в распределительных сетях.

В [13] автор представляет алгоритм автоматизированного выбора расцветки проводов при проектировании электрооборудования с помощью САПР. Количество цветов при этом должно быть минимизировано.

В работе [14] автором предлагается метод моделирования многомашинных автоматизированных электроэнергетических систем, которые включают в себя: асинхронные двигатели; синхронные дизель-

генераторы; статические нагрузки; системы автоматической синхронизации, распределения активных и реактивных нагрузок между параллельно работающими дизель-генераторами, с использованием САПР *OrCAD 9.2 (PSPice)*.

Елисеевым Д.С в работе [15] приведены алгоритмы САПР, позволяющие осуществлять выбор сечений проводов и кабелей с учетом поправочных коэффициентов на температуру и способ прокладки проводника. В [16] уделено внимание разработке САПР, позволяющей осуществлять выбор места размещения опор воздушных линий электропередачи в зависимости от топологических особенностей местности. В качестве исходных данных в работе используется адаптированная к САПР база данных [17].

В [18] рассматривается программный продукт, позволяющий осуществлять проектирование линий электропередачи. В работе [19] приведен САПР по расчету механической прочности воздушных линий.

Существующие работы по проектированию схем направлены на поиск наилучших решений синтеза схем систем электроснабжения [20].

Широкое применение САПР получили при моделировании устройств релейной защиты. Так, в [21] описан подход по реализации программного обеспечения, позволяющего осуществлять программирование логических контроллеров релейной защиты. А в [22] описаны положительные стороны внедрения САПР *Eplan* при проектировании шкафов релейной защиты и автоматики.

Анализ печатных работ показал, что существующие подходы автоматизированного проектирования объектов электроэнергетики и электротехники направлены на решение следующих основных задач: выбор и проверка оборудования, расчет механической прочности линий электропередачи, моделирование электрооборудования и устройств релейной защиты, расчет освещенности и др.

Но нет таких САПР, которые бы решали различные задачи электроэнергетики на основе технико-экономического расчета, таким образом, экономичный выбор различных элементов остается неавтоматизированной задачей, которую необходимо решать.

Таким образом, на данный момент электроэнергетика уже достаточна снабжена различными системами автоматизированного проектирования, которые способны решать различные проблемы. Но остаются и нерешенные вопросы, которые предстоит решать проектировщикам и программистам.

ОПИСАНИЕ САПР «ОРУ CAD»

Для разработки САПР однолинейных схем распределительных устройств применялись принципы, позволяющие осуществлять наилучшее человеко-машинное взаимодействие. САПР организован таким образом, чтобы отразить основные этапы работы инженера-проектировщика электротехнического отдела: работа с нормативно-технической документацией и техническим заданием, обоснование принятия проектного решения, формирование проектной документации.

Алгоритм работы проектируемой САПР приведен на рис. 1.

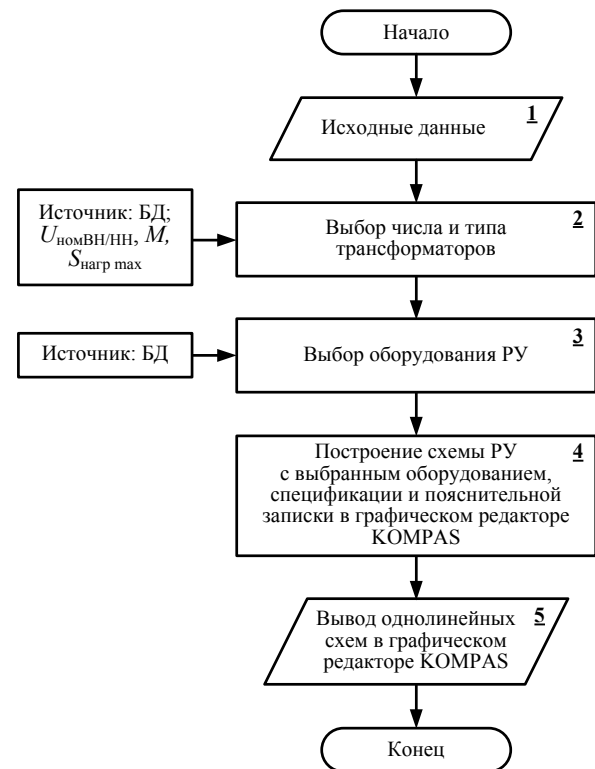


Рис. 1. Блок-схема алгоритма работы САПР «ОРУ CAD»

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

- ручной ввод количества присоединений распределительного устройства (N) и тип подстанции;
- использование базы данных (БД), позволяющей осуществлять коррекцию и ввод параметров: технико-экономические параметры оборудования, включая стоимость элемента и показатели надежности, обозначение на однолинейных схемах (в соответствии с ГОСТ).

Выбор оборудования (блок 2 и 3, рис. 1) осуществляется исходя из заданной максимальной нагрузки подстанции и напряжения. Источником данных является база данных электрооборудования оборудования.

Построение (блок 4, рис. 1) и вывод (блок 5, рис. 1) схем осуществляется в специализированном графическом редакторе *KOMPAS*.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ БАЗЫ ДАННЫХ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СХЕМ ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Разработка базы данных включает в себя несколько этапов: сбор и анализ данных; проектирование базы; тестирование и внедрение в программный продукт.

На этапе сбора и анализа данных осуществляется поиск и структурирование информации об элементах открытых распределительных устройств, а именно силовых трансформаторах, трансформаторах напряжения, трансформаторах тока, разъединителях, выключателях, токопроводах.

Проектирование базы включает в себя разработку *ER*-модели, позволяющей описать концептуальные схемы предметной области, а также разработку непо-

средственно таблиц и взаимосвязей между ними.

Тестирование подразумевает проверку всех данных и взаимосвязей между ними, а также устранение всех имеющихся ошибок.

И непосредственно внедрение базы подразумевает ее встраивание в программный продукт, который проектирует электрические схемы.

Созданная база данных должна отвечает следующим требованиям:

- простота и легкость использования (пользователь должен понимать какие данные находятся в его распоряжении, должно исключаться возникновение ошибок, а также доступ к данным должен быть обусловлен простотой);
- простота внесения изменений и добавления новых данных;
- высокая скорость работы (запросы пользователей должны удовлетворяться с требуемой скоростью);
- минимум затрат (стоимость хранения, использования данных и внесения изменений должны быть минимизированы);
- целостность (в процессе работы с базой данные и их взаимосвязи не должны нарушаться);
- безопасность (база данных должна быть защищена от случайного либо преднамеренного доступа к ней лиц, не имеющих на это нужной компетенции).

Для разработки базы данных используется *MS SQL Server 2014*. Было создано пятнадцать структурных элементов базы данных: «Выключатели», «Завод-изготовитель», «Категория размещения», «Климатическое исполнение», «Разъединители», «Тип выключателя», «Тип разъединителя», «Тип токопровода», «Тип трансформатора», «Тип трансформатора напряжения», «Трансформаторы», «Трансформаторы напряжения», «Трансформаторы тока».

Каждая из ключевых таблиц имеет большое количество полей, которое дает максимально точное описание элемента. Например, на **рис. 2** представлен дизайн таблицы «Выключатели».

Каждая таблица имеет первичные ключи (например, *ID_выключателя*), которые позволяют организовать связь таблиц друг с другом (каждая ключевая таблица связана, по средствам вторичных ключей, с таблицей названия своего типа, заводом-изготовителем, климатическим исполнением и категорией размещения), пример представлен на **рис. 3**.

Также каждая таблица наполнена различным количеством данных, фрагмент наполненности таблицы «Трансформаторы» представлен на **рис. 4**.

К отличительной особенности разработанной базы данных относится и то, что, помимо технико-экономических параметров, она содержит еще и визуальную составляющую рассматриваемого элемента, необходимую для разработки планов и разрезов схем открытых распределительных устройств. Например, на **рис. 5** приведен фрагмент *KOMPAS* для трансформатора типа ТРДН-40000/110 УХЛ1. Хранение уже спроектированных элементов позволяет сократить время составления проектной документации.

Column Name	Data Type	Allow Nulls
ID_выключателя	int	☐
[Завод-изготовитель]	int	☒
Изолирующая_среда	varchar(MAX)	☒
Тип	int	☒
Климатическое_исполнение	int	☒
Категория_размещения	int	☒
Номинальное_напряжение	int	☒
Наибольшее_рабочее_напряжение	int	☒
Номинальный_ток	float	☒
Номинальный_ток_отключения	float	☒
Номинальный_ток_включения	float	☒
Ток_термической_стойкости	float	☒
Допустимое_время_действия_тока_термической_стойкости	float	☒
Полное_время_отключения	float	☒
Цена	money	☒
ω	float	☒
Тв	float	☒
ωп	float	☒
Тп	float	☒
[Вид сверху]	image	☒

Рис. 2. Поля таблицы «Выключатели»

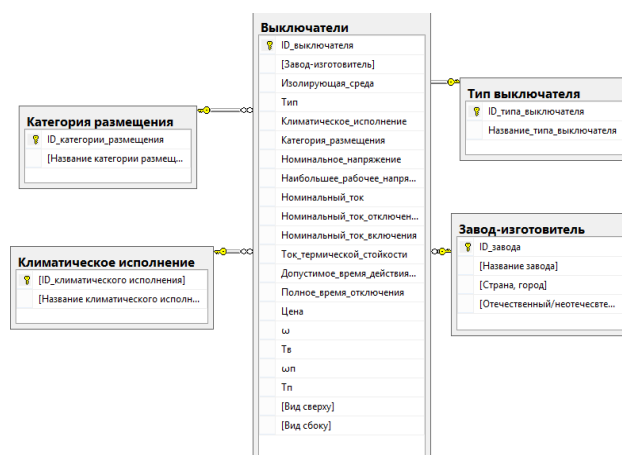


Рис. 3. Отношения таблицы «Выключатели»

ID_трансформ...	Завод-изгото...	Тип	Регулировани...	Климатическ...	Категория_ра...	Сном	Уцен
1	1	1	РТН ±15%-12...	1	1	2500	115
2	1	1	РТН ±16%±9 с...	1	1	6300	115
3	1	1	РТН ±16%±9 с...	1	1	6300	115
4	1	2	РТН со сторон...	1	1	6300	115
5	1	2	РТН со сторон...	1	1	6300	115
6	1	3	РТН ВН±9х1,7...	1	1	10000	115
7	1	4	РТН ±16%±9 с...	1	1	10000	115
8	1	4	РТН ±16%±9 с...	1	1	10000	115
9	1	1	РТН ±16%±9 с...	1	1	10000	115
10	1	1	РТН ±16%±9 с...	1	1	10000	115
11	1	1	РТН ±16%±9 с...	1	1	10000	115
12	1	3	РТН±16%±9 ст...	1	1	16000	115

Рис. 4. Фрагмент таблицы «Трансформаторы»

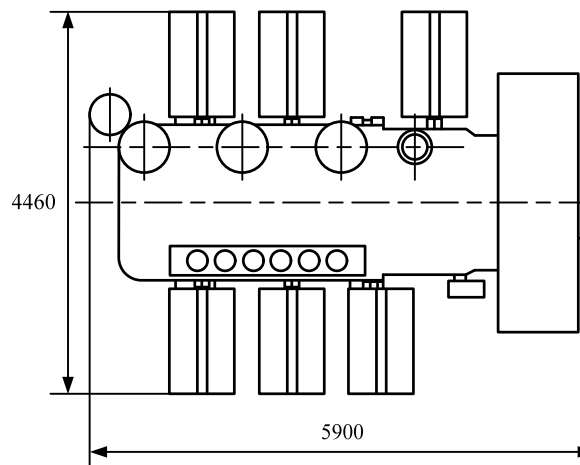


Рис. 5. Фрагмент *KOMPAS* силового трансформатора ТРДН-40000/110 УХЛ1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный программный пакет «ОРУ САД» позволяет проектировать схемы открытых распределительных устройств напряжением 35–220 кВ. База данных электрооборудования, спроектированная и адаптированная специально для САПР, носит информационный характер, проста и экономична в использовании, целостна и обладает высокой скоростью работы.

Разработанную базу данных можно внедрять в разрабатываемую систему автоматизированного проектирования, позволяющую спроектировать электрическую часть открытых распределительных устройств и использовать все входные данные, в том числе графическое отображение для построения планов. Унифицированный подход к составлению базы данных значительно облегчает составление спецификации элементов и проектной документации.

Разработанный САПР в комплекте с базой данных предназначен в качестве рабочего места инженера-проектировщика электротехнического отдела.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ковалев А.А., Головин А.А. Применение САПР для расчета освещенности // Современные научные исследования и инновации, 2014. № 6–1 (38). С. 37.
- Курин С.В. Инструменты САПР Трасерго для анализа и проектирования оптических систем световых приборов и систем освещения // Материалы XX научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва. Саранск, 2016. С. 138–141.
- Смазнов Д.Н. Использование САПР «Транслайн» для решения исследовательских задач в области строительного проектирования в электроэнергетике // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2010. № 1. С. 39–44.
- Rivera C. A., Poza J., Ugalde G., G. Almandoz, A Knowledge Based System architecture to manage and automate the electrical machine design process. 2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM), Donostia-San Sebastian, 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/ECMSM.2017.7945875.
- Aravind C.V., Grace I., Rozita T., Rajparthiban R., Rajprasad R. Wong Y.V. Universal computer aided design for electrical machines/ 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications, Melaka, 2012, pp. 99–104. doi: 10.1109/CSPA.2012.6194699.
- Коблев А.С. Агентно-ориентированное программирование как реализация фреймового представления знаний об электрической машине в интеллектуальных САПР // Электротехника, 2005. №5. С. 8–14.
- Коблев А.С. Эффективность использования фреймового представления знаний для организации интеллектуальных САПР электрических машин // Электротехника, 2005. №5. С. 18–23.
- Трофимович И.В., Тихонов А.И. Разработка САПР трансформаторов с параметрической генерацией конструкторской и технологической документацией // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии Материалы международной научно-технической конференции : (XVIII Бенардосовские чтения), 2015. С. 204–208.
- Агапов А.А., Черных Т.Е. Использование САПР для создания компьютерных моделей обмоток электрических машин // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники. Инженерные идеи XXI века Труды Всероссийской студенческой научно-технической конференции, 2016. С. 15–18.
- Стулов А.В., Тихонов А.И., Корнев И.А. Подсистема САПР распределительных трансформаторов для расчета нагрузочных потерь в фольговых обмотках с учетом вытеснения тока // Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2015. № 2. С. 71–74.
- Бершадский И.А., Ковалев А.П., Згарбул А.В. Разработка САПР для проектирования электроснабжения цеха на напряжении 0,4 кВ // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2015. №4. С. 47–52.
- Алферов А.А., Дробов А.В., Галушко В.Н. Автоматизированный выбор элементов и решение задач при проектировании систем электроснабжения напряжением до 1 кВ // Агротехника и энергообеспечение, 2017. Т. 1. №14 (1). С. 84–92.
- Казаков О.И. Автоматизация выбора расцветки проводов при проектировании электрооборудования // Электротехника, 1995. №10. С. 61–64.
- Воскобович В.Ю. Моделирование многомашинных автоматизированных электроэнергетических систем с использованием Orcad 9.2 (Pspice) // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2003. №10. С. 22–28.
- Елисеев Д.С. Алгоритмы САПР для выбора проводов и кабелей. Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2012. 184 с.
- Кацадзе Т.Л., Назарова М.А. Математическая модель и метод автоматизированного размещения опор в бреде САПР воздушных линий электропередач // Энергетика: экономика, технологии, экология, 2012. №2 (31). С. 49–54.
- Katsadze T., Nazarova M. Database elements of automatic design systems for overhead transmissions lines//Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенергетичної і автоматики. - Київ: "Політехніка", 2012. С. 100–101.
- Воробьев С., Карпов Н. Model Studio CS ЛЭП – реальная автоматизация процесса проектирования ЛЭП / САПР и графика, 2009. №3. С. 26–29.
- Malhara S., Vittal V. Mechanical State Estimation of Overhead Transmission Lines Using Tilt Sensors. IEEE Transactions On Power Systems, 2010, vol. 25, no 3, pp. 1282–1290.
- Ахтулов А.Л., Ахтулова Л.Н., Леонов Е.Н., Смирнов С.И. Постановка задачи синтеза принципиальных схем промышленного электроснабжения средствами современных САПР // Вестник ижевского государственного технического университета, 2011. № 1. С. 110–113.
- Назипов Д.А., Антонов В.И. САПР программного обеспечения логических контроллеров релейной защиты // Тезисы докладов «Научная конференция молодых ученых и специалистов города Чебоксары, 1990. С. 146.
- Шоглев Д.Г. Оценка эффективности и сокращения временных затрат при использовании САПР Erplan на всех этапах создания шкафов РЗА// Сборник материалов XXXVIII сессии Всероссийского научного семинара по тематике «Диагностика энергооборудования», 2016. С. 210–213.

Поступила в редакцию 10 февраля 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF ELECTRICAL EQUIPMENT DATABASE OF 35-220 kV FOR "ORU CAD"

Aleksandra V. Varganova

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Industrial Electric Power Supply Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4675-7511>.

Evgeniya A. Panova

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

Tatyana V. Khatushina

Student, Computer Engineering and Programming Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tatyana_hatyushina@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1612-9365>.

Vlada S. Kononenko

Student, Industrial Power Supply Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Vladakononenko29@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2436-295X>.

Khamis M. Bagaeva

Student, Industrial Power Supply Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: bagaevahamis@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2391-270X>.

The article considers the issues of computer-aided design system for circuits of open switchgear using the original software product "ORU CAD". This software makes it possible to develop a single-line circuit of the switchgear on the basis of initial data for design (voltage, number of connections, type of substation and load value) in the "KOMPAS" environment, to make a specification of the equipment using the database. When developing the software product, the developers focus on the current rules and regulations for the design of open switchgear. The description of construction of the database of the main equipment of open switchgear 35-220 kV is adapted to the design of schemes of switchgears and technical and economic comparison of their possible options. The database contains the main technical parameters, reliability indicators (failure flow parameter, recovery time) as well as prices for power transformers, switches, current and voltage transformers, surge arresters, disconnectors and lines. A graphical display designed in "KOMPAS" is stored for the future construction plans of distribution devices in the database for each object. To provide the unification of the database, displaying items on the plans is made in the same scale with the application of dimensions. For the implementation of the technical and economic comparison of design options the prices of the equipment described in the consolidated cost performance relative to 2002, the Database is designed so that the user can introduce additional equipment and adjust price indices of existing equipment. The software package is developed for electrotechnical departments of the design organizations for the purpose of acceleration of process of work of the engineer-designer.

Keywords: power engineering, computer-aided design system, open switchgear, substation, database, electrical equipment, transformer, switching equipment.

REFERENCES

1. Kovalev A.A., Golovin A.A. The Application of CAD for lighting calculations. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii* [Modern research and innovation], 2014, no. 6–1 (38), pp. 37. (In Russian)
2. Kurin S.V. Tracepro CAD Tools for analysis and design of optical systems of lighting devices and lighting systems. *Materialy XX nauchno-prakticheskoy konferencii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov Nacionalnogo issledovatel'skogo Mordovskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.P. Ogaryova* [Proceedings of the XX scientific-practical conference of young scientists, postgraduates and students of the national research N. P. Ogarev Mordovia state University], 2016, pp. 138–141. (In Russian)
3. Smaznov D. N. Using CAD "Transline" to solve research problems in the field of structural engineering in the power industry. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost* [Elektro. Electrical engineering, electrical engineering, electrical engineering], 2010, no. 1, pp. 39–44. (In Russian)
4. Rivera C. A., Poza J., Ugalde G., G. Almandoz, A Knowledge Based System architecture to manage and automate the electrical machine design process. *2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)*, Donostia-San Sebastian, 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/ECMSM.2017.7945875.
5. Aravind C.V., Grace I., Rozita T., Rajparthiban R., Rajprasad R. Wong Y.V. Universal computer aided design for electrical machines/ *2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications*, Melaka, 2012, pp. 99–104. doi: 10.1109/CSPA.2012.6194699.
6. Kobelev A.S. Agent-oriented programming as frame realization for the electrical machine intelligent cad systems. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2005, no. 5, pp. 8–14. (In Russian)
7. Kobelev A.S. Efficiency of frame systems knowledge representation for the electrical machine intelligent CAD systems. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2005, no. 5, pp. 18–23. (In Russian)
8. Trofimovich I.V., Tikhonov A.I. Development of CAD transformers with parametric generation of design and technological documentation. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya ehlektro- i teplotekhnologii Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii: (XVIII Benardosovskie chteniya)* [State and prospects of development of electric and thermal technologies Materials of the international scientific and technical conference : (XVIII Benardosov readings)], 2015, pp. 204–208. (In Russian)

9. Agapov A.A., Chernykh T.E. The use of CAD to create computer models of windings of electrical machines. *Prikladnye zadachi ehlektromekhaniki, ehnergetiki, ehlektroniki. Inzhenernye idei XXI veka Trudy Vserossijskoj studencheskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [Applied problems of electromechanics, energy, electronics. Engineering ideas of the XXI century Proceedings of the all-Russian student scientific and technical conference], 2016, pp. 15–18. (In Russian)
10. Stulov A.V., Tikhonov A.I., Kornev I.A. Subsystem CAD distribution transformers for calculation of load losses in foil windings with current displacement. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo state power engineering University], 2015, no. 2, pp. 71–74. (In Russian)
11. Bershadskij I.A., Kovalev A.P., Zgarbul A.V. Development of CAD system to design a power plant at the voltage of 0.4 kV. *Elektro. Elektrotehnika, elektroehnergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost* [Electro. Electrical engineering, electrical power engineering, electrical industry], 2015, no. 4, pp. 47–52. (In Russian)
12. Alferov A.A., Drobov A.V., Galushko V.N. Automated selection of elements and solving problems in the design of power supply systems up to 1 kV. *Agrotehnika i energoobespechenie* [Agricultural machinery and energy], 2017, vol. 1, no. 14 (1), pp. 84–92. (In Russian)
13. Kazakov O.I. Automation of the choice of wire colors in the design of electrical equipment. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 1995, no. 10, pp. 61–64. (In Russian)
14. Voskobovich V.Yu. Automated modeling of multimachine power systems using Orcad 9.2 (Pspice). *Izvestiya Etu "LETI"* [Bulletin of ETU "LETI"], 2003, no 10, pp. 22–28. (In Russian)
15. Eliseev D.S. *CAD algorithms for selection of wires and cables*. Volgograd, 2012, 184 p. (In Russian)
16. Katsadze T.L., Nazarova M.A. Mathematical model and method of automatic placement of overhead transmission power line towers for CAD system. *Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiya*, 2012, no. 2 (31), pp. 49–54.
17. Katsadze T., Nazarova M. Database elements of automatic design systems for overhead transmissions lines. *Dopovidi-za-materialami-midnarodno-naukovo-tehnichno konferenci molodih uchenih aspirantiv i studentiv suchasni problemi-elektroenergotehniki i avtomatiki*, 2012, pp. 100–101.
18. Vorobyev S., Karpov N. Model Studio CS power line - real automation of the process of designing transmission line. *SAPR i grafika* [CAD and graphics], 2009, no. 3, pp. 26–29. (In Russian)
19. Malhara S., Vittal V. Mechanical State Estimation of Overhead Transmission Lines Using Tilt Sensors. *IEEE Transactions On Power Systems*, 2010, vol. 25, no. 3, pp. 1282–1290.
20. Akhtulov A.L., Akhtulova L.N., Leonov E.N., Smirnov S.I. Statement of Problem of Synthesis of Industrial Electric Supply Basic Schemes by Means of Modern CAD. *Vestnik izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], 2011, no. 1, pp. 110–113. (In Russian)
21. Nazipov D.A., Antonov V.I. CAD software for logical relay protection controllers. *Tezisy dokladov «Nauchnaya konferenciya molodyh uchenyh i specialistov goroda Cheboksary* [Abstracts of Scientific conference of young scientists and specialists of Cheboksary], 1990, p. 146. (In Russian)
22. Shoglev D.G. Analysis of efficiency and reduction of time costs due to the use of CAD Eplan during all stages of protection cubicle manufacturing. *Sbornik materialov XXXVIII sessii Vserossijskogo nauchnogo seminar po tematike «Diagnostika energooborudovaniya»* [Collection of scientific papers of XXXVIII All-Russian scientific seminar on power equipment diagnostics], 2016, pp. 210–213. (In Russian)

Варганова А.В., Панова Е.А., Хатюшина Т.В., Кононенко В.С., Багаева Х.М. Разработка базы данных электрооборудования 35-220 кВ для САПР «ОРУ CAD» // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2(39). С. 28-33. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-28-33](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-28-33)

Varganova A.V., Panova E.A., Khatushina T.V., Kononenko V.S., Bagaeva K.M. Development of Electrical Equipment Database of 35-220 kV for "ORU CAD". *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 28-33. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-28-33](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-28-33)

Газизова О.В., Аллаяров А.А., Кондрашова Ю.Н., Патшин Н.Т.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С УЧЕТОМ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

Одними из основных тенденций развития электроэнергетики в наши дни является увеличение доли объектов распределенной генерации и малой энергетики в общей выработке активной мощности. Это существенно усложняет конфигурацию электрических сетей и не исключает выход на раздельную с энергосистемой работу собственного источника питания и разнородной нагрузки. В связи с этим остается актуальным расчет и анализ устойчивости подобных режимов с учетом особенностей высоковольтных распределительных сетей, источников распределенной генерации, как правило, вырабатывающих не только электроэнергию, но и тепло, а также промышленных или городских нагрузок. В таких условиях при раздельной работе интерес представляет анализ статической, динамической, а в режимах ресинхронизации – и результирующей устойчивости. Разработан алгоритм определения границ динамической устойчивости промышленных генераторов в режиме выхода на раздельную с энергосистемой работу, использующий метод последовательного утяжеления. В качестве параметра утяжеления принимается дополнительная нагрузка на шинах связи с энергосистемой. Получен алгоритм исследования устойчивости синхронных и асинхронных двигателей собственных нужд, учитывающий загрузку двигателя и взаимное влияние источников питания и нагрузки. Полученные алгоритмы реализуются с помощью программного комплекса «КАТРАН» расчета установившихся и переходных режимов, позволяющего анализировать динамическую устойчивость машин переменного тока при выходе промышленной электростанции с нагрузкой на раздельную работу. Исследования проводились на примере местной тепловой электростанции с нагрузками в виде промышленных потребителей и электродвигателей собственных нужд. В ходе расчетов были определены области сохранения устойчивости в зависимости от небаланса мощности на шинах связи с энергосистемой и при заданной дополнительной нагрузке применительно к синхронным генераторам и двигателям собственных нужд. Полученные результаты позволяют разрабатывать мероприятия по повышению динамической устойчивости в условиях отделения от энергосистемы промышленных объектов распределенной генерации.

Ключевые слова: переходный режим, промышленный синхронный генератор, динамическая устойчивость, программное обеспечение, система электроснабжения, угол ротора.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из определяющих факторов развития современной энергетики является обеспечение энергетической эффективности работы промышленных предприятий, необходимое для поддержания конкурентоспособности продукции. Одной из важных составляющих в ценообразовании является стоимость потребленной на производство электроэнергии. Кроме того, обеспечение бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей в условиях энергоемкого промышленного производства требует наличия не менее двух независимых источников питания.

В связи с этим одной из тенденций современной энергетики является увеличение доли собственных источников электроэнергии промышленных предприятий, в частности, расширение объектов малой энергетики и распределенной генерации [1-5]. Это приводит к существенному усложнению как конфигурации сети, так и возможных режимов работы.

Отделение электростанции с нагрузкой от энергосистемы в результате действия противоаварийной автоматики является одним из наименее благоприятных режимов с точки зрения динамической устойчивости. В таких режимах должно быть обеспечено сохранение динамической устойчивости как источников питания, так и нагрузки [6-9].

Основным критерием обеспечения динамической устойчивости при выходе на раздельную работу, как известно, является изменение взаимных углов роторов

генераторов и синхронных двигателей, что требует разработки соответствующего программного обеспечения.

В связи с тем, что конфигурация сети, вышедшей на раздельную работу, может быть весьма сложной и неоднородной [10-13], а также к ней могут присоединяться разные по величине и характеру нагрузки [14-16], то возникает задача не только обеспечения динамической устойчивости при заданном состоянии сети, но и определение ее границ при изменении состава электрооборудования и различных величинах генерации и потребления реактивной мощности.

Это требует составления алгоритмов определения границ устойчивости работы генераторов и двигателей переменного тока, выходящих на раздельную с энергосистемой работу. Данные алгоритмы должны быть положены в основу соответствующего программного обеспечения и учитывать большое количество факторов. К таким факторам относятся характеристики первичных двигателей генераторов, небалансы мощностей между узлом и энергосистемой в предполагаемой точке отделения, технические и эксплуатационные характеристики двигательной нагрузки.

Результаты предварительных расчетов дают возможность разработать рекомендации по обеспечению динамической устойчивости промышленных систем электроснабжения.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА

Теория определения границ устойчивости в большей мере разработана применительно к статической устойчивости синхронных генераторов [8-9]. Это связано с тем, что оценка статической устойчивости производится без учета каких-либо дополнительных условий.

То есть электроэнергетическая система при крайне малом возмущении либо обладает статической устойчивостью, либо нет.

Применительно к динамической устойчивости такой подход не приемлем, поскольку всегда можно найти определенные аварийные условия, при которых генераторы выпадут из синхронизма [8-9].

В связи с этим определение границ динамической устойчивости промышленной электростанции с нагрузкой в различных режимах, например при выходе на раздельную работу, является актуальной [17-19]. Режим отделения от электроэнергетической системы генераторов с выделенной нагрузкой является весьма специфичным и сложным с точки зрения анализа динамической устойчивости. Анализ устойчивости посвящены труды [20-25]. Особенности исследования переходных режимов рассмотрены в [26-30].

Одним из важных факторов, влияющих на динамическую устойчивость в таком режиме, является небаланс мощностей в точке связи с энергосистемой непосредственно перед выходом на раздельную работу. Величина небаланса будет определять не только частоту и напряжение после отделения от энергосистемы, но и изменение взаимных углов роторов генераторов при переходном режиме. В связи с этим актуальным является составление алгоритма анализа границ динамической устойчивости синхронных генераторов с нагрузкой в зависимости от небаланса мощностей в начальный момент переходного режима.

В основу алгоритма (рис. 1) положен метод последовательных интервалов для анализа переходных режимов, последовательного эквивалентирования – установившихся режимов.

С целью анализа влияния величины небаланса активных и реактивных мощностей на границы динамической устойчивости был использован метод последовательного утяжеления.

Алгоритм предполагает исследование границ устойчивости путем изменения активной, реактивной и полной нагрузок на шинах связи с электроэнергетической системы и расчета динамической устойчивости в изменяющихся исходных условиях.

Помимо анализа устойчивости генераторов возникает необходимость исследования переходных режимов у двигательной нагрузки. Это связано с тем, что в промышленных сетях распространение находят источники распределенной генерации, имеющие сравнительно небольшие установленные мощности, тогда как отдельные электроприемники могут иметь номинальные мощности, сопоставимые с мощностями генераторов. Это усиливает взаимное влияние генераторов и двигателей при выходе на раздельную работу, требует учета динамических характеристик нагрузки и усложняет переходные режимы.

В связи с вышеизложенным разработанный алгоритм учитывает устойчивость синхронных и асинхронных двигателей следующим образом. После определения границ устойчивости синхронных генераторов выбираются предельные значения по активной и реактивной мощности и в данных точках и исследуется динамическая устойчивость двигателей при изменении из загрузки по активной и реактивной (у синхронных двигателей) мощности.

РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «КАТРАН»

В качестве объекта исследования была выбрана промышленная тепловая электростанция с генераторами различной установленной мощности и сложной конфигурацией сети (рис. 2). Связь с электроэнергетической системой осуществляется по шинам 110 кВ, к которым была подключена изменяющаяся при утяжелении режима нагрузка.

Установленная мощность генераторов составляет почти 300 МВт, в связи с чем величина дополнительной нагрузки изменяется в широких пределах.

Исследования проводились на основе вышеизложенного алгоритма с помощью специализированного программного комплекса «КАТРАН», позволяющего исследовать переходные режимы выхода электростанции на раздельную с энергосистемой работу.

В соответствии с приведенным алгоритмом осуществляется анализ переходного режима при выходе на раздельную работу при изменяющихся на шинах связи с энергосистемой нагрузки. На основании этих данных строятся графические зависимости, на которых отмечены границы динамической устойчивости генераторов (рис. 3, 4). Область внутри границы соответствует режиму работы электростанции, при котором сохраняется устойчивость. Графики построены для двух случаев: в первом – в зависимости от небаланса мощности с энергосистемой, во втором – при заданной дополнительной нагрузке. При этом каждый случай строится для различного сочетания активной и реактивной мощностей.

По полученным зависимостям можно сделать следующий вывод. Наибольшей динамической устойчивостью при выходе на раздельную работу рассматриваемый узел обладает при максимальной выдаваемой мощности генераторов. Узел может быть дополнительно нагружен на 70 МВт по активной мощности и на 90 МВАр по реактивной мощности с сохранением динамической устойчивости при выходе на раздельную работу.

При выходе электростанции на раздельную работу с энергосистемой работа в указанных областях позволит сохранить устойчивость генераторов и обеспечить надежное электроснабжение собственных нужд и ответственных потребителей.

В результате действия делительной автоматики на раздельную работу с энергосистемой переходят промышленные электростанции с собственными нуждами, а иногда и с частью нагрузки. При этом как в генераторах, так и в двигательной нагрузке выделившегося на раздельную работу узла происходят переходные электромеханические процессы.

Для расчёта выбраны асинхронный и синхронный двигатели. В качестве асинхронного приняли двигатель, приводящий в действие циркуляционный насос, питающийся с шин 3,15 кВ. В качестве синхронного приняли двигатель, приводящий в действие насос, питающийся с секции 6 кВ. Расчёты производятся для момента времени, когда все генераторы узла находятся в работе.

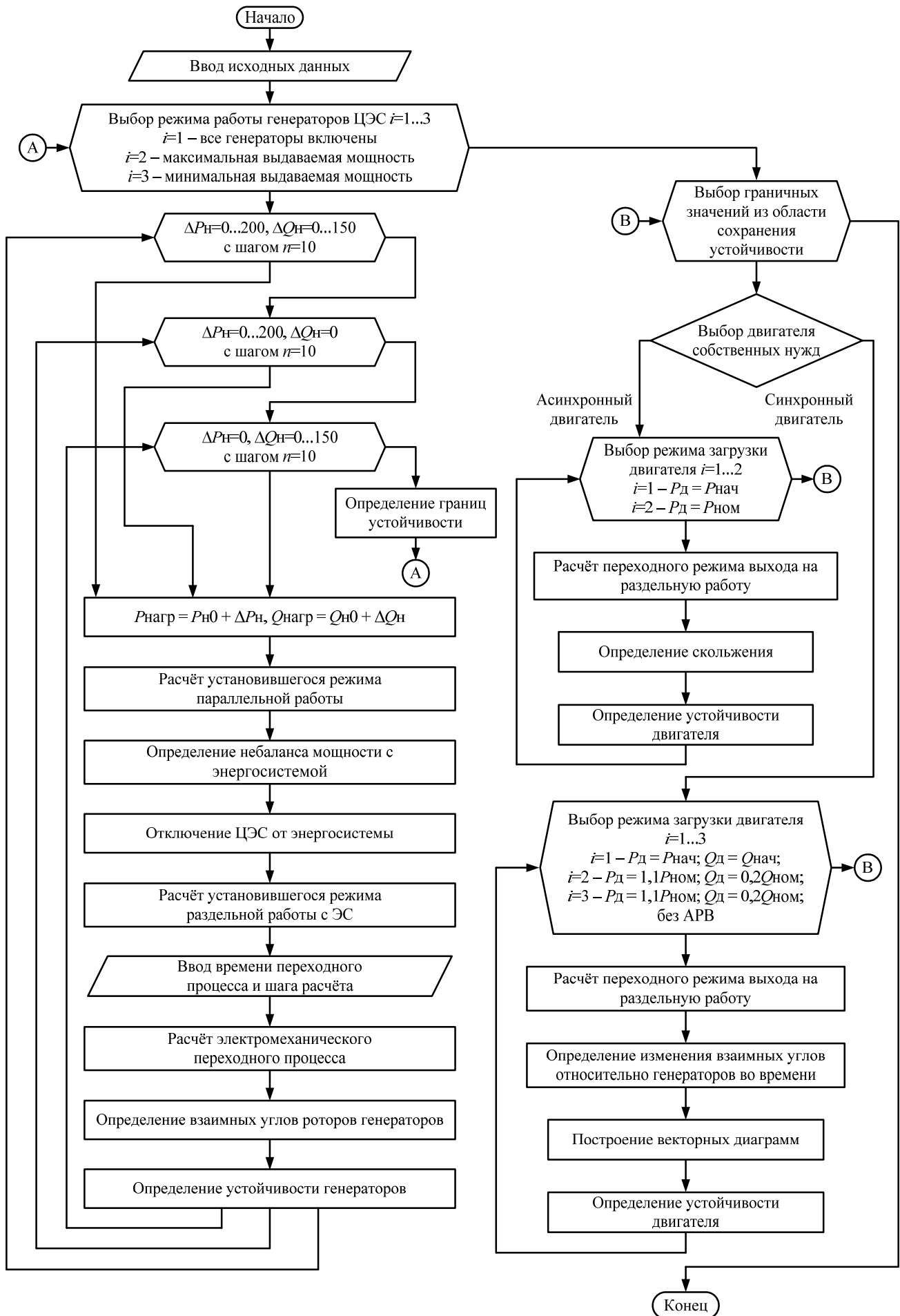


Рис. 1. Алгоритм определения границ динамической устойчивости

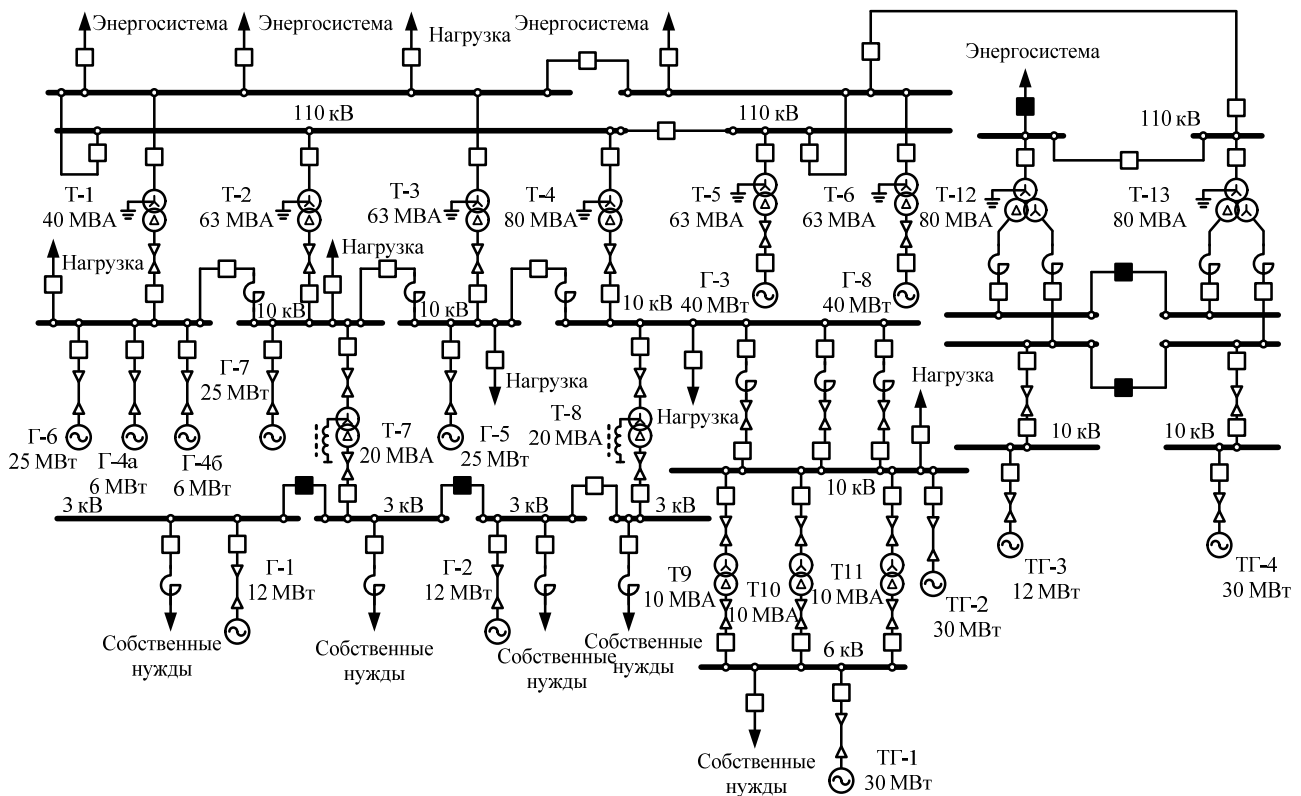


Рис. 2. Исследуемая система электроснабжения

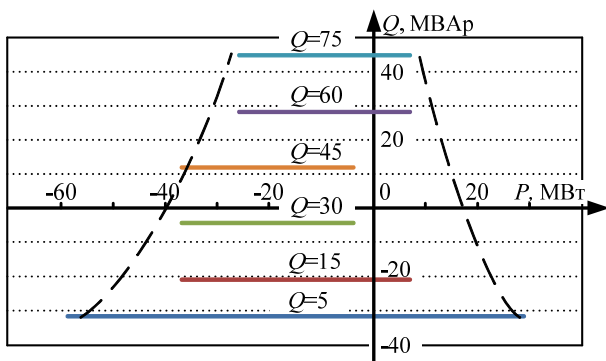


Рис. 3. Область сохранения устойчивости в зависимости от небаланса мощностей с энергосистемой

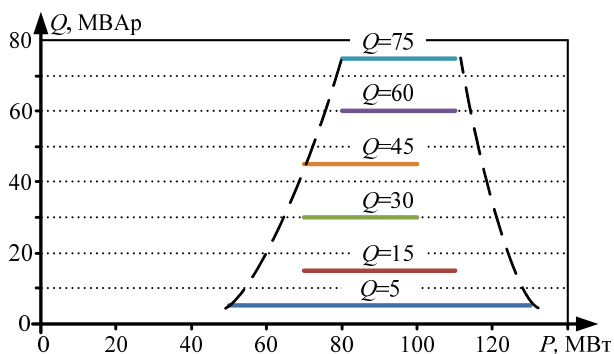


Рис. 4. Область сохранения устойчивости в зависимости от величины дополнительной нагрузки

В качестве дополнительной нагрузки, с которой рассматриваемый узел выходит на раздельную работу с сетью, выбираются такие значения активной и реактивной мощности, которые соответствуют границам области сохранения устойчивости генераторов.

Расчёты устойчивости асинхронного двигателя проведены для двух режимов: при действительном (около 50%) и номинальном значениях активной мощности. Для синхронного двигателя расчёт проведён для трёх режимов: в первом мощность двигателя соответствует действительной (около 50%), во втором – активная на 10% больше номинальной, реактивная составляет 20% от номинальной; в третьем – отключается автоматический регулятор возбуждения.

Для наглядности на рис. 5 показаны векторные диаграммы взаимных углов генераторов и СД для избыточного узла. Векторные диаграммы построены для двух моментов времени.

Таким образом, приёмники собственных нужд сохраняют устойчивость при выходе узла на раздельную работу.

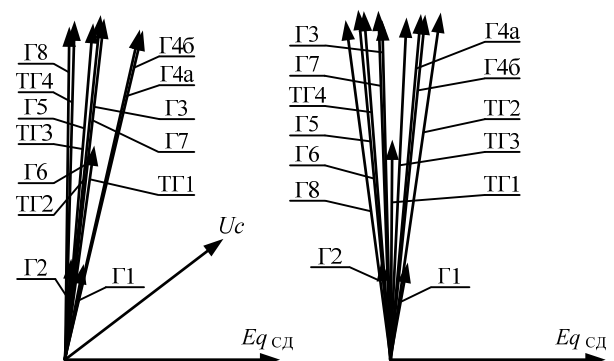


Рис. 5. Векторные диаграммы взаимных углов генераторов и синхронного двигателя при избыточном узле и действительных значениях двигательной нагрузки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм позволяет оценить границы динамической устойчивости промышленной электростанции с нагрузкой при выходе на раздельную с энергосистемой работу. Это актуально в условиях увеличения доли источников распределенной генерации и энергоемких приемников.

Исследование режимов осуществляется с помощью программного комплекса «КАТРАН», позволяющего производить расчет переходных электромеханических процессов промышленных систем электроснабжения, имеющих собственные источники электроэнергии, энергоемкие электроприемники и сложную конфигурацию сети.

Проведенные расчеты дают возможность разработки мероприятий по повышению динамической и результирующей устойчивости в условиях отделения электростанции от электроэнергетической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варганов Д.Е., Варганова А.В., Баранкова И.И. Применение экономико-математических моделей газопоршневых установок с целью повышения эффективности работы энергоузелов с источниками распределенной генерации // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. № 4 (33). С. 29–34.
- Построение технико-экономических моделей турбогенераторов и котлоагрегатов собственных электростанций промышленных предприятий / А.В. Кочкина, А.В. Малафеев, Н.А. Курилова, Р.П. Нетупский // *Электротехнические системы и комплексы*. 2013. №21. С. 247–252.
- Ачитаев А.А., Удалов С.Н., Юманов М.С. Повышение запаса регулировочной способности генераторов в энергетических системах с распределенной генерацией // *Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. трудов VII Международной научной конференции молодых ученых*, Новосибирский государственный технический университет; Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области. Новосибирск, 2015. С. 8–10.
- Анализ переходных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий, имеющих в своем составе объекты малой энергетики / О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова, В.М. Тарасов // *Промышленная энергетика*. 2010. №4. С. 22–28.
- Shevchenko A.F., Pristup A.G., Novokreshchenov O.I., Toporkov D.M., Korneev V.V. Construction and Design Features of Permanent Magnet electric Motors for General Industrial Purposes // *Russian Electrical Engineering*. 2014. Т. 85. №12. С. 748–751.
- Комплексная оценка эффективности токовых и дистанционных защит в сетях 110–220 кВ в условиях магнитогорского энергетического узла / Б.И. Заславец, В.А. Игуменцев, Н.А. Николаев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова, Е.А. Панова // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2011. №15. С. 14–21.
- Оценка эффективности релейной защиты в сетях 110–220 кВ сложных систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / Игуменцев В.А., Заславец Б.И., Николаев Н.А., Малафеев А.В., Буланова О.В., Кондрашова Ю.Н., Панова Е.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 141 с.
- Жданов П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем / под ред. Л.А. Жукова. М.: Энергия, 1979. 456 с.
- Кимбарк Э. Синхронные машины и устойчивость электрических систем. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 392 с.
- Варганова А.В., Хужина З.Б. Определение величин экономических плотностей тока в условиях современного рынка на электротехническое оборудование // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. №3(36). С. 23–28.
- The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models / Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 129. P. 951–955.
- Газизова О.В., Абдулхаликова А.А. Исследование пропускной способности питающих линий электропередачи крупного промышленного энергетического узла // *Электротехнические системы и комплексы*. 2014. №2(23). С. 48–52.
- Варганова А.В. О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2017. Т. 17. № 3. С. 76–85.
- Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. Methodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems // *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014*. P. 1–6.
- Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Yu.N. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015"*. 2016. P. 012056.
- Оценка регулирующего эффекта выпрямительной нагрузки для определения параметров установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.А. Николаев, О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова, В.М. Тарасов // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2011. №4. С. 115–118.
- Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Исследование динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями при отделении от энергосистемы в результате короткого замыкания // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2008. №17(117). С. 72–74.
- Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malapheev A.V. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability // *Procedia Engineering* 2015. Vol. 128. P. 759–763.
- Удалов С.Н., Ачитаев А.А., Юманов М.С. Исследование режимов работы ветроэнергетической установки на базе электромагнитной трансмиссии в составе автономной системы электроснабжения // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2015. № 5. С. 32–35.
- Xiufeng, Shi Research on Measures to Improve Stability of the Power System / Shi Xiufeng, Mu Shiguang // *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 742 (2015), pp. 648–652.
- Hazarika, D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables // *IET Generation, Transmission & Distribution*. Oct 2012, Vol. 6, Issue 10, pp. 977–985.

22. Satheesh, A. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN / A. Satheesh, T. Manigandan // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 10th March 2013. Vol. 49. Issue 1. P. 38–47.
23. Boudour, Mohamed Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique / Mohamed Boudour, Abdelhafid Hellal // *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 30, Number 1B.
24. Harikrishna, D. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator / D. Harikrishna, N.V. Srikanth // *TELKOMNIKA*. Vol.10, No.1, March 2012, pp. 9–16.
25. Sujatha, Er.S. Transient Stability Enhancement of Tneb 400 kV Transmission Network with SVC / Er.S. Sujatha, Dr.R. Anitha, Dr.P. Selvan, Er.S. Selvakumar // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 10th May 2014. Vol. 63, Issue 1, p 85–91.
26. Zhang, Rui Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system / Rui Zhang, Yan Xu, Zhao Yang Dong, Kit Po Wong // *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, Vol. 9, Iss. 3, pp. 296–305.
27. Welhazi, Yosra Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems / Yosra Welhazi, Tawfik Guesmi, Imen Ben Jaoued, Hsan Hadj Abdallah // *J. Electrical Systems* 10–3 (2014): 276–291.
28. Akagi, Hirofumi Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization / Hirofumi Akagi, Kenji Takahashi, Toshiaki Kobayashi, Hiroaki Sugihara, Takaaki Kai // *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 133, No.1, 2000.
29. Kothari, D.P. Power System Engineering / D.P. Kothari, I.J. Nagrath – Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
30. Определение асинхронной мощности синхронных генераторов в расчетах электромеханических переходных процессов при несимметричных режимах / Буланова О.В., Малафеев А.В., Николаев Н.А., Ротанова Ю.Н., Панова Е.А. // *Электрика*. 2010. №8. С. 24–26. *Automation and Control Systems (MEACS)*. 2015.

Поступила в редакцию 15 марта 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEFINITION OF BOUNDARIES OF THE DYNAMIC STABILITY OF GENERATORS AT INDUSTRIAL POWER PLANT TAKING INTO ACCOUNT MOTOR LOAD

Olga V. Gazizova

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: logan_b_7@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>

Azat A. Allayarov

Master's Degree student, the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Yulia N. Kondrashova

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5280-5666>.

Nikolay T. Patshin

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstract. One of the main trends of development of electric power today is to increase the proportion of facilities of distributed generation and small-scale power generation in total active power. This complicates the configuration of the electrical network and does not exclude separate output on the power grid work own power source and diverse loads. In this regard, it is important to be able to calculate and analyze the stability of such regimes allowing for the high-voltage distribution networks, distributed sources of generation usually generating not only electricity but also heat, as well as industrial or urban voltage. In such circumstances, during separate operation, it is of great interest to carry out the analysis of static, dynamic, and resynchronization mode and the resulting stability. The research group developed an algorithm for determining the dynamic stability boundaries of industrial generators in output mode to the power grid to separate the work using the method of sequential weighting. Additional load on the bus lines connected to the power grid was used as the weighting parameter. The algorithm was obtained to study the stability of synchronous and asynchronous motors of own needs, taking into account the motor load and the mutual influence of the power source and the load. The resulting algorithms are developed by means of "KATRAN"

software calculating steady state and transient modes for analyzing dynamic stability of AC machines for industrial power output to the load on separate operation. The investigations were carried out using the local thermal power with loads in the form of consumer and auxiliary industrial motors as an example. The research group determined the stability regions depending on the power imbalance on the bus lines connected to the power grid for the preset additional load on the auxiliary synchronous generators and motors. The results obtained make it possible to develop measures for improving the dynamic stability in the conditions of separation of industrial facilities from the grid with distributed generation.

Keywords: transitional regime, industrial synchronous generator, dynamic stability, software, power supply system, rotor angle.

REFERENCES

1. Varganov D.E., Varganova A.V., Barankova I.I. Application of econometric models of gas piston plants in order to increase the efficiency of power unit with distributed generation sources. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2016. no. 4(33), pp. 29–34. (In Russian)

2. Kochkina A.V., Malafeev A.V., Kurilova N.A., Netupsky R.P. Construction of the technical and economic models of auxiliary turbine generators and boilers of a power plant. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2013, no. 21, pp. 247–252. (In Russian)
3. Achitayev A.A., Udalov S.N., Yumanov M.S. Increase of an inventory of adjusting ability of generators in power systems with distributed generation. *Elektrotehnika. Elektrotekhnologiya. Energetika. Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh* [Electrical engineering. Electrotechnology. Power engineering collection of scientific works of the VII International scientific conference of young scientists]. Novosibirsk State Technical University; Interuniversity center of assistance of scientific and innovative activities of students and young scientists of the Novosibirsk region. 2015, pp. 8–10. (In Russian)
4. Bulanova, O.V., Malafeev A.V., Rotanova Y.N., Tarasov V.M. Analysis of transient modes of power supply systems of industrial enterprises, having in its composition objects of small energy. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power]. 2010, no. 4, pp. 22–28. (In Russian)
5. Shevchenko A.F., Pristup A.G., Novokreshchenov O.I., Toporkov D.M., Korneev V.V. Construction and Design Features of Permanent Magnet electric Motors for General Industrial Purposes. *Russian Electrical Engineering*. 2014, vol. 85, no. 12, pp. 748–751.
6. Zaslavets B.I., Igumenshev V.A., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Y.N., Panova E.A. Comprehensive evaluation of current and remote-shield networks 110–220 kV in terms of energy Magnitogorsk node. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. [Bulletin of South Ural State University. Series: Energy]. 2011, no. 15, pp. 14–21. (In Russian)
7. Igumenshev V.A., Zaslavets B.I., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Kondrashova Y.N., Panova E.A. *Otsenka effektivnosti releynoy zashchity v setyakh 110–220 kV slozhnykh sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy s sobstvennymi elektrostantsiyami* [Evaluating the effectiveness of relaying networks 110–220 kV power complex systems of industrial enterprises with their own power plants]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State. Tehn. University, 2011. 141 p. (In Russian)
8. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti energeticheskikh sistem* [Questions of stability of power systems] Ed. L.A. Zhukov. Moscow: Energy, 1979. 456 p. (In Russian)
9. Kimbark E. *Sinkhronnye mashiny i ustoychivost elektricheskikh sistem* [Synchronous machines and stability of electrical systems]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat, 1960. 392 p. (In Russian)
10. Khuzhina Z.B., Varganova A.V. Determination of the economic current density conditions on electrical equipment. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2017, no. 3 (36), pp. 23–28. (In Russian)
11. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical. *Procedia Engineering*. 2015. vol. 129, pp. 951–955.
12. Gazizova, O.V., Abdulkhalikova A.A. Bandwidth transmission lines feeding study of a large industrial energy hub. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2014, no. 2 (23), pp. 48–52. (In Russian)
13. Varganova A.V. On the methods of optimization of operating modes of electric power systems and networks. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of South Ural State University]. Series: Energy. 2017. vol. 17, no. 3, pp. 76–85. (In Russian)
14. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. Methodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems. Proceedings of 2014, International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014, pp. 1–6.
15. Gazizova O.V., Malafeev A.V., Kondrashova Y.N. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015". 2016, pp. 012056.
16. Nikolaev N.A., O.V. Bulanov, A.V. Malafeev, Y.N. Kondrashova, V.M. Tarasov. Qualification regulating rectification effect for load-defined division parameters established modes of power supply systems of industrial enterprises. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Proceedings of the higher educational institutions. Electromechanics]. 2011, no. 4. pp. 115–118. (In Russian)
17. Rotanova Yu.N., Malafeev A.V., Bulanova O.V. Research of dynamical stability of industrial power systems with own power stations at separation from the electric system in the result of short-circuit failure. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University]. Series "Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics". 2008, no. 17 (117), pp. 72–74. (In Russian)
18. Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malapheev A.V. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 128, pp. 759–763.
19. Udalov S.N. Achitayev A.A., Yumanov M.S. Research of operation modes of wind power installation on the basis of electromagnetic transmission as a part of autonomous system of electrical power supply. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost*. [Electro. Electrical engineering, power industry, electrotechnical industry]. 2015, no. 5, pp. 32–35. (In Russian)
20. Xiufeng, Shi Research on Measures to Improve Stability of the Power System / Shi Xiufeng, Mu Shiguang – Applied Mechanics and Materials, Vol. 742 (2015), pp. 648–652.
21. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables. IET Generation, Transmission & Distribution. Oct 2012, vol. 6, iss. 10, pp. 977–985.
22. Satheesh A., Manigandan T. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 10th March 2013, vol. 49, Iss. 1, pp. 38–47.
23. Boudour Mohamed, Hellal Abdelhafid. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 30, no. 1B.
24. Harikrishna D., Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator. TELKOMNIKA, vol. 10, no.1, March 2012, pp. 9–16.
25. Sujatha Er.S., Anitha Dr.R., Selvan Dr.P., Selvakumar Er.S. Transient Stability Enhancement of Tneb 400 kV Transmission Network with SVC. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 10th May 2014, vol. 63, iss. 1, pp. 85–91.
26. Zhang Rui, Xu Yan, Dong Zhao Yang, Wong Kit Po. Post-disturbance transient stability assessment of power systems

- by a self-adaptive intelligent system. The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib., 2015, vol. 9, iss. 3, pp. 296–305.
27. Welhazi Yosra, Guesmi Tawfik, Jaoued Imen Ben, Abdallah Hsan Hadj. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. *Electrical Systems* 10-3 (2014): 276–291.
 28. Akagi Hirofumi, Takahashi Kenji, Kobayashi Toshiaki, Sugihara Hiroaki, Kai Takaaki. Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization. *Electrical Engineering in Japan*, vol. 133, no. 1, 2000.
 29. Kothari D.P., Nagrath I.J. Power System Engineering. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
 30. Bulanova O.V, Malafeev A.V., Nikolaev N.A., Rotanova Yu.N., Panova E.A. Determination of asynchronous power of the synchronous generators in calculations of electromechanical transient phenomena in case of the asymmetrical modes. *Elektrika* [Electrician]. 2010, no. 8, pp. 24–26. (In Russian)

Определение границ динамической устойчивости генераторов промышленной электростанции с учетом двигательной нагрузки / О.В. Газизова, А.А. Аллаяров, Ю.Н. Кондрашова, Н.Т. Патшин // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2(39). С. 34-41. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-34-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-34-41)

Gazizova O.V., Allayarov A.A., Kondrashova Yu.N., Patshin N.T. Definition of Boundaries of the Dynamic Stability of Generators at Industrial Power Plant Taking into Account Motor Load. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 34-41. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-34-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-34-41)

¹ Институт автоматизации и информационных технологий Национальной Академии Наук Кыргызской Республики² Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПОНЕНТА ТРАССОИСКАТЕЛЯ НА БАЗЕ УСТРОЙСТВА СБОРА ДАННЫХ Л КАРД E502

В работе рассматриваются проблемы разработки программного обеспечения для визуализации, обработки, анализа и регистрации данных, полученных с помощью трассоискателя на базе модуля сбора данных Л КАРД E502 для поиска подземных электрических кабелей. Отличительными особенностями подобного программного обеспечения является необходимость фильтрации и анализа данных в режиме реального времени с возможностью привязки результатов трассировки кабеля к карте местности с помощью GPS. В связи с тем, что подобные приложения требуют сложной цифровой обработки сигналов, разработана библиотека на языке Cython для работы с модулем E502, позволяющая применить для обработки данных стандартные, уже существующие на языке Python реализации алгоритмов линейной алгебры, фильтрации, быстрого преобразования Фурье и других. Работоспособность предложенной в статье модели программного компонента трассоискателя продемонстрирована разработанным на языке Python программным обеспечением, позволяющим эффективнее бороться с помехами и точнее определять расположение кабельных трасс.

Ключевые слова: трассоискатель, модуль сбора данных, вейвлет-анализ, Python, Cython, фильтрация.

ВВЕДЕНИЕ

Высокая плотность расположения подземных кабельных линий и огромное количество источников электромагнитных помех, таких как сети связи, воздушные ЛЭП и т.д., требуют точных и надежных приборов. В связи с этим в настоящее время почти все кабелепоисковые системы снабжены цифровыми системами обработки сигналов, позволяющими эффективнее бороться с помехами и точнее определять расположение кабельных трасс [1]. Неотъемлемой частью любой системы обработки сигналов является звено, обеспечивающее возможность передачи информации в персональную или портативную ЭВМ [2]. Для этой цели могут использоваться различные аппаратно-программные средства, например благодаря своей универсальности устройство сбора данных Л Кард E502, представляющее собой универсальный 16-битный модуль ввода/вывода до 32-х аналоговых и 17-ти цифровых сигналов в компьютер через интерфейсы USB 2.0 (high-speed) и Ethernet (100 Мбит) с частотой преобразования до 2 МГц и возможностью их цифровой обработки в реальном времени. Кроме того, ООО «Л Кард» приветствует интеграцию своих модулей в пользовательские системы. [3].

С модулем поставляется драйвер, написанный на языке C, и библиотеки для языков программирования C++, C# и LabView. Однако в области анализа технических данных с интерактивной визуализацией результатов в настоящее время используются такие предметно-ориентированные языки программирования и инструменты – с открытым исходным кодом и коммерческие, как R, MATLAB, SAS, Stata и Python.

В комплекте с устройством сбора данных поставляется также бесплатно распространяемая программа LGraph2, предназначенная для регистрации, визуализации и обработки аналоговых сигналов, записанных с помощью измерительных устройств или модулей АЦП производства ООО «Л Кард» [5]. Однако возможности анализа данных этой программой весьма ограничены: в частности, с помощью этой программы нельзя выполнить вейвлет-анализ данных и привязку результатов измерения к карте местности, что необходимо для фиксации расположения кабельных линий.

В научном парке МГУ разработана виртуальная измерительная лаборатория PowerGraph, предоставляющая пользователю широкие возможности регистрации, визуализации, редактирования, обработки и анализа данных, полученных, в том числе, и с помощью устройства сбора данных Л Кард E502 [6]. Однако это программное обеспечение поставляется с аппаратным USB-ключом и имеет достаточно высокую стоимость, что не позволяет использовать его в собственных разработках.

С момента своего появления в 1991 году Python стал одним из самых популярных динамических языков программирования наряду с Perl, Ruby и другими. Из всех интерпретируемых динамических языков Python выделяется большим и активным сообществом среди исследователей по всему миру, использующих его для научных и инженерных расчетов. Применение Python для этой цели в промышленных и технических кругах значительно расширилось с начала 2000-х годов. Сравнительно недавнее появление библиотек различных математических методов обработки данных для Python (прежде всего, NumPy, pandas) сделало его серьезным конкурентом в решении задач манипулирования данными [4]. В сочетании с достоинствами Python как универсального языка программирования это делает его лучшим на сегодняшний день выбором для создания программного обеспечения устройств, для которых требуется реализация сложных алгоритмов обработки данных.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Несмотря на наличие такой необходимости, в настоящее время не существует какой-либо возможности создавать устройства на базе модуля Л Кард Е502, требующие сложной цифровой обработки сигналов. Поэтому актуальной задачей является разработка библиотеки для языка Python, позволяющей работать с устройством сбора данных Л Кард Е502, и создание программного компонента трассоискателя на языке Python для цифровой обработки и регистрации полученных данных, позволяющего эффективнее бороться с помехами и надежнее определять расположение кабельных линий.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПОНЕНТ ТРАССОИСКАТЕЛЯ

Разрабатываемый программный компонент трассоискателя должен решать задачи сбора, регистрации, визуализации, фильтрации и анализа данных, позволяя при этом выбрать: модуль сбора данных; тип подключения датчика к устройству сбора данных; канал и пределы измерения; частоту сбора данных; тип и параметры фильтра, а также параметры вейвлет-анализа. Кроме того, необходимо визуализировать координаты найденных кабельных линий с возможностью просматривать и сохранять результаты работы на карте.

Диаграмма вариантов использования программных средств показана на **рис. 1**. С помощью разработанного программного компонента возможно использовать все распространенные типы цифровых фильтров: фильтр верхних частот, фильтр нижних частот, полосовой фильтр и фильтр-пробку, так как вблизи ЛЭП и трубопроводов сигналы промышленной частоты 50 Гц и ее гармоники затрудняют поиск неисправности на линии [1]. И наконец, собранные данные должны быть привязаны к карте местности и сохранены в файл в формате PNG (Portable Network Graphics – портативная сетевая графика).

Важная функция программы – визуализация данных в виде временных рядов. В режиме реального времени можно видеть график исходных данных, поступающих с датчика, график отфильтрованных данных, а также результат вейвлет-преобразования исходного временного ряда в виде двумерной скалограммы. Более подробно алгоритм вейвлет-анализа временных рядов рассмотрен в работе [7].

СТРУКТУРНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПРОГРАММЫ

Своим успехом в качестве платформы для технических расчетов Python отчасти обязан простоте интеграции с кодом на С, С++ и FORTRAN. Во многих современных вычислительных средах применяется общий набор унаследованных библиотек, написанных на FORTRAN и С, содержащих реализации алгоритмов линейной алгебры, оптимизации, интегрирования, быстрого преобразования Фурье и других. Поэтому многочисленные компании и исследовательские институты используют Python как средство для интегрирования написанных за 30 лет программ [4].

Использование в качестве языка программирования Python позволяет задействовать описанные ниже внешние компоненты без изменения исходного кода (**рис. 2**).

NumPy реализует численные алгоритмы и работу с матрицами. SciPy – библиотека научных алгоритмов для Python, из этого модуля импортируются функции, реализующие фильтрацию данных. Matplotlib используется для построения графиков. Tkinter применяется для построения графического интерфейса пользователя (GUI – Graphic User Interface), Basemap используется для нанесения результатов работы на карту. Из библиотеки машинного обучения mlpy импортируются функции вейвлет-анализа данных [8]. Модуль python-grs предоставляет вспомогательные функции определения географического местоположения для привязки данных к карте местности.

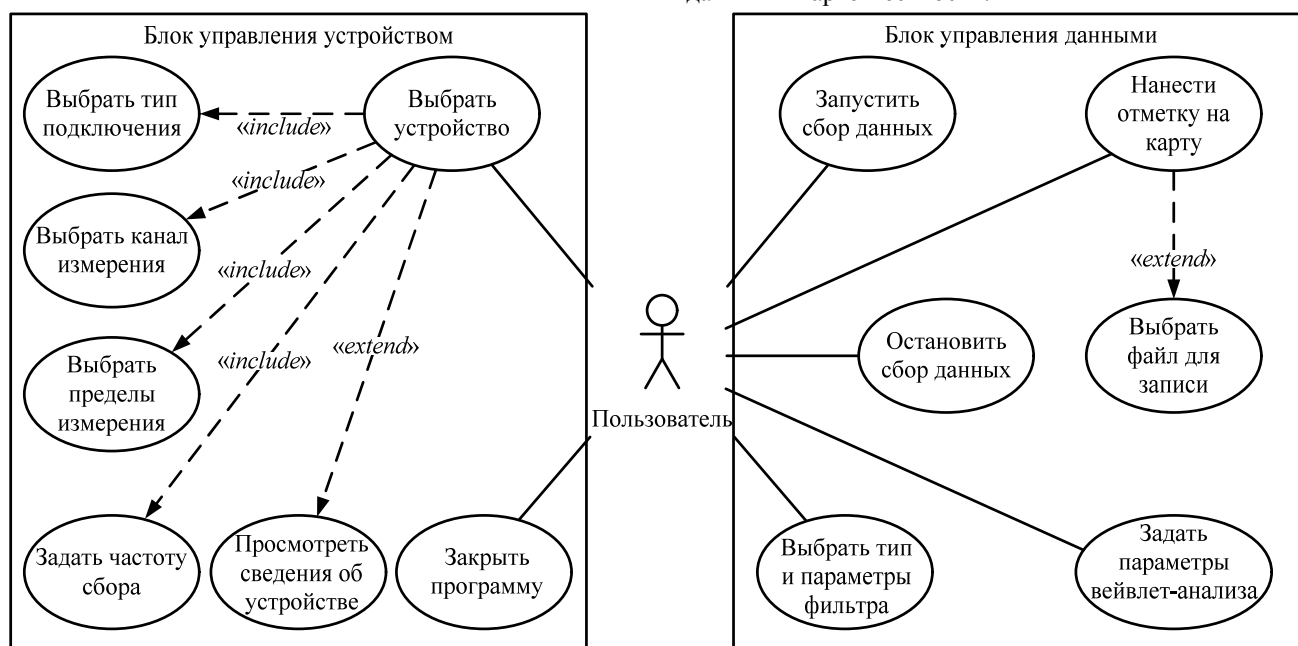


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования программных средств

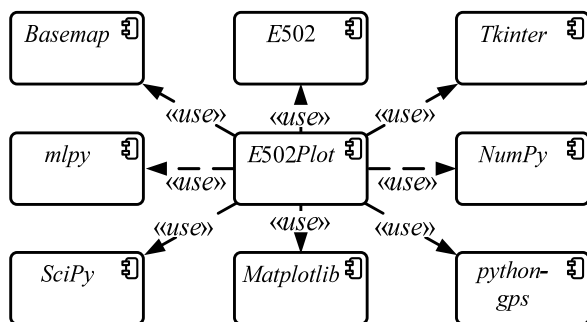


Рис. 2. Структурная схема программы

АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Для упрощения разработки и сопровождения код программы был разбит на несколько классов (рис. 3), объединенных в модуль E502Plot (см. рис. 2). Класс MainWindow реализует основное окно программы и предоставляет пользователю интерфейс для взаимо-

действия с устройством сбора данных. В главном окне расположены графики исходного и отфильтрованного временного ряда, а также его скалограмма. Вывод графических данных реализуется посредством класса Canvas. Непосредственное взаимодействие с устройством сбора данных осуществляется с помощью класса Reciver, который использует модуль mpy и класс Filter для обработки и фильтрации данных.

Класс MapWindow реализует вспомогательное окно, в котором отображается карта местности, текущее положение, а также все отмеченные пользователем пункты на карте с возможностью добавить новые или удалить ошибочно отмеченные точки на карте.

Класс E502 представляет собой программную абстракцию устройства сбора данных, реализованную на языке Cython, вышедшего за последние несколько лет на одно из первых мест в области создания быстрых компилируемых расширений Python и организации интерфейса с кодом на С и С++ [10].

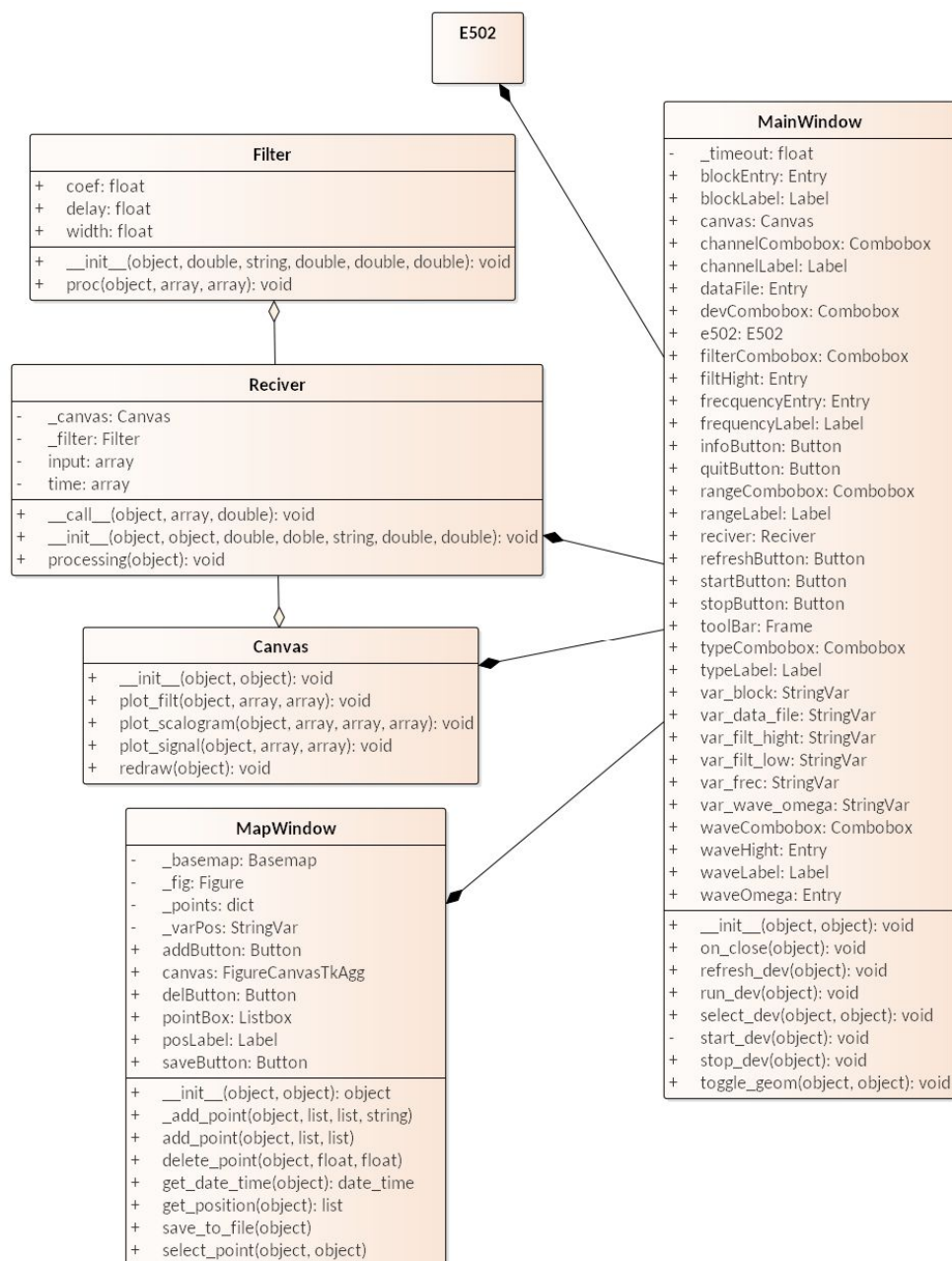


Рис. 3. Диаграмма классов программного компонента трассонискателя

В настоящее время Cython стал излюбленным инструментом многих разработчиков, пишущих на Python код инженерных приложений, который должен взаимодействовать с библиотеками на C или C++. Поэтому и интерфейс библиотеки платы сбора данных написан на языке Cython и оформлен в виде классов, показанных на **рис. 4**. В коде на языке Cython возможно организовать прямой вызов C-функций, используя такие низкоуровневые C-конструкции, как указатели, структуры, динамические массивы др. Так как Cython занимает промежуточное положение между языками C и Python, он обеспечивает полный контроль над всеми аспектами взаимодействия двух языков, оставаясь при этом совместимым с Python, что делает интерфейсный код на Cython более удобным для понимания и отладки по сравнению с другими инструментами (такими, как SWIG, SIP, Boost.Python, ctypes, cffi), предназначенными для этой цели [11]. Благодаря такой организации функции, импортированные с помощью Cython имеют производительность на уровне C, за вычетом минимальных накладных расходов на организацию совместимого с Python интерфейса, так как код на Cython сначала транслируется на язык C, а затем компилируется в бинарный код. В частности, написанная на Cython функция `get_usb_dev` находит все подключенные по интерфейсу USB устройства, возвращая список устройств и полную информацию о них, включая название, серийный номер и основные характеристики каждого устройства, а функция `get_usb_devcnt` возвращает количество устройств, подключенных по интерфейсу USB. С помощью функции `create_dev` можно инициализировать параметры уст-

ройства сбора данных, такие как используемый тип подключения, канал, частоту сбора данных и пределы для измерения, с помощью функции `get_dev_param` можно получить установленные с учетом технических ограничений параметры устройства. Функция `try_dev` позволяет проверить, были ли параметры устройства успешно проинициализированы, а функция `get_dev_info` позволяет узнать полные технические характеристики устройства. Наконец, функции `start_dev` и `terminate_dev` позволяют запустить и остановить сбор данных. Классы `Modes` и `Ranges` позволяют преобразовать строковое представление возможных типов подключений и пределов измерений платы сбора данных во внутреннее, используемое в драйвере устройства.

ОПИСАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Интерфейс пользователя состоит из главного окна и вспомогательного окна с картой для визуализации найденной трассы кабеля. В главном окне расположены элементы интерфейса, позволяющие выбрать и настроить устройство сбора данных (**рис. 5**), также здесь находятся графики исходного и отфильтрованного временного ряда и скалограмма исходного ряда данных. Для визуализации координат найденных кабельных линий предусмотрено специальное окно (**рис. 6**), позволяющее по отдельным точкам измерений создавать и редактировать найденную трассу кабеля, а также экспортировать результаты работы в графический файл в формате PNG.

E502	
<pre>- _adc_data: double * - _ch_cnt: uint32_t - _din_data: uint32_t - _f_adc: double * - _f_ch_modes: uint32_t - _f_ch_ranges: uint32_t - _f_channels: uint32_t * - _f_din: double - _f_frame: double - _hnd: t_x502_hnd - _lch_cnt: uint32_t - _rcv_buf: uint32_t - _read_block_size: uint32_t - _recv: bool - _usb_devcnt: uint32_t - __cinit__(object): void - __dealloc__(object): void - _free_dev(object): void - _set_dev_param(object, uint32_t, double, double, double): void - _stop_dev(object): void + create_dev(object, uint32_t, uint32_t, uint32_t *, double, double, double, uint32_t *, uint32_t *, uint32_t *): void + get_dev_info(object): void + get_dev_param(object): tuple + get_lib_ver(object): string + get_usb_dev(object): list + get_usb_devcnt(object): void + start_dev(object, function, int): void + terminate_dev(object): void + try_dev(object): bool</pre>	E502::Ranges <pre>+ get_range(string): uint32_t</pre> E502::Modes <pre>+ get_mode(string): uint32_t</pre>

Рис. 4. Классы библиотеки для устройства сбора данных LCard E502

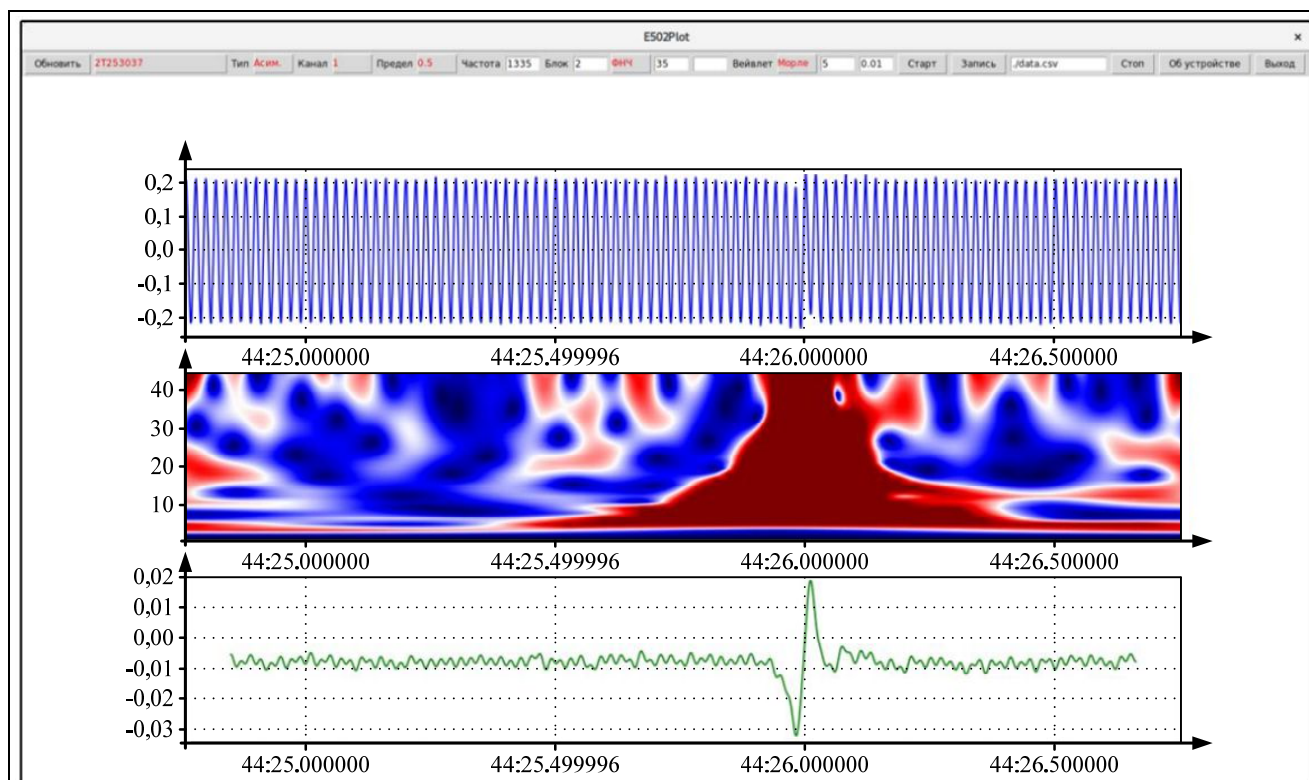


Рис. 5. Главное окно программы

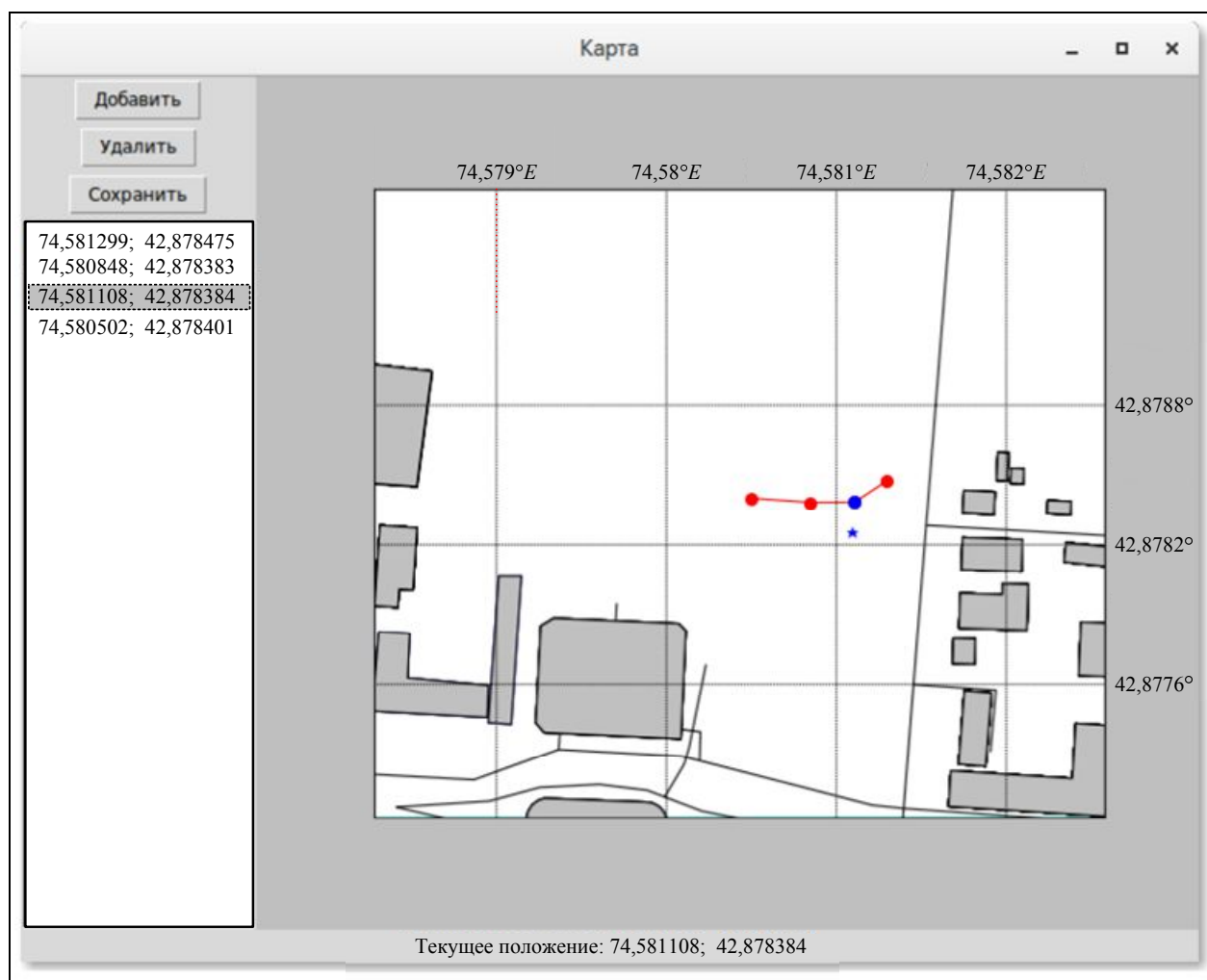


Рис. 6. Диалоговое окно карты с нанесенной на нее трассой кабеля

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, несмотря на то, что для работы с устройством сбора данных Л КАРД E502 уже разработано несколько инструментов, они либо имеют достаточно высокую стоимость, либо их возможностей недостаточно для создания программного компонента трассоискателя.

Разработка библиотеки для языка Python, позволяющей работать с устройством сбора данных Л КАРД E502, и создание программной компоненты трассоискателя на языке Python позволили решить задачи сбора, регистрации, визуализации, фильтрации и вейвлет-анализа данных, что дает возможность эффективнее бороться с помехами и надежнее определять расположение кабельных линий.

Выбор Python в качестве языка программирования позволил применить при проектировании программных средств готовый набор проверенных временем библиотек, написанных на FORTRAN и C, содержащих реализации алгоритмов линейной алгебры, фильтрации, визуализации, привязки данных к местности, быстрого преобразования Фурье и других.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метелев Б., Кочеров А. Поиск повреждений трасс: кабелеискатель изобретен заново // Первая миля. 2013. №6 (39). С. 68-73.
2. Брякин И.В. Прикладные аспекты малоглубинной магниторазведки // Проблемы автоматизации и управления. 2016. №1 (30). С. 65-75.
3. <http://www.lcard.ru/download/x502api.pdf> (дата обращения: 06.09.2017).
4. Маккинли Уэс. Python и анализ данных / пер. с англ. Слинкин А.А. М.: ДМК Пресс, 2015. 482 с.
5. <http://www.lcard.ru/products/software/lgraph> (дата обращения: 23.10.2017).
6. Измайлов Д.Ю. Виртуальная измерительная лаборатория PowerGraph // Пикад. 2007. № 3. С. 42-47.
7. Верзунов С.Н. Вейвлет-преобразование как инструмент анализа магнитовариационных данных // Проблемы автоматизации и управления. 2014. №2 (27). С. 52-61.
8. <https://arxiv.org/pdf/1202.6548.pdf> (дата обращения: 25.01.2018)
9. Верзунов С.Н. Разработка программных средств для вейвлет-анализа одномерных временных рядов // Проблемы автоматизации и управления. 2014. №2 (27). С. 62-71.
10. <http://cython.org/#about> (дата обращения: 08.09.2017)
11. Dalcin L., Bradshaw R., Smith K., Citro C., Behnel S., Seljebotn D.S. Cython: The Best of Both Worlds // Computing in Science & Engineering. 2011. Vol. 13, N. 2. P. 31-39.

Поступила в редакцию 21 марта 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF PROGRAM COMPONENT OF THE CABLE TRACER BASED ON THE DEVICE FOR THE DATA ACQUISITION BOARD L CARD E502

Sergei N. Verzunov

Ph.D. (Eng.), leading researcher, Laboratory of data measurement systems, Institute of Automation and Information Technology, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: verzunov@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3130-2776>

Igor V. Bochkarev

D.Sc. (Eng.), Professor, the Department of Electrical Engineering, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: elmech@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

In the article we discuss the problem of software development intended for visualization, processing, analyzing and recording of the data obtained by the locator to search for underground electric cables on the basis of data acquisition board L CARD E502. The features typical for such software is the need for data filtering and analysis in real time with the ability to link the results of the cable trace to the map of the terrain using GPS. Due to the fact that such applications require complex digital signal processing, a library has been developed in Cython language for operating with the E502 module, which makes it possible to apply for the processing of data of the finished Python implementations of algorithms for linear algebra, filtering, fast Fourier transformation and others. The software developed in Python language, which makes it possible to more effectively deal with interference and to better determine the location of cable routes, demonstrates the performance of the proposed model of the program component of the tracer.

Keywords: trace searcher, data acquisition module, wavelet analysis, Python, Cython, filtering.

REFERENCES

1. Metelev B., Kocherov A. Search for damage to the traces: the cable finder was invented anew. *Pervaya milya* [FIRST MILE]. 2013, no. 6 (39), pp. 68-73. (In Russian)
2. Bryakin I.V. Applied aspects of shallow magnetic prospecting. *Problemy avtomatiki i upravleniya* [Problems of automation and control]. 2016, no. 1 (30), pp. 65-75. (In Russian)
3. <http://www.lcard.ru/download/x502api.pdf> (circulation date is September 6, 2017).
4. McKinley Wes. *Python i analiz dannykh* [Python and Data Analysis] / Translated from English. Slinkin A.A. Moscow: DMC Press, 2015. 482 p. (In Russian)
5. <http://www.lcard.ru/products/software/lgraph> (circulation date 23.10.2017).
6. Izmailov D.Yu. Virtual measuring laboratory PowerGraph. *Pikad* [Picad]. 2007, no. 3, pp. 42-47. (In Russian)
7. Verzunov S.N. Wavelet transform as a tool for analyzing magnetovariance data. *Problemy avtomatiki i upravleniya* [Problems of Automation and Control]. 2014, no. 2 (27), pp. 52-61. (In Russian)

8. <https://arxiv.org/pdf/1202.6548.pdf> (circulation date January 25, 2013)
 9. Verzunov S.N. Development of software for wavelet analysis of one-dimensional time series. *Problemy avtomatiki i upravleniya* [Problems of Automation and Control]. 2014, no. 2(27), pp. 62-71. (In Russian)
 10. <http://cython.org/#about> (date of circulation on September 8, 2017)
 11. Dalcin L., Bradshaw R., Smith K., Citro C., Behnel S., Seljebotn D.S. Cython: The Best of Both Worlds. *Computing in Science & Engineering*. 2011, vol. 13, no. 2, pp. 31-39.
-

Верзунов С.Н., Бочкарев И.В. Разработка программного компонента трассоискателя на базе устройства сбора данных Л КАРД Е502 // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 2(39). С. 42-48. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-42-48](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-42-48)

Verzunov S.N., Bochkarev I.V. Development of Program Component of the Cable Tracer Based on the Device for the Data Acquisition Board L CARD E502. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 42-48. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-42-48](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-42-48)

Гетопанов А.Ю.¹, Табаров Б.Д.², Климаш В.С.²¹ ОАО «АМУРМЕТАЛЛ», г. Комсомольск-на-Амуре² Комсомольский-на-Амуре государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ СВОЙСТВ И ВЛИЯНИЯ НА СЕТЬ РЕАКТОРНО-ТИРИСТОРНОГО УСТРОЙСТВА НА ВЫСОКОЙ СТОРОНЕ ПЕЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Рассмотрен наиболее энергоёмкий объект сталеплавильного комплекса – дуговая сталеплавильная печь (ДСП-125) металлургического предприятия ОАО «АМУРМЕТАЛЛ», г. Комсомольск-на-Амуре. Описана функциональная роль статического тиристорного компенсатора (СТК). Приведена упрощённая схема электроснабжения ДСП. Указано на недостаточное быстродействие гидравлических приводов, перемещающих электроды печи, что приводит к разрыву дуги. Ступенчатое регулирование напряжения на входе печного трансформатора (ПТ), с помощью регулятора под нагрузкой (РПН), ведёт к потере непрерывного контроля над технологическим процессом выплавки стали. При переключении ступеней РПН возникают межвитковые короткие замыкания, которые создают электродинамические ударные нагрузки на обмотки трансформатора, снижающие надёжность ПТ. Предложено техническое решение, позволяющее заменить РПН, на бесконтактное устройство, позволяющее непрерывно регулировать напряжение, в заданных пределах, на высокой стороне ПТ. В среде «MatLab» разработаны математические модули реакторно-тиристорного регулятора напряжения (РТРН) и его системы управления. Приведена блочно – модульная имитационная модель РТРН с реальными параметрами. Численными экспериментами проведены исследования его регулировочных свойств и влияния на сеть. Рассмотрены осциллограммы тока и напряжения элементов устройства. Результаты исследования показали, что процесс регулирования существенно не влияет на форму тока и напряжения сети, отсутствует режим прерывистого тока. Рассмотрена возможность использования тиристорного регулятора напряжения с естественной коммутацией (ТРНЕ), входящего в состав СТ.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, тиристорный вентиль, реакторно-тиристорный регулятор напряжения, ток дуги, печной трансформатор, статический тиристорный компенсатор, регулятор под нагрузкой.

ВВЕДЕНИЕ

Достаточно эффективными, как показывает современная практика, признаны металлургические мини-заводы мощностью 600–2000 тыс. т/год. Они представляют собой промышленные модули, состоящие из дуговой сталеплавильной печи (ДСП), агрегата ковш – печь (АКП), машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), системы статической компенсации реактивной мощности (ССКРМ), главной преобразующей подстанции (ГПП). Основное потребление электроэнергии в технологическом процессе выплавки стали приходится на долю ДСП со средним удельным показателем 385 кВА·ч/т [1]. Авторы выяснили на примере металлургического завода ОАО «АМУРМЕТАЛЛ» г. Комсомольска-на-Амуре, что это составляет приблизительно 60–80% от затрат электроэнергии на производство готовой продукции, в зависимости от состава шихты и интенсивности производства. Очевидно, что рациональное потребление электроэнергии будет способствовать снижению себестоимости продукции сталелитейной промышленности.

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Электросталеплавильный цех завода ОАО «АМУРМЕТАЛЛ» оснащён печью ДСП-125 производства итальянской фирмы «CONCAST», упрощённая однолинейная схема электроснабжения которой изображена на рис. 1. Печной трансформатор (ПТ) марки «TAMINI» – трёхфазный, двухобмоточный, номинальной мощностью 120 МВА при напряжении 35 кВ с высокой стороны. Соответственно условиям эксплуатации ПТ рассчитан на длительную работу в режиме к.з., при резкоременной, несимметричной нагрузке.

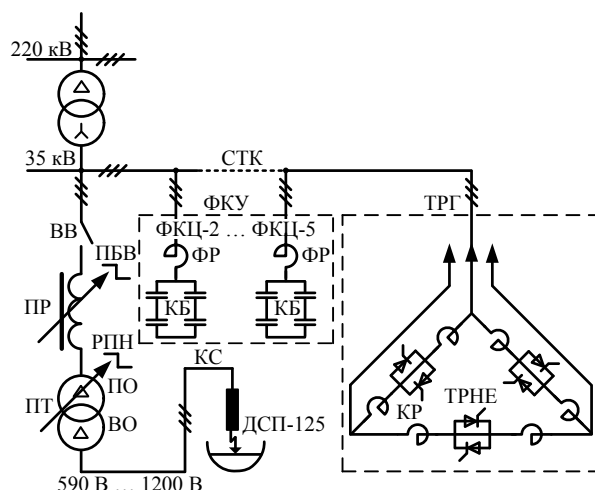


Рис. 1. Упрощённая однолинейная схема электроснабжения ДСП-125 ОАО «АМУРМЕТАЛЛ»

Электроды печи подключены к зажимам низкого напряжения вторичной обмотки (ВО) ПТ через короткую сеть (КС). Первичная обмотка (ПО) снабжена восемнадцатью отпайками, подключенными к ступенчатому регулятору под нагрузкой (РПН), который позволяет варьировать напряжением на зажимах ВО от 590 до 1200 В. Для повышения индуктивности контура ПО в его цепь последовательно подключен печной реактор (ПР), что помогает поддерживать непрерывность дуги, при переходах фаз напряжения сети через «ноль». ПР производства «TAMINI», максимальной мощностью 20 МВАр, с помощью встроенного шестиступенчатого переключателя без возбуждения (ПБВ) позволяет регулировать собственную индуктивность от нуля до 14,7 мГн. Автоматизированная система управления (АСУ) ДСП, на основании непрерывного анализа импеданса дуги, оперирует РПН и взаимно-независимыми гидравлическими приводами

электродов, тем самым, стремясь поддерживать ток дуги в заданных рабочих координатах.

Статический тиристорный компенсатор (СТК) состоит из тиристорно-реакторной группы (ТРГ) и фильтрокомпенсирующей установки (ФКУ).

СТК предназначен для косвенной компенсации реактивной мощности, потребляемой ПТ, согласно условию

$$Q_{\text{ПТ}} + Q_{\text{ТРГ}} = Q_{\text{ФКУ}},$$

где $Q_{\text{ПТ}}$ – реактивная мощность, потребляемая ПТ; $Q_{\text{ТРГ}}$ – реактивная мощность, потребляемая компенсирующими реакторами; $Q_{\text{ФКУ}}$ – реактивная мощность, вырабатываемая конденсаторами ФКУ.

ФКУ представляет собой устройство, состоящее из набора фильтрокомпенсирующих поперечно-резонансных цепей (ФКЦ), с отдельными коммутационными аппаратами и средствами релейной защитной автоматики, включающими в себя конденсаторные батареи (КБ) и фильтрующие реакторы (ФР). Набор ФКЦ обычно ограничивается наиболее часто встречающимися, при работе сталеплавильной печи, высшими гармониками, как правило 2, 3, 4, 5. На промышленной частоте КБ компенсируют индуктивную составляющую реактивной мощности, вырабатываемой печным трансформатором, в процессе работы ДСП. Для баланса между индуктивной и ёмкостной составляющей реактивной мощности, параллельно сети 35 кВ, подключена тиристорно-реакторная группа. Регулирование реактивной мощности, потребляемой компенсирующими реакторами (КР) ТРГ, осуществляется с помощью трёхфазного тиристорного регулятора напряжения с естественной коммутацией (ТРНЕ), изготовленного по проекту совместного итало-российского предприятия «Ансальдо-ВЭИ» (см. **рис. 1**). Трёхфазный ТРНЕ рассчитан на номинальную мощность 160 МВАр при номинальном напряжении 35 кВ. Каждая фаза ТРНЕ состоит из двух параллельных силовых модулей, по 9 пар тириستоров класса 65, соединённых встречно-параллельно. Система управления тиристорами основана на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Развязка силовых модулей с системой управления обеспечивается с помощью оптоэлектронных компонентов и оптических каналов связи.

Цель и задачи исследования

Наряду с современными технологиями управления мощностью электропотребителей, на основе силовых полупроводниковых и микропроцессорных элементов (например, тиристорный регулятор напряжения в составе ТРГ), для управления мощностью дуги ДСП всё ещё применяют РПН, электромеханический контактный агрегат, который имеет ряд недостатков. Переключение ступеней РПН с промежутками в 3–5 с приводит к потере непрерывного контроля над технологическим процессом и увеличению времени цикла выплавки стали [2]. Межвитковые к.з., сопровождающие каждое переключение, несмотря на токоограничивающие реакторы, конструктивно предусмотренные в РПН, приводят к значительным электродинамическим ударным воздействиям на обмотки ПТ, тем самым, снижая надёжность ПТ [3–4]. Вследствие износа контактных поверхностей, РПН требуется регулярное техническое обслуживание с частичной разборкой, что ведёт к простою производственных мощностей.

С развитием силовой полупроводниковой электроники и технологии ее применения в высоковольтных устройствах, таких как тиристорные преобразователи, тиристорные регуляторы напряжения, рассчитанные на мощность, сопоставимую с мощностью печных трансформаторов ДСП, появилась реальная возможность усовершенствовать традиционные методы коммутации и регулирования напряжения на зажимах ПТ, а следовательно, и управлять током дуги.

Обоснование необходимости тиристорного регулирования достаточно доказательно изложено в публикации [5]. Цель проводимого исследования – выявить регулировочные свойства реакторно-тиристорного устройства, определить допустимые пределы регулирования и наметить перспективы работы в данном направлении. При этом необходимо ориентироваться на параметры действующего производства, в данном случае параметры системы электропитания ДСП-125 ОАО «АМУРМЕТАЛЛ».

Для достижения поставленной цели потребовалось решить ряд задач в среде «MatLab»:

- разработать математический модуль силового трёхфазного реакторно-тиристорного устройства для управления напряжением на высокой стороне ПТ;
- разработать математическую модель нагрузки с электрическими параметрами, близкими к параметрам электрической дуги;
- разработать упрощённую, имитационную модель электропитания ДСП;
- численными экспериментами исследовать регулировочные свойства устройства и его влияние на питающую сеть.

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ

Существуют публикации, как отечественные [6, 7], так и зарубежные [8–9], в которых предлагается применять однооперационные тиристоры для регулирования напряжения трансформатора. В предложенных способах тиристоры используются либо как набор ключевых элементов взамен механических контактов РПН (что не устраняет проблему дискретности регулирования), либо как замена РПН в трёхобмоточных ПТ (в цепи вольтодобавочного трансформатора). Предлагаемая разработка ориентирована на двухобмоточные ПТ малой и средней мощности и основана на патенте «Способ включения, выключения и регулирования напряжения трансформаторной подстанции» [10], в части регулирования напряжения. Следует пояснить, что отказ от применения способа коммутации трансформаторной подстанции, предусмотренного в изобретении, вызван конструктивными особенностями печных трансформаторов. Резкопеременная, несимметричная нагрузка, длительная работа в режимах, близких к к.з., вызывают значительные электродинамические усилия в обмотках и магнитопроводе ПТ. В конструкциях печных трансформаторов предусмотрено влияние этих факторов, поэтому переходные процессы, происходящие при включении и отключении трансформатора, не нанесут ему существенного ущерба [11].

На **рис. 2** иллюстрируется принцип технического решения, позволяющего регулировать ток в цепи низкого напряжения ДСП.

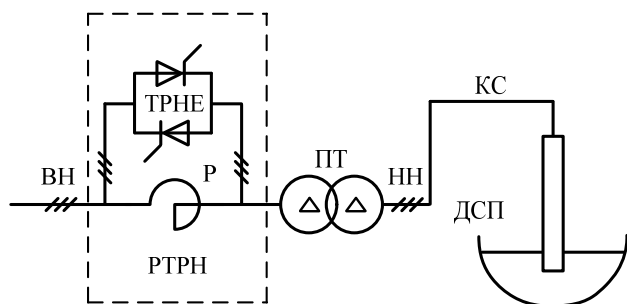


Рис. 2. Упрощённая однолинейная схема силовых цепей ДСП для пояснения принципа регулирования тока в цепи низкого напряжения

К зажимам первичной обмотки трёхфазного ПТ, со стороны высокого напряжения (ВН), последовательно подключён трёхфазный реактор (Р). Параллельно трёхфазному реактору в цепь ВН подключен трёхфазный ТРНЕ. Изменением проводящего состояния тиристоров ТРНЕ обеспечивается регулирование напряжения на зажимах первичной обмотки ПТ. Верхний предел напряжения на нагрузке задаётся коэффициентом трансформации ПТ при полностью открытых тиристорах, а нижний предел ограничивается индуктивностью Р при полностью закрытых тиристорах. Управление током в цепи низкого напряжения (НН) производится путём регулирования напряжения на зажимах первичной обмотки ПТ.

При разработке нагрузочного модуля исходили из следующих соображений. Электрическая дуга ДСП как физический процесс представляет собой многофакторное явление. На неё могут влиять: физико-химический и структурный состав скрапа, плотность и форма печных электродов, мощность короткого замыкания питающей сети и т.п. Эти факторы, зачастую, носят случайный, непрогнозируемый характер. Существуют

публикации, в которых представлены модели дуги, в том числе в среде «MatLab» [12–13], но все математически описанные электродуговые процессы происходят в условиях, отличающихся от реальных. Наше исследование носит предварительный характер и направлено на изучение возможности, в принципе, применения РТ-регулятора напряжения для поддержания тока короткой сети ДСП на заданном уровне. Поэтому для достижения цели мы применили модель ПТ с реальными параметрами, а параметры модели переменной RL-нагрузки подбирали так, чтобы ток короткой сети печного трансформатора соответствовал реальному рабочему диапазону ДСП-125 (50–90 кА).

На рис. 3 приведена блочно-модульная схема модели электроснабжения ПТ с тиристорно-реакторным регулятором напряжения, разработанная в среде «MatLab». Модель устройства содержит: три однофазных источника напряжения (U_a, U_b, U_c); блок высоковольтных выключателей (ВВ); модуль реакторно-тиристорного регулятора напряжения (РТПН); трёхфазный силовой трансформатор (СТ); модуль трёхфазной активно-индуктивной нагрузки (RL); модуль системы управления тиристорами (СУ); датчики тока и напряжения ($RS1, RS2, RU1$) и другие вспомогательные элементы.

На рис. 4 показана развёрнутая схема модуля РТПН, в состав основных элементов которой входят: однооперационные тиристорные модули, соединённые пофазно, встречно-параллельно (1–6), и модуль трёхфазного реактора (L), включённый параллельно тиристорам.

С помощью системы управления, схема которой приведена на рис. 5, задаётся угол отпирания тиристоров и осуществляется синхронизация с сетью.

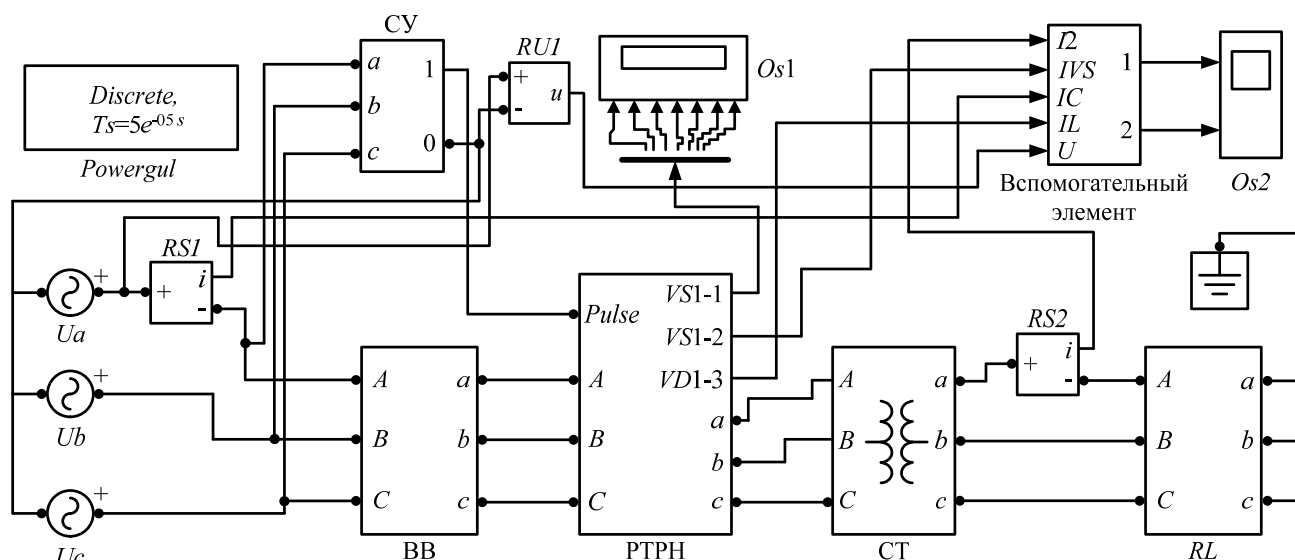


Рис. 3. Блочная-модульная схема реакторно-тиристорного регулятора напряжения на высокой стороне ПТ

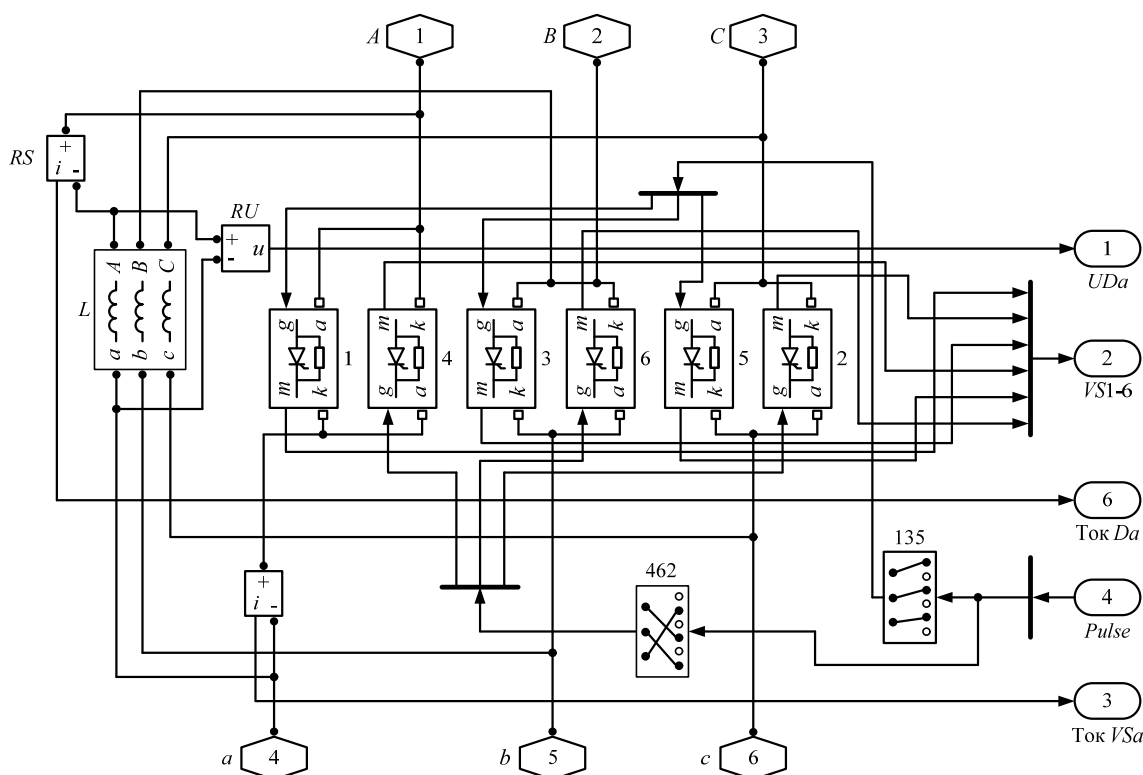


Рис. 4. Развёрнутая схема модуля РТРН

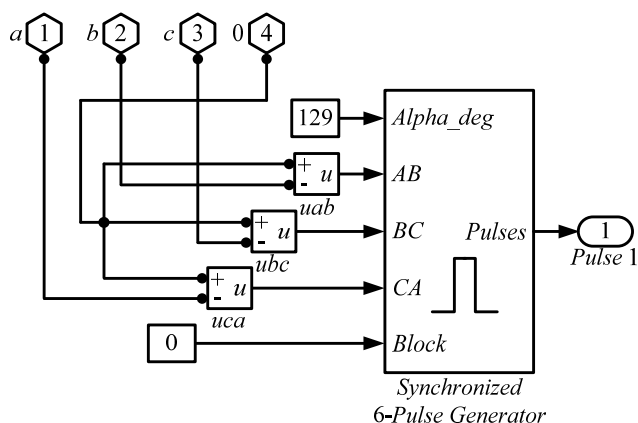


Рис. 5. Схема модуля системы управления тиристорами РТРН

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

Исследования РТРН производились на разработанной математической модели путём численных экспериментов в среде «MatLab» [14]. Стабилизация тока во вторичном контуре ПТ, при изменяющейся мощности нагрузки, обеспечивалась изменением проводящего состояния тиристоров. На рис. 6 приведены однофазные осциллограммы: напряжения (U_c) и тока (I_c) сети, тока в контуре нагрузки (I_n), тока тиристорного регулятора (I_t) и тока реактора (I_p). Было выяснено, что при данном выборе мощностей нагрузки диапазон регулирования напряжения ПТ составляет не менее 50% от номинала. При этом токи сети и нагрузки остаются непрерывными, а напряжение сети не меняется.

На рис. 7 показаны однофазные осциллограммы напряжений при нагрузке средней мощности, где U_c – напряжение сети, U_n – напряжение на нагрузке и U_p – напряжение на РТРН.

На рис. 8 построена диаграмма регулировочной характеристики ПТ с тиристорным регулятором напряжения, которая показывает зависимость напряжения на нагрузке (U_n) от угла отпирания тиристоров α при понижающей мощности нагрузки. Ток в контуре нагрузки (I_n) при этом остаётся практически неизменным.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС ПРОМЫШЛЕННО ВЫПУСКАЕМОГО ТРНЕ

Как говорилось ранее, на предприятии ОАО «АМУРМЕТАЛЛ» применяется высоковольтный ТРНЕ в системе статической компенсации реактивной мощности. Внедрённый на СТК в 2007 году, взамен устаревшей модели ВТСВП 1700/38,5, выпускаемой ещё советской промышленностью, современный тиристорный регулятор напряжения имеет значительные преимущества. Оснащенный тиристорами класса 65 на номинальный ток 2250 А «Трёхфазный Водохлаждаемый Тиристорный Вентиль 160 МВАр / 35 кВ, 50 Гц Статического Тиристорного Компенсатора ОАО «АМУРМЕТАЛЛ» (ТВТВ) разработан на италороссийском предприятия «Ансальдо-ВЭИ» [15]. Масштабные показатели нового устройства снизились на порядок, по сравнению с предыдущим. Усовершенствованная система управления на основе ПЛИС за десятилетний срок эксплуатации ни разу не давала сбой. Силовым модулям ни разу не потребовалась замена тиристоров или вспомогательных элементов. Единственный объект устройства, которому необходимы периодические материальные затраты, – система водохлаждения, где производится регулярная замена фильтров и картриджей-деионизаторов.

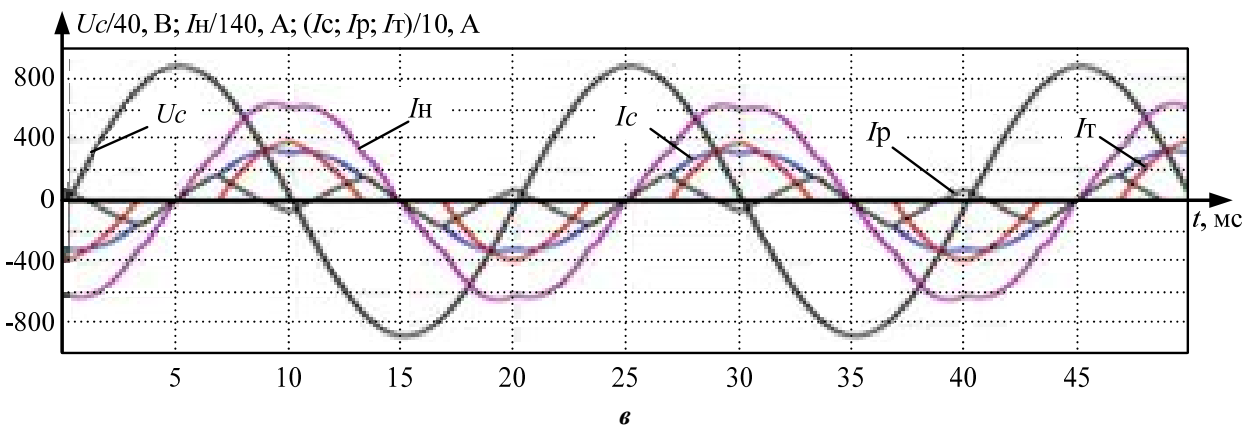
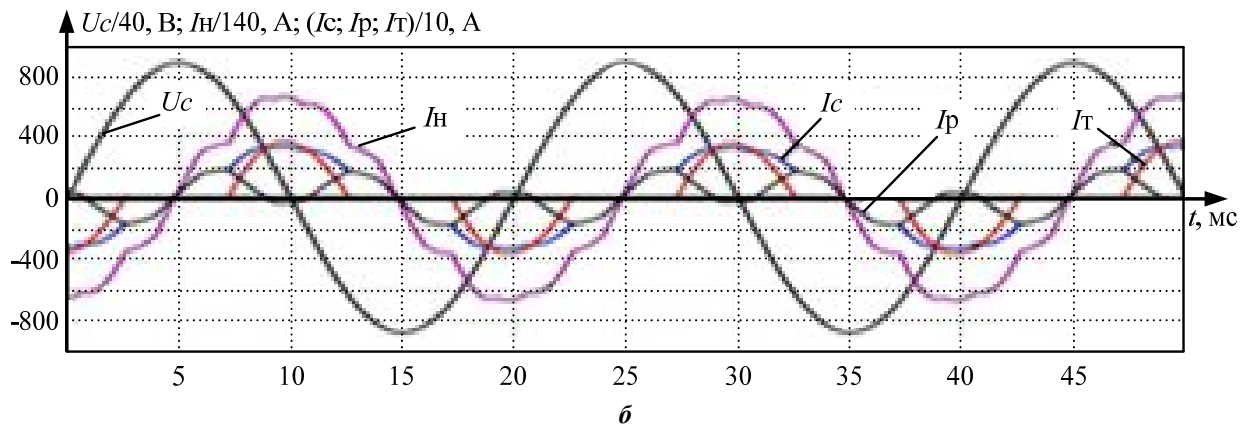
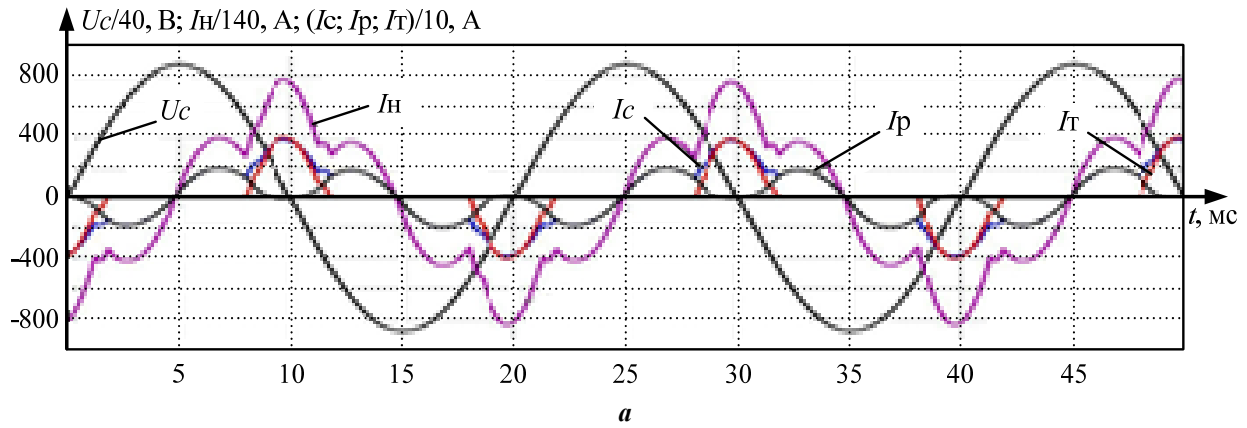


Рис. 6. Осциллограммы фазы «А» при различных мощностях нагрузки:
а – минимальная; б – средняя; в – максимальная

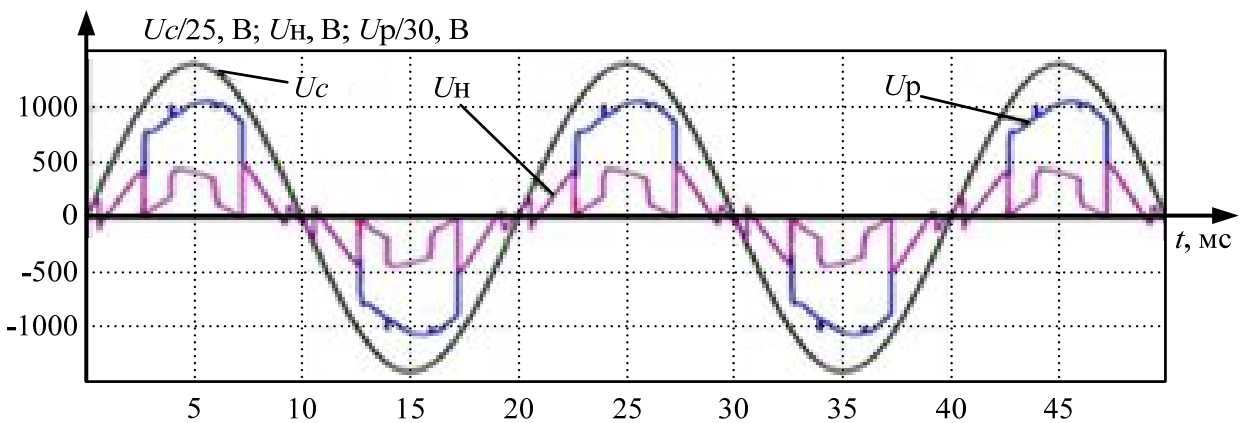


Рис. 7. Осциллограммы фазных напряжений при нагрузке средней мощности

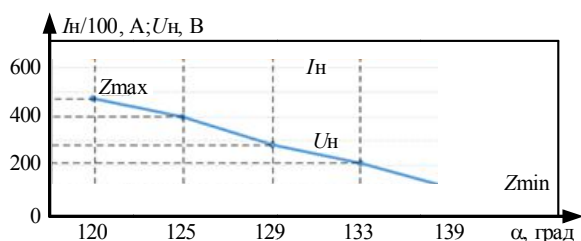


Рис. 8. Регулировочные характеристики ПТ с реакторно-тиристорным устройством в режиме стабилизации тока при изменяющейся мощности нагрузки

Но эти работы не требуют высокой квалификации специалистов. На рис. 9 приведена фотография ТВТВ, СТК ОАО «АМУРМЕТАЛЛ». Таким образом, существует ТРНЕ, прошедший апробацию в условиях промышленной эксплуатации и подходящий по электрическим параметрам, для применения в тиристорно-реакторном регуляторе напряжения на высокой стороне ПТ мощностью до 120 МВА.

Необходимы дальнейшие исследовательские и проектные работы по адаптации данного устройства в новом качестве. В публикации [6] затронут вопрос взаимодействия быстродействующего тиристорного регулятора напряжения и гидравлических приводов электродов в технологическом процессе выплавки стали. Постоянная времени системы гидроприводов ($0,2 \div 0,4$ с) значительно больше постоянной времени дуги ($0,1 \div 0,6$ мс) из-за инерционности перемещаемых масс, поэтому адекватно реагировать на резкопеременные электродуговые процессы она не в состоянии. Очевидно, что, дополняя широкий диапазон регулирования системы позиционирования электродов, тиристорно-реакторным регулятором напряжения, с быстродействием порядка 1 мс, можно достичь качественно нового уровня управляемости технологическим процессом плавки, что невозможно при использовании РПН с быстродействием 3–5 с. Возможность стабилизации тока дуги в заданных рабочих координатах, как следствие, позволит сократить расход графитированных электродов, минимизировать потери от угара и увеличить межремонтные периоды футеровки печи. Быстрое и непрерывное управление электрическими параметрами ДСП даст возможность усовершенствовать технологические процессы выплавки стали, снизит энергетические потери. Пофазное регулирование мощности даст возможность снизить асимметрию токов, чем уменьшит нагрузку на СТК.



Рис. 9. Фотография ТВТВ, СТК ОАО «АМУРМЕТАЛЛ»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная исследовательского плана работа, направленная на совершенствование электросталеплавильного комплекса, позволила сделать следующие выводы.

1. Применяемый в статическом компенсаторе реактивной мощности электросталеплавильного комплекса тиристорный регулятор ТРНЕ на 2 кА и 35 кВ по току и напряжению полностью подходит для регулирования напряжения на высокой стороне печного трансформатора. Для улучшения технологического процесса дуговой плавки металла за счет стабилизации тока дуги и повышения надежности печного трансформатора целесообразно взамен РПН на высокой стороне печного трансформатора применить реакторно-тиристорный регулятор на основе ТРНЕ.

2. На разработанной в среде «MatLab» имитационной модели печного трансформатора с реакторно-тиристорным регулятором напряжения исследованы мгновенные значения токов и напряжений в процессе регулирования угла управления тиристорами, при изменении напряжения в сети и мощности нагрузки. В результате исследований численными экспериментами установлено:

а) реакторно-тиристорное устройство обеспечивает требуемый диапазон регулирования напряжения на высокой стороне печного трансформатора с сохранением непрерывного тока в сети и трансформаторе при работе тиристоров ТРНЕ в режиме прерывистых токов;

б) перемещение электродов и одновременное регулирование напряжения с высоким быстродействием будет предотвращать гашение электрической дуги и на протяжении всей плавки металла улучшит стабильность работы электросталеплавильного комплекса и его статического компенсатора реактивной мощности в стационарных режимах;

в) при значительных искажениях токов через тиристоры и реактор, искажения, вносимые устройством в сеть и трансформатор, сравнительно небольшие, что также способствует улучшению стабильности работы статического компенсатора реактивной мощности, повышению его надежности и энергетических показателей электросталеплавильного комплекса в целом.

3. Предлагаемое быстродействующее реакторно-тиристорное устройство Р-ТРНЕ для непрерывного регулирования напряжения на высокой стороне печного трансформатора, выполненное на основе освоенного производством изделия ТРНЕ, имеет высокую готовность к применению в электросталеплавильном комплексе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металлургические мини-заводы / Смирнов А.Н. и др. Донец: Норд-Пресс, 2005. 469 с.
2. Якимов И.А., Николаев А.А., Корнилов Г.П. Исследование сверхмощных дуговых сталеплавильных печей с тиристорным регулятором напряжения в промежуточном контуре печного трансформатора // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т. 1, №1. С. 41–47.
3. Требования к системе мониторинга технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Сарлыбаев А.А., Леднов Р.А. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. № 2 (25). С. 58–68.
4. Свиридов В.А., Бахарев Н.П. Обеспечение электродинамической стойкости силовых трансформаторов // Молодой ученый. 2017. №32. С. 20–25.

5. Пат. 166559 Российская Федерация, Н 02 М 5/00, Н 02 Р 13/00. Пускорегулирующее устройство на стороне высокого напряжения трансформаторной подстанции / Климаш В.С., Табаров Б.Д., Гетопанов А.Ю.; заявитель ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». № 2016121772/07; заявл. 01.06.2016; опубл. 10.12.2016, Бюл. №34.
6. Якимов И.А. Обоснование тиристорного регулирования напряжения трансформатора дуговой сталеплавильной печи // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №2 (35). С. 41–48.
7. Пат. 2086076 Российская Федерация, МПК Н 05 И 7/148 G 05 F 1/02, F 27 D 19/00. Способ регулирования тока трёхфазной электродуговой печи прямого нагрева / Дж. Дженсини, Л. Морелло, Дж. Коассини, Р. Фраджакомо. Опубл. 27.07.1997.
8. Pat. 09/778,835 United States, H05B 7/144; H05B 7/148. Power control system for ac electric arc furnace / Hatch Associates Ltd., Satcon Power Systems Canada Ltd.; Assignees Thomas Lai Wai Ma, Mohammad Sedigay, Brian Kennet Perkins, Theodorus Anthonius Gerritsen, Janos Rajda. №6, 603,795 B2; fil. 02. 8, 2001; publ. 08. 5, 2003.
9. Zenzo I., Tsutomu K. Steel melting arc furnace transformer equipment directly connected to 154 kV power source with tertiary load switching system // Fuji electric review. 2014, vol. 17, no. 1, pp.16–23.
10. Пат. 2622890 Российская Федерация, H02M 5/257. Способ включения, выключения и регулирования напряжения трансформаторной подстанции / Климаш В.С., Табаров Б.Д., Гетопанов А.Ю.; заявитель ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». № 2016131037/07; заявл. 27.07.2016; опубл. 21.06.2017, Бюл. №18.
11. Аншин В.Ш. Электротехнические трансформаторы для металлургической промышленности, выпускаемые ОАО «ЭЛЕКТРОЗАВОД» // Электро. 2006. № 4. С. 16–20.
12. Верещаго Е. Н., Костюченко В. И. Модель электрической дуги в Matlab / simulink // Электротехника и электроэнергетика. 2013. №2 (25). С. 40–46.
13. Чунихин А.А. Электрические аппараты. Общий курс: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988. 720 с.
14. Свидетельство Российская Федерация о регистрации программы для ЭВМ. Программный комплекс математических моделей магнитно-тиристорного пускорегулирующего устройства для силового трансформатора в среде MatLab / Климаш В.С., Табаров Б.Д.; заявитель «Климаш Владимир Степанович». № 2017613852; заявл. 16.12.2016; опубл. 03.04.17, Бюл. №4.
15. Статический тиристорный компенсатор реактивной мощности типа СТК-160/35: техническое описание и инструкция по эксплуатации / АО Ансальдо-ВЭИ. М., 2008. 71 с.

Поступила в редакцию 01 марта 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INVESTIGATION OF REGULATION PROPERTIES AND INFLUENCE OF THE REACTOR-THYRISTOR DEVICE ON THE NETWORK ON THE HIGH-VOLTAGE SIDE OF THE FURNACE TRANSFORMER

Aleksey Yu. Getopanov

Postgraduate student, the Head of substation section of the electrical repair shop, OJSC «AMURMETALL», Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: Getopanov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4638-9993>

Bekhruz D. Tabarov

Postgraduate student, the Department of Career Guidance and Advertising, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: behruz.tabarov@mail.ru.

Vladimir S. Klimash

D.Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: klimash@yandex.ru.

The paper considers the most energy-intensive object of the steelmaking complex, particularly, the electric arc furnace (EAF-125) of a metallurgical open Joint-stock company "AMURMETAL", Komsomolsk-on-Amur. The authors described the functional role of the static thyristor compensator (STC). The simplified scheme of electric power supply of the EAF is given. The insufficient speed of hydraulic drives moving the furnace electrodes is indicated, which leads to the arc extinction. Stepwise regulation of the voltage at the input of the furnace transformer (FT), with the help of an on-load tap changer, leads to the loss of continuous control over the technological process of steelmaking. When switching the stages of the on-load tap changer, short-circuits can arise between the coils, which create electrodynamic shock loads on the transformer windings reducing the reliability of the FT. The research group suggested a technical solution, which makes it possible to replace the on-load tap changer, providing continuous adjustment of the voltage within the predetermined range on the high side of the FT. Mathematical models of reactor-thyristor voltage regulator (RTVR) and its control system were developed in "MatLab" environment. The paper shows a block - modular simulation model of RTVR with real parameters. Numerical experiments were conducted to investigate its

regulatory properties and its influence on the network. Oscillograms of current and voltage of the device elements are considered. The results of the study showed that the process of regulation does not effect significantly the current and voltage; the mode of intermittent current does not arise. The possibility of using a thyristor voltage regulator with natural switching (TVRN), which is part of STC, is considered.

Keywords: arc steel-smelting furnace, thyristor valve, reactor-thyristor voltage regulator, arc current, furnace transformer, static thyristor compensator, on-load tap changer.

REFERENCES

1. Smirnov A.N. *Metallurgicheskie mini-zavody* [Metallurgical mini-factories]. Donetsk: Nord-Press, 2005. 469 p. (In Russian)
2. Yakimov I.A., Nikolayev A.A., Kornilov G.P. Investigation of Ultra-High Power Furnaces with Thyristor Voltage Regulator in the Intermediate Circuit of the Furnace Transformer. *Setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, vol. 1, no. 1, pp. 41–47. (In Russian)
3. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarlibaev A.A., Lednov R.A. Requirements to the monitoring system of ultra-

- high power electric arc furnace transformer performance. *Rossiyskiy internet-zhurnal promishlennoy inzhenerii* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2 (25), pp. 58-68. (In Russian).
4. Sviridov V.A., Bakharev N.P. Providing electrodynamic withstand of power transformers. *Molodoy uchyoniy* [Young scientist], 2017, no. 32, pp. 20-25. (In Russian).
 5. Klimash V.S., Tabarov B.D., Getopanov A.Yu. *Puskoreguliruyushee ustroystvo na storone vysokovo napryaweniya transformatornoy podstantsii* [The ballast on the high voltage side of the transformer substation]. Patent RF, no. 166559, 2016.
 6. Yakimov I.A. Substantiation of thyristor regulation of voltage of arc furnace transformer. *Elektrotechnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 41-48. (In Russian).
 7. Gensini J., Morello L., Koassini J., Fragiaco R. *Sposob regulirovaniya tryokhfaznoy elektrodugovoy pechi pryamovo nagreva* [Method of current regulation of three-phase electric arc furnace of direct heating]. Patent RF, no. 2086076, 1997.
 8. Hatch Associates Ltd., Satcon Power Systems Canada Ltd. Power control system for ac electric arc furnace. Patent US, no. 09/778,835, 2003.
 9. Zenzo I., Tsutomu K. Steel melting arc furnace transformer equipment directly connected to 154 kV power source with tertiary load switching system. *Fuji elektricheskiy obzor* [Fuji electric review], 2014, vol. 17, no. 1, pp.16-23.
 10. Klimash V.S., Tabarov B.D., Getopanov A.Yu. *Sposob vklyucheniya, viyklyucheniya i regulirovaniya napryaweniya transformatornoy podstantsii* [A method for switching on and off and regulation of voltage transformer substation]. Patent RF, no. 2622890, 2017.
 11. Anshin V.Sh. Electric furnace transformers for the metallurgical industry, produced by the Open Joint-Stock Company "Electrozavod". *Elektro* [Electro], 2006, no. 4, pp. 16-20. (In Russian)
 12. Vereshchago E.N., Kostyuchenko V.I. The model of electric arc in Matlab / simulink. *Elektrotehnika i elektroenergetika* [Electrical Engineering and Power Engineering], 2013, no.2(25), pp. 40-46. (In Ukrainian).
 13. Chunikhin A.A. *Elektricheskie apparaty* [Electrical apparatus]. General course. Textbook for high schools. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1988. 720 p. (In Russian)
 14. Klimash V.S., Tabarov B.D. Certificate RF №2017613852 of software registration for computers «Program complex mathematical models of thyristor magnetic ballast for power transformer in Matlab medium». Bulletin no. 4, 03.04.17.
 15. Static thyristor reactive power compensator type STK-160/35: technical description and operating instructions. JSC Ansaldo-VEI. Moscow, 2008. 71 p.

Гетопанов А.Ю., Табаров Б.Д., Климаш В.С. Исследование регулировочных свойств и влияния на сеть реакторно-тиристорного устройства на высокой стороне печного трансформатора // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 2(39). С. 49-56. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-49-56](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-49-56)

Getopanov A.Yu., Tabarov B.D., Klimash V.S. Investigation of Regulation Properties and Influence of the Reactor-Thyristor Device on the Network on the High-Voltage Side of the Furnace Transformer. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 49-56. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-49-56](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-49-56)

Панов А.Н.¹, Бодров Е.Э.², Бодрова С.И.², Михеева В.О.²¹ ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭТАЛОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПУСТОГО СОВКА ПРИ РАСЧЕТЕ ОБЪЕМА МЕТАЛЛОЛОМА В НЕМ С ПОМОЩЬЮ 3D-КАМЕР

При производстве стали в кислородном конвертере в качестве охладителя процесса используется стальной металлолом, составляющий около двадцати процентов шихты. От количества загруженного в печь металлолома зависит себестоимость и качество готовой стали. Однако насыпная плотность металлолома также является важным параметром, влияющим на технологический процесс. Поэтому насыпную плотность загружаемой в кислородный конвертер стали необходимо измерять. Масса металлолома измеряется с помощью специализированных весов для взвешивания совков. При известной массе металлолома в совке задача измерения насыпной плотности сводится к измерению объема металлолома, загруженного в совок. Очевидно, что такое измерение невозможно осуществить с помощью контактного метода. Поэтому данная задача была решена бесконтактным способом с помощью времяпролетной 3D-камеры, измеряющей расстояние до поверхности металлолома в совке. В результате экспериментального измерения в скрапном отделении кислородно-конвертерного цеха были получены изображения совков, представляющие собой матрицы расстояний по всем трем измерениям (x , y , z) для пустого совка и для совка с загруженным в него металлоломом. В качестве алгоритма вычисления объема в данной работе исследовался способ вычитания из изображения совка с металлоломом эталонного изображения пустого совка. Исследование базируется на результатах промышленного эксперимента в кислородно-конвертерном цехе ПАО «ММК». В работе описаны проблемы применения эталонного изображения пустого совка при расчете объема металлолома и предложены пути их решения. В работе рассчитаны значения объема металлолома для снятой части совка и сверены со значением, полученным ранее другим способом вычисления для того же совка. Полученное в работе значение объема металлолома отличается от рассчитанного ранее не более чем на 5%.

Ключевые слова: металлургическая промышленность, производство стали, печи, измерение объема, 3D-камера, металлолом, насыпная плотность, кислородный конвертер, бесконтактное измерение, совок для скрапа.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс производства стали в кислородном конвертере обладает рядом преимуществ, что обуславливает повсеместное его применение для получения стали из чугуна. С целью снижения расхода жидкого чугуна и с целью охлаждения расплава до необходимой температуры перед началом плавки в конвертер загружают металлолом с помощью специальных совков для скрапа [1]. Массовая доля металлолома в шихте составляет около 20–25% [2].

Насыпная плотность металлолома является одним из важных параметров технологии выплавки стали, так как от нее зависит технологическая стабильность конвертерного процесса и выход готовой стали [3]. Из-за того, что источники стального металлолома могут быть различными, его насыпная плотность варьируется в широком диапазоне.

Насыпную плотность металлолома можно рассчитать, получив информацию о массе загружаемого металлолома из системы АСУ ТП кислородного конвертера и разделив ее на объем металлолома в совке. Поэтому в рамках данной работы стоит задача расчета объема металлолома в совке.

Решить данную задачу с помощью контактного метода измерения не представляется возможным, поэтому нужно применить бесконтактный метод измерения, например, с помощью цифровой 3D-камеры. Существуют множество способов бесконтактного измерения геометрических размеров или объема объекта [4–16]. В данной работе для измерения объема стального металлолома в совке была использована 3D-камера ОЗМ-150 производства компании Ifm electronic [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗМЕРЕНИЮ ОБЪЕМА МЕТАЛЛОЛОМА В СОВКЕ

В условиях кислородно-конвертерного цеха ПАО «ММК» были проведены промышленные эксперименты по измерению объема металлолома в совке для скрапа с использованием 3D-камеры ОЗМ-150, подробно описанные в [18].

В результате экспериментов были получены три таблицы размером 64x16 значений расстояний x , y и z , измеренных камерой ОЗМ-150, как показано на **рис. 1**. Каждая таблица содержит 1024 пикселя.

Камера измеряет расстояние d до поверхности металлолома в совке. Затем внутренний алгоритм камеры автоматически пересчитывает расстояние d в величины x , y и z , т.е. переводит полярные координаты в декартовые. После этого можно считать с камеры рассчитанные ей значения x , y , z и далее использовать их для последующих вычислений объема металлолома.

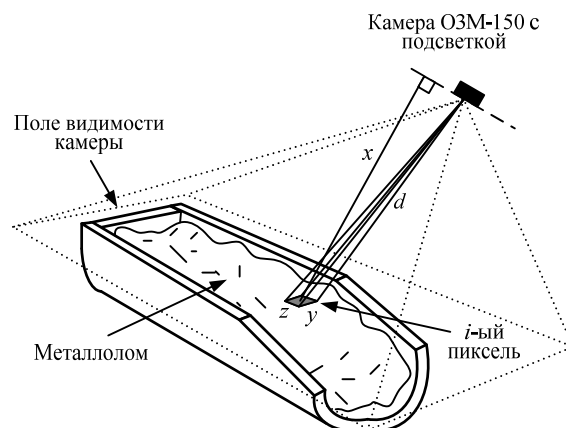


Рис. 1. Измерение камерой ОЗМ-150 совка с металлоломом

Обработать полученные данные можно различными способами [18]. В данной работе предложена методика вычисления объема металлолома в загруженном совке путем вычитания объема рассчитанного для пустого совка, используемого в качестве эталона.

Экспериментальная установка для измерения объема бесконтактным способом с помощью трехмерной камеры представлена на **рис. 2**.

Результаты измерений расстояния x_i , прочитанные с камеры, с целью упрощения дальнейших расчетов объема были подвергнуты математической обработке, заключающейся в пересчете значений расстояния, выдаваемых камерой в значения высоты от горизонтальной плоскости, в которой расположена камера, до металлолома в совке (см. **рис. 2**).

Расчет искомого расстояния a_i производился по следующей зависимости [18]:

$$a_i = \frac{x_i \cdot \cos(\beta + \alpha_i)}{\cos \alpha_i}, \quad (1)$$

где α_i – угол расположения i -го пикселя относительно центрального; β – угол наклона камеры к горизонту.

Угол α_i равен нулю на оси центрального пикселя и изменяется от 0 до $+35^\circ$ в положительную сторону от центральной оси (к дальнему краю совка) и от 0 до -35° в отрицательную сторону от центральной оси (к ближнему краю совка). Значение $\pm 35^\circ$ получено делением угла обзора камеры в вертикальном направлении, составляющего 70° , пополам.

Графики полученных значений a_i для пустого и полного совков приведены на **рис. 3** и **4** соответственно. Высота, на которой находилась камера над дном совка, составляла 6 м. Такой высоты недостаточно для того, чтобы захватить в поле видимости камеры ОЗМ-150 весь совок с металлоломом. Однако условия проведения эксперимента не позволили расположить камеру на большей высоте. Поэтому изображения, приведенные на **рис. 3** и **4**, соответствуют передней части совка с металлоломом. Зная соотношения захваченной и не захваченной камерой частей совка, можно рассчитать объем металлолома во всем совке.

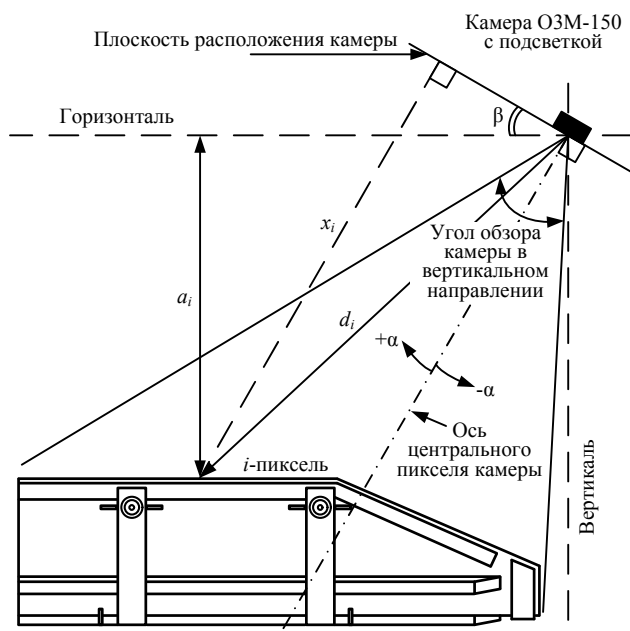


Рис. 2. Экспериментальная установка для измерения объема металлолома в совке для скрапа

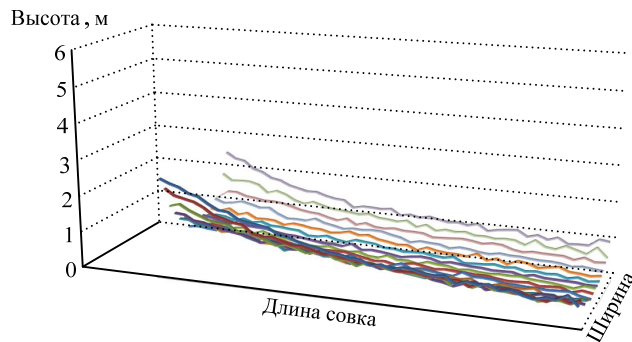


Рис. 3. Изображение пустого совка

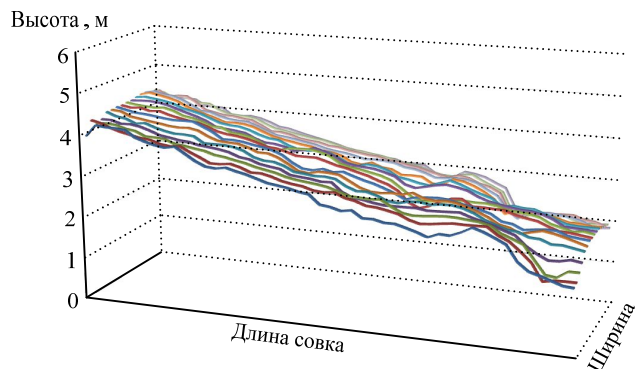


Рис. 4. Изображение совка с металлоломом

МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭТАЛОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ОБЪЕМА МЕТАЛЛОЛОМА В СОВКЕ

Полученные экспериментальные данные позволяют рассчитать объем металлолома путем вычитания изображения пустого совка из изображения полного. Однако это сопряжено с довольно серьезной математической трудностью, проиллюстрированной на **рис. 5**.

Трудность заключается в следующем: из-за того, что камера расположена под углом к совку и ко всем измеряемым ей пикселям, i -й пиксель, измеренный при пустом и полном совках, попадает на разные участки совка (участки A и B на **рис. 5**). Причем расстояние между этими участками зависит от высоты поверхности металлолома над уровнем дна совка. Поэтому измерить высоту h_i простым вычитанием вычисленных расстояний a_i'' и a_i' не удастся.

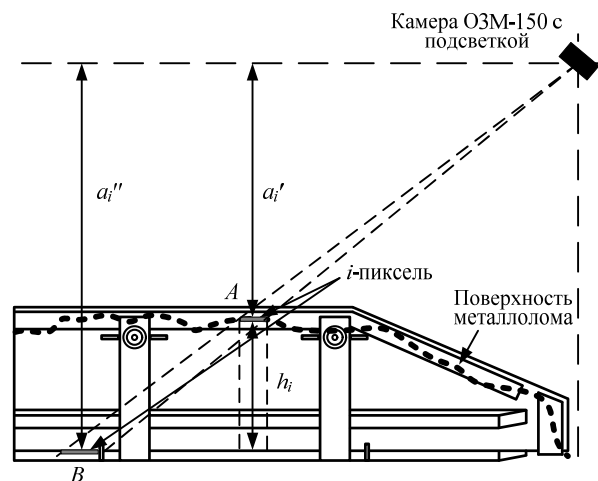


Рис. 5. Трудность использования пустого совка в качестве эталона при расчете объема металлолома

Одним из способов решения данной проблемы может быть расчет объема фигур пустого совка и полного совка, представленных на **рис. 6**. При этом для расчета объема металлолома нужно вычесть из объема фигуры полного совка объем фигуры пустого.

Объем рассчитывается как сумма индивидуальных объемов i -х параллелепипедов, образованных i -м пикселем в верхней части и плоскостью пола или поверхности платформы, на которой установлен совок, в нижней части.

Объем каждой из двух фигур рассчитывается по следующему выражению [18]:

$$V = \sum_{i=1}^n h_i \cdot y_i \cdot z_i, \quad (2)$$

где n – количество пикселей, попавших в ходе съемки на поверхность металлолома; h_i – расстояние от измеренного i -го пикселя до плоскости пола или поверхности платформы, на которой установлен совок.

Расстояние h_i рассчитывается по следующему выражению:

$$h_i = h_0 - a_i, \quad (3)$$

где h_0 – расстояние от камеры до плоскости пола или поверхности платформы, на которой установлен совок.

При использовании способа вычитания фигур полного и пустого совков в расчетах возникает неизбежная погрешность, связанная с тем, что при вычислении индивидуальных объемов пустого совка, если пиксели попадают на заднюю вертикальную стенку, то будет рассчитан и просуммирован объем всех параллелепипедов задней стенки, например, как показано на **рис. 7**.

В примере, показанном на **рис. 7**, будут рассчитаны объемы девяти параллелепипедов: 1, 2, 3 высотой h_a , 4, 5, 6 высотой h_b и 7, 8, 9 высотой h_c , в то время как для правильного вычисления объема пустого совка эти параллелепипеды не должны участвовать в расчете.

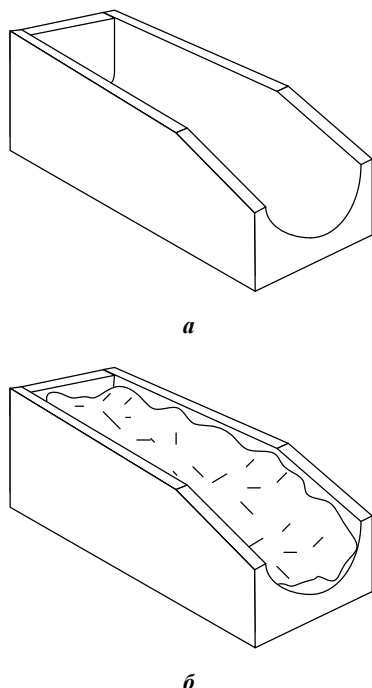


Рис. 6. Фигуры пустого (а) и полного совков (б)

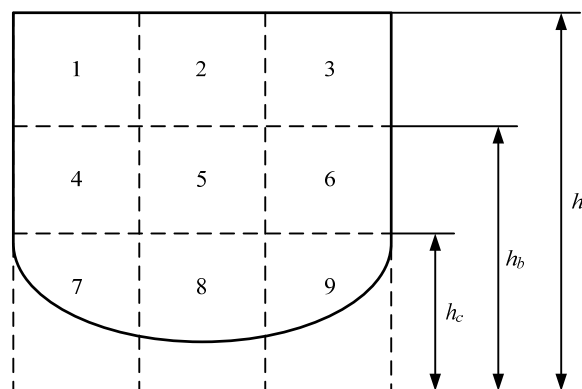


Рис. 7. Возникновение погрешности в расчетах из-за съемки задней стенки пустого совка

Из конфигурации экспериментальной установки (см. **рис. 2**) следует, что при перемещении по полю зрения камеры вдоль длинной стороны, когда пиксели попадают на дно пустого совка, координата x_i будет увеличиваться (в направлении от открытого края совка до задней стенки). При переходе через границу дна и задней стенки пустого совка координата x_i начнет уменьшаться. Следовательно, необходимо алгоритм вычисления объема фигуры пустого совка построить таким образом, чтобы он отбрасывал значения всех пикселей, находящихся за границей уменьшения координаты x_i .

Для того чтобы описанный алгоритм был применим и к определению задней стенки для совка с металлоломом, необходимо учесть в нем ряд моментов, связанных с формой поверхности загруженного металлолома.

Процедура загрузки совка осуществляется следующим образом: в пустой совок сверху засыпается металлолом, который при этом распределяется в совке случайным образом. Поверхность металлолома приближена к горизонтальной, за исключением незначительных по размеру участков, которые могут быть загорожены соседними частями металлолома. Хотя поверхность металлолома в совке специально не подготавливается для измерений с помощью 3D-камеры, но в связи с тем, что камера расположена сверху, практически вся поверхность является видимой для камеры. И ситуацией возникновения «мертвых» зон в данном случае можно пренебречь.

В связи с тем, что поверхность материала в совке может быть ориентирована под различными углами относительно дна совка, существуют такие конфигурации расположения металлолома, которые при перемещении по полю зрения камеры вдоль длинной стороны, в соответствии с описанным алгоритмом, приведут к уменьшению величины x_i , что будет ошибочно восприниматься как переход на заднюю стенку совка.

В ходе математической и статистической обработки экспериментальных данных были проанализированы координаты x_i изображений семи совков различной степени загрузки. Анализ показал, что в среднем для 269 пикселей из 1024 выполняется условие уменьшения координаты x_i при движении по снимку от начала совка к задней стенке. Это составляет 26,7% от общего количество пикселей. Причем около 70% таких пикселей приходится на ту половину совка, которая расположена ближе к камере, т.е. на начало совка. И только 30% пикселей, для которых уменьшается координата

x_i , приходится на ту половину совка, где расположена задняя стенка. Это связано с тем, что ближе к задней стенке совка, т.е. дальше от камеры, лучи длинноволновых, используемых в камере ОЗМ-150, падают на поверхность под все более острым углом к горизонту. И для того, чтобы координата x_i уменьшалась, поверхность металлолома должна быть ориентирована более вертикально, по сравнению с той же поверхностью, расположенной ближе к камере. Но поверхность металлолома в совке за редким исключением имеет преимущественно горизонтальную ориентацию.

Исходя из размеров совка, высоты и расположения камеры над его дном, а также характеристик используемой камеры было рассчитано, что на высоту задней стенки пустого совка в его самой высокой части приходится около 12 пикселей из 64. Поэтому поиск границы поверхности металлолома и задней стенки совка целесообразно проводить в пределах тех пикселей, где располагается граница дна и задней стенки для пустого совка. Причем граница дна и задней стенки пустого совка может сдвигаться в ту или иную сторону в зависимости от расположения камеры и угла ее наклона к горизонту. Это необходимо учесть при настройке системы.

С учетом вышесказанного алгоритм вычисления объема фигуры загруженного совка должен: во-первых, искать границу задней стенки в пределах только тех пикселей поля зрения, где она может находиться; и во-вторых, необходимо брать в расчет только самое последнее уменьшение координаты x_i , ближайшее к краю поля зрения камеры, отбрасывая остальные.

Используя выражение (2) и описанный выше алгоритм, были рассчитаны объемы фигур полного и пустого совков. Объем фигуры пустого совка составил 17,76 м³. Объем фигуры совка с металлоломом внутри составил 39,62 м³. Следовательно, вычитая первое значение из второго, получим объем металлолома в совке, равный 21,86 м³. Полученное значение близко к объему металлолома, рассчитанному другим способом для этого же снимка совка в [18]. Это означает, что способ использования трехмерного снимка пустого совка в качестве эталонного изображения обладает достаточной точностью и подходит для расчета объема металлолома в совке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований способа использования трехмерного снимка пустого совка в качестве эталонного изображения установлено, что рассчитать высоту металлолома над дном совка не получится простым вычитанием из изображения полного совка изображения пустого. Это связано с тем фактом, что все пиксели измеряемого поля видимости камеры, приходящиеся на внутреннюю часть совка, при пустом и полном совке попадают на разные его участки. Причем расстояние между этими участками пропорционально зависит от высоты металлолома в совке. Поэтому в работе был предложен способ расчета объема фигур отдельно для пустого совка, а затем для совка с металлоломом с последующим их вычитанием друг из друга. Учитывая, что измерение объема фигуры пустого совка можно выполнить один раз при настройке системы, а затем использовать при всех последующих

расчетах, предложенный алгоритм является простым в применении с математической точки зрения. Проведенные расчеты показали, что предложенный способ обладает достаточной точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников Ю.А., Бигеев В.А., Сергеев Д.С. Расчет технологических параметров выплавки стали в конвертере с использованием различных охладителей // *Металлургия стали*. 2014. №2(15). С. 45-48.
2. Макарова Е.А., Перистый М.М. Проблемы конвертерного производства стали и пути решения дефицита металлолома // *Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сборник докладов XXIII Всеукраинской научной конференции аспирантов и студентов*. Донецк: ДонНТУ, ДонНУ, 2013. Т.2. С. 158-159.
3. Шелягович А.В. Разработка режимов формирования металлозавалки в кислородном конвертере с применением композиционных материалов и исследование их влияния на технологические показатели выплавки стали: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Шелягович Андрей Владимирович. М., 2005.
4. T. Möller, H. Kraft, J. Frey, M. Albrecht and R. Lange, "Robust 3D measurement with PMD sensors," *Proceedings of the 1st Range Imaging Research Day at ETH, Zurich, Switzerland*, 2005.
5. Q. Xu, Y. Huang, L. Xing, Z. Tian, Z. Fei and L. Zheng, "A fast method to measure the volume of a large cavity," *IEEE Access*, 2015, pp. 1555-1561. DOI:10.1109/ACCESS.2015.2476661.
6. Y.D. Chincholkar and S. Bangadkar, "A Review of ToF PMD Camera," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 4, Issue 5, 2015, pp. 4142-4149. DOI: 10.15662/ijareeie.2015.0405058.
7. Патерикин В.И. Оптические методы зондирования для наголовных средств измерения пространственных параметров поверхности трехмерных предметов в реальном времени // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2015. №2. С. 44-48.
8. Крысин Д.Ю., Небылов А.В. Применение времяпролетных PMD-камер для определения дальности до водной поверхности // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. №2 (84). С. 33-39.
9. Рутковский В.О., Рутковская М.А. Метод получения трехмерных цифровых моделей технических объектов, основанный на применении искусственных текстур // *Вестник СибГАУ*. 2010. №5. С. 249-254.
10. G. Berkovic and E. Shafir, "Optical methods for distance and displacement measurements," *Advances in Optics and Photonics* 4, 2012, pp. 441-471. DOI: 10.1364/AOP.4.000441.
11. Y.R. Huddart, "Non-contact free-form shape measurement for coordinate measuring machines," dissertation, Heriot-Watt University, 2010.
12. Скляренок М.С. Оценка точности методов трекинга для определения 2D-координат и скоростей механических систем по данным цифровой фотосъемки // *Компьютерная оптика*. 2015. №1. С. 125-135.
13. Борминский С.А., Солнцева А.В., Скворцов Б.В. Метод оптоэлектронного контроля жидкости в резервуаре // *Компьютерная оптика*. 2016. Т. 40. №4. С. 552-559.
14. M. Wilczkowiak, E. Boyer and P. Sturm, "Camera Calibration and 3D Reconstruction from Single Images Using Parallelepipeds," 8th International Conference on Computer Vision (ICCV '01), Vancouver, Canada. IEEE Computer Society, 1, pp.142-148, 2001.
15. A. Criminisi, I. Reid and A. Zisserman, "SingleView-Metrology", University of Oxford, 1999.
16. X. Luan, "Experimental investigation of Photonic Mixer Device and development of TOF 3D ranging systems based on PMD technology," dissertation, University of Siegen, 2001.

17. ОЗМ150. Фотоэлектрические датчики для распознавания объектов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ifm.com/products/ru/ds/O3M150.htm> (дата обращения: 05.05.2016).
18. Расчет насыпной плотности стального металлолома в совках для скрапа с использованием трехмерной камеры / Ишметьев Е.Н., Чистяков Д.В., Панов А.Н., Бодров Е.Э., Рабаджи Д.В. // Черные металлы. 2017. №4. С. 22-28.

Поступила в редакцию 05 февраля 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

USING REFERENCE MEASUREMENT OF AN EMPTY CHUTE WHEN CALCULATING THE VOLUME OF SCRAP METAL IN IT BY MEANS OF 3D CAMERA

Alexander N. Panov

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

Evgeny E. Bodrov

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

Snezhana I. Bodrova

Graduate Student, Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: forheartist@mail.ru.

Valeriya O. Mikheeva

Undergraduate Student, Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Scrap-metal is used as a refrigerant during steelmaking process in a basic oxygen furnace where it can reach about twenty percent of the charge. The quantity of the scrap-metal loaded to the basic oxygen furnace determines the cost and quality of the finished steel. But bulk density of the scrap-metal is also an important technological factor that can affect the steelmaking process itself. That is why it is necessary to measure bulk density of the scrap-metal before it is loaded to the furnace. The mass of the scrap-metal in a chute is measured by the specialized scale. If the weight of the scrap-metal is known, the problem can be reduced to finding the volume of the scrap-metal in the chute. However, contact methods cannot solve this problem. This problem was solved by using non-contact method of measuring the distance to the surface of the scrap-metal in the chute by means of a time-of-flight 3D-camera. As a result of the experiment conducted at the oxygen converter shop, there were obtained images of an empty and a full chute. These images are represented by matrixes containing distances for three orthogonal directions. The algorithm used in this paper calculates the scrap-metal volume by subtracting the reference image of the empty chute from the image of the full chute. This work is based on industrial experiments at the oxygen converter shop of Magnitogorsk Iron and Steel Works. The paper describes the problems arising in the application of the described algorithm to the task of scrap-metal volume calculation and offers ways of solving these problems. The proposed algorithm was used to calculate the volume of the scrap-metal. Comparison of the calculated here volume with the volume of the same scrap-metal in the chute that was obtained earlier using a different approach showed that error does not exceed 5%.

Keywords: metals industry, steelmaking, furnaces, volume measurement, 3D-camera, scrap-metal, bulk density, basic oxygen furnace, non-contact measurement, scrap chute.

REFERENCES

1. Kolesnikov Ju.A., Bigeev V.A., Sergeev D.S. Calculation of technological parameters of steel smelting in a converter using various coolants. *Metallurgiya stali* [Metallurgy of steel], 2014, no.2(15), pp. 45-48. (In Russian)
2. Makarova E.A., Peristyj M.M. Problems of converter steel production and ways to solve scrap shortage problem. *Ohrana okruzhajushhej sredy i racionalnoe ispolzovanie prirodnih resursov. Sbornik dokladov HHIII Vseukrainskoj nauchnoj konferencii aspirantov i studentov* [Environmental protection and rational use of natural resources. Collection of reports of the XXIII All-Ukrainian scientific conference of graduate students and students], Donetsk: DonNTU, DonNU, 2013, vol.2, pp. 158-159. (In Russian)
3. Sheljagovich A.V. *Razrabotka rezhimov formirovaniya metallozavalki v kislorodnom konvertere s primeneniem kompozicionnyh materialov i issledovanie ih vlijaniya na tehnologicheskie pokazateli vyplavki stali*. Kand. Diss. [Development of modes for forming metal scrap in the oxygen converter with the use of composite materials and studying their effect on the technological parameters of steel smelting. Ph.D. Diss.]. Moscow, 2005.
4. T. Möller, H. Kraft, J. Frey, M. Albrecht and R. Lange, "Robust 3D measurement with PMD sensors," Proceedings of the 1st Range Imaging Research Day at ETH, Zurich, Switzerland, 2005.
5. Q. Xu, Y. Huang, L. Xing, Z. Tian, Z. Fei and L. Zheng, "A fast method to measure the volume of a large cavity," *IEEE Access*, 2015, pp. 1555-1561. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2476661
6. Y.D. Chincholkar and S. Bangadkar, "A Review of ToF PMD Camera," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 4, iss. 5, 2015, pp. 4142-4149. DOI: 10.15662/ijareeie.2015.0405058
7. Paterikin V.I. Optical methods of sounding for head devices for measuring spatial parameters of the surface of three-dimensional objects in real time. *Interjekspos Geo-Sibir* [Interexpo Geo-Siberia], 2015, no.2, pp. 44-48. (In Russian)
8. Krysin D.Ju., Nebylov A.V. The use of time-of-flight PMD cameras to determine the distance to the water surface. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki* [Scientific and Technical Herald of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2013, no.2 (84), pp. 33-39. (In Russian)

9. Rutkovskij V.O., Rutkovskaja M.A. The method of obtaining three-dimensional digital models of technical objects, based on the use of artificial textures. *Vestnik SibGAU* [Bulletin of Siberian State University of Management], 2010, no.5, pp. 249-254. (In Russian)
10. G. Berkovic and E. Shafir, "Optical methods for distance and displacement measurements," *Advances in Optics and Photonics* 4, 2012, pp. 441-471. DOI: 10.1364/AOP.4.000441.
11. Y.R. Huddart, "Non-contact free-form shape measurement for coordinate measuring machines," dissertation, Heriot-Watt University, 2010.
12. Skljarenko M.S. Estimation of the accuracy of tracking methods for determining 2D coordinates and speeds of mechanical systems based on digital photography data. *Kompjuternaja optika* [Computer Optics], 2015, no.1, pp. 125-135. (In Russian)
13. Borminskij S.A., Solnceva A.V., Skvorcov B.V. The method of optoelectronic control of liquid in a tank. *Kompjuternaja optika* [Computer Optics], 2016, vol.40, no.4, pp. 552-559. (In Russian)
14. M. Wilczkowiak, E. Boyer and P. Sturm, "Camera Calibration and 3D Reconstruction from Single Images Using Parallelepipeds," 8th International Conference on Computer Vision (ICCV '01), Vancouver, Canada. IEEE Computer Society, 1, pp.142-148, 2001.
15. A. Criminisi, I. Reid and A. Zisserman, "Single View Metrology," University of Oxford, 1999.
16. X. Luan, "Experimental investigation of Photonic Mixer Device and development of TOF 3D ranging systems based on PMD technology," dissertation, University of Siegen, 2001.
17. O3M150. 3D sensor for mobile applications. <https://www.ifm.com/gb/en/product/O3M150>.
18. Ishmetyev E.N., Chistjakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E., Rabadzhi D.V. Calculation of bulk density of steel scrap in scrap chutes using 3D camera. *Chernye metally* [Non-ferrous metals], 2017, no.4, pp. 22-28. (In Russian)

Использование эталонного измерения пустого совка при расчете объема металлолома в нем с помощью 3D-камер / А.Н. Панов, Е.Э. Бодров, С.И. Бодрова, В.О. Михеева // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 2(39). С. 57-62. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-57-62](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-57-62)

Panov A.N., Bodrov E.E., Bodrova S.I., Mikheeva V.O. Using Reference Measurement of an Empty Chute when Calculating the Volume of Scrap Metal in it by Means of 3D Camera. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 57-62. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-57-62](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-57-62)

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ АВТОМАТИЧЕСКОЕ НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЕМ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Авторами обоснована возможность энергосберегающего управления газодинамическим режимом в рабочем пространстве промышленных нагревательных печей. Выявлена расчетно-экспериментальная статическая зависимость изменения величины коэффициента расхода воздуха в зависимости от положения дымового клапана в диапазоне 10–100% открытия. Доказана эффективность энергосберегающего управления на основе использования нечеткой логики и теории нечетких множеств. Разработана структурная схема энергосберегающего нечеткого управления. Описан принцип формирования управляющего воздействия с целью автоматического управления давлением в рабочем пространстве печи с использованием принципа нечеткого управления. Рассмотрена реализация энергосберегающего нечеткого управления давлением в рабочем пространстве нагревательной печи камерного типа в условиях стабилизации температуры рабочего пространства путем изменения расходов доменного газа и воздуха.

Ключевые слова: энергосберегающее управление, теория нечетких множеств, управляющее воздействие, база эвристических правил, функция принадлежности.

ВВЕДЕНИЕ

Режим управления давлением в рабочем пространстве промышленных печей оказывает влияние на величину удельного расхода топлива, на сохранность технологических агрегатов, на потери металла с окислением и на экологические условия производственного помещения.

Наиболее благоприятным энергосберегающим режимом автоматизированного управления давлением является режим, при котором обеспечивается минимальное значение тепловых потерь с подсосами холодного атмосферного воздуха и с выбиваниями горячих продуктов сгорания.

Общепринято управление давлением в рабочем пространстве промышленных печей, отапливаемых газообразным или жидким топливом, осуществлять путем автоматической стабилизации заданного давления под сводом рабочего пространства печи в зоне выдачи выходного продукта.

Авторами работы [1] обосновано, что целесообразно и экономически выгодно осуществлять управление давлением в рабочем пространстве многозонных промышленных нагревательных печей, которые работают в условиях переменной производительности, на основании импульса давления на уровне нагреваемого металла в зоне печи, куда подается максимальное количество топлива. Положительный эффект достигается за счет повышения оперативности и целенаправленности управления при безусловном упрощении условий обслуживания отбора импульса давления.

МЕТОДЫ

Использование стабилизирующих контуров автоматического управления давлением упрощает решение задачи, но не обеспечивает независимого от субъективного влияния технолога-оператора энергосберегающего управления газодинамическим режимом рабочего пространства промышленных печей.

Энергосберегающее автоматическое управление давлением в рабочем пространстве, обеспечивающее минимальные величины подсосов и выбиваний, целесообразно осуществлять в соответствии с выполнением условия

$$\alpha_{\text{вх}}(\tau) = \alpha_{\text{вых}}(\tau), \text{ при } \Delta\alpha = \alpha_{\text{вх}}(\tau) - \alpha_{\text{вых}}(\tau) = 0, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{вх}}(\tau)$ и $\alpha_{\text{вых}}(\tau)$ – соответственно текущие величины коэффициентов расхода воздуха на входе и выходе рабочего пространства печи.

Величина $\alpha_{\text{вх}}(\tau)$ определяется в соответствии с выражением

$$\alpha_{\text{вх}}(\tau) = \frac{V_{\text{в}}(\tau)}{(V_{\text{т}}(\tau) \cdot L_0)}, \quad (2)$$

где $V_{\text{в}}(\tau)$, $V_{\text{т}}(\tau)$ – общие, а для многозонных печей суммарные, расходы соответственно воздуха и топлива на печь; L_0 – расчетный коэффициент, определяющий численное значение количества воздуха, которое необходимо для полного сжигания единицы измерения используемого вида топлива.

Величина $\alpha_{\text{вых}}(\tau)$ определяется по упрощенной «кислородной» формуле

$$\alpha_{\text{вых}}(\tau) = \frac{21}{(21 - O_2(\tau))}, \quad (3)$$

где $O_2(\tau)$ – текущее содержание кислорода в продуктах сгорания топлива на выходе из рабочего пространства печи, %;

В условиях ограниченных возможностей дымоотводящей системы на большинстве нагревательных промышленных печей существует ограничение на реализуемость энергосберегающего управления газодинамическим режимом при максимальных тепловых нагрузках.

Величина положения дымового клапана, при котором обеспечивается соблюдение условия $\Delta\alpha(\tau)=0$, зависит от текущих расходов газа и воздуха, температуры продуктов сгорания и обеспечивается при практически нулевом давлении на уровне нагреваемого изделия или металла. Диапазон эффективного управления

газодинамическим режимом практически совпадает с рабочим диапазоном функционирования систем автоматического управления температурным режимом управления соотношением топливо-воздух [2].

При $\Delta\alpha_B(\tau) < 0$ с выбиваниями, а при $\Delta\alpha_B(\tau) > 0$ с подсосами величину объема газов $\Delta V_{II}(\tau)$ ориентировочно можно оценить в соответствии с выражением

$$\Delta V_{II}(\tau) = K_0 \cdot V_T(\tau) \cdot \Delta\alpha_B(\tau), \quad (4)$$

где K_0 – коэффициент, определяющий объем продуктов сгорания, образующийся при полном сгорании единицы измерения расхода используемого вида топлива.

СТАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для металлургических предприятий с полным циклом использование коксового и доменного газов вместо дорогостоящего природного для отопления промышленных нагревательных или термических печей является экономически целесообразным и выгодным.

Так, для нагревательной печи камерного типа отапливаемой смесью коксового и доменного газов статическая зависимость абсолютного значения $|\Delta V_{II}[P_p(\tau)]|$ от величины разрежения в дымоотводящем канале имеет вид

$$\begin{aligned} |\Delta V_{II}[P_p(\tau)]| = & -74503,21 + 13476,84P_p + \\ & + 140,8311P_p^2 - 124,098046P_p^3 + 5,18671P_p^4 \end{aligned} \quad (5)$$

при $10 \leq P_p \leq 16$ кг/м².

Полученная зависимость (5) имеет унимодальный экстремальный вид, и это свидетельствует о возможности и целесообразности энергосберегающего управления газодинамическим режимом путем поддержания величины $\Delta\alpha_B(\tau)$ на нулевом значении за счет изменения разрежения в дымоотводящем канале при изменении положения дымового клапана.

Экспериментально установлено, что для рассматриваемой печи камерного типа, отапливаемой смесью коксового и доменного газов при постоянной температуре рабочего пространства, зависимости $P_d(\tau) = f[x_{BX}]$ имеют практически линейный вид.

Здесь $x_{BX}(\tau)$ – фиксированное постоянное положение дымового клапана в диапазоне 10÷100% открытия.

Расчетно-экспериментальная статическая зависимость $\Delta\alpha_B(\tau) = Y[x_{BX}(\tau)]$ при $\alpha_{BX}(\tau) = 1$ в условиях стабилизации температуры рабочего пространства только сжиганием доменного газа представлена на рис. 1.

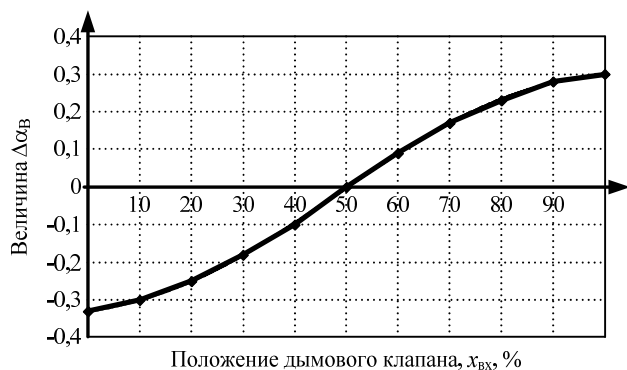


Рис. 1. Экспериментальная зависимость $\Delta\alpha_B(\tau) = Y[x_{BX}(\tau)]$ для печи камерного типа при $\alpha_{BX}(\tau) = 1$

При расчете траектории изменения $\Delta\alpha_B(\tau) = Y[x_{BX}(\tau)]$ любое установившееся промежуточное значение $\Delta\alpha_B(x_T)$ определяется по методу кусочно-линейной аппроксимации

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_B(x_T) = & \Delta\alpha_{B(i)} + \frac{\Delta\alpha_{B(i+1)} - \Delta\alpha_{B(i)}}{x_{BX(i+1)} - x_{BX(i)}} \times \\ & \times [\Delta\alpha_B(\tau) - \Delta\alpha_B(i)], \end{aligned} \quad (6)$$

где $i = 1 \div n$ – количество реперных точек экспериментальной статической зависимости $\Delta\alpha_B(\tau) = Y[x_{BX}(\tau)]$; x_{BX} – текущее значение управляющего воздействия; $\Delta\alpha_B(x_T)$ – установившееся значение управляемого параметра; $i, i+1$ – номера реперных точек, для которых выполняется условие $x_i \leq x_T \leq x_{i+1}$.

При увеличении расходов газа и воздуха характеристика $\Delta\alpha_B(\tau) = Y[x_{BX}(\tau)]$ смещается вниз, и при расходах газа и воздуха, больших 3000 м³/ч, энергосберегающее управление газодинамическим режимом становится проблематичным (практически невозможным) [3].

При наличии инерционности и запаздывания, в условиях действия множества случайных факторов, наличии существенно нелинейных связей между параметрами процесса и т.д. традиционные системы автоматического управления, основанные на типовых динамических моделях, не всегда могут справиться с задачами управления. Основной причиной этого является исходное для них предположение о линейности связи между параметрами процесса, что часто не соответствует реальным условиям газодинамического режима в рабочем пространстве промышленных печей.

В таких сложных условиях для управления процессом эффективнее использовать системы автоматического управления, принцип действия которых основан на теории нечетких множеств и нечеткой логике [4, 5].

Нечеткое управление имеет преимущество перед широко используемыми типовыми системами автоматического управления за счет замены используемой упрощенной количественной линейной модели управляющей системы нелинейной многосторонней лингвистической моделью, основанной на базе формализованной имитации и обобщенно-практического опыта, формирования управляющих воздействий экспертом (лучшим технологом оператором) в различных реальных производственных ситуациях.

Принцип работы нечетких автоматических систем основан на использовании лингвистической модели, составленной из логических правил, задаваемых в форме «Каждой производственной ситуации должно соответствовать рациональное технологически обоснованное управляющее воздействие» [6].

Используя базу правил и методы синтеза нечетких алгоритмов управления, можно осуществлять автоматизацию и даже оптимизацию управления технологическими процессами без проведения всесторонних экспериментальных и математических исследований по созданию моделей управляемых процессов путем изменения базы логических правил управления в соответствии с изменением реальных условий [7].

Структурная схема энергосберегающего нечеткого управления газодинамическим режимом в рабочем пространстве промышленной печи представлена на рис. 2.

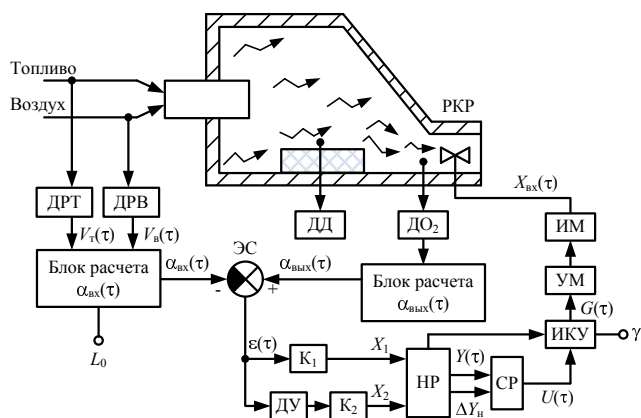


Рис. 2. Структурная схема энергосберегающего нечеткого управления давлением в рабочем пространстве промышленной печи

Информационные сигналы пропорциональные расходам топлива $V_T(\tau)$ и воздуха $V_B(\tau)$, измеряемые соответственно датчиками расхода топлива (ДРТ) и расхода воздуха (ДРВ), подаются на вход блока расчета текущего значения $\alpha_{\text{вх}}(\tau)$ (2).

Величины текущих значений $V_T(\tau)$ и $V_B(\tau)$ определяются соответственно системами автоматического управления температурным режимом и соотношением топливо-воздух [8].

Текущее значение содержания кислорода на выходе из рабочего пространства печи $O_2(\tau)$ измеряется датчиком (ДО₂) и подается на блок расчета текущего значения $\alpha_{\text{вых}}(\tau)$ (3).

На выходе элемента сравнения (ЭС) формируется сигнал рассогласования, представляющий цель управления $\Delta\alpha_{\text{вх}} \approx 0$:

$$\varepsilon(\tau) = \alpha_{\text{вых}}(\tau) - \alpha_{\text{вх}}(\tau) = \Delta\alpha_{\text{в}}(\tau), \quad (7)$$

который масштабируется в блоке K_1 и дифференцируется блоком ДУ. На вход нечеткого регулятора (НР) подаются два нормированных сигнала

$$x_1 = K \cdot \varepsilon(\tau) \text{ и } x_2 = K_2 \cdot \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}. \quad (8)$$

На выходе НР с использованием алгоритма нечеткой логики формируется управляющий сигнал $Y(\tau)$, подаваемый на вход логического элемента сигнум реле (СР). На выходе СР формируется управляющий сигнал $U(\tau)$ в соответствии с условием

$$U(\tau) = \begin{cases} +1, & \text{если } Y(\tau) > \frac{\Delta Y_n}{2}, \\ & \text{при } \varepsilon(\tau) < 0 - \text{откр. (выбивания)}; \\ 0, & \text{если } \left(-\frac{\Delta Y_n}{2}\right) \leq Y(\tau) \leq \frac{\Delta Y_n}{2}; \\ -1, & \text{если } Y(\tau) < \left(-\frac{\Delta Y_n}{2}\right), \\ & \text{при } \varepsilon(\tau) > 0 - \text{закр. (подсосы)} \end{cases} \quad (9)$$

где ΔY_n – заданная зона нечувствительности системы нечеткого управления давлением.

Импульсное коммутирующее устройство (ИКУ) позволяет за счет импульсного управления с заданной скважностью γ устанавливать требуемую среднюю

постоянную скорость исполнительного механизма (ИМ) $\bar{K}_{\text{им}}$, перемещающего регулирующий клапан разряжения (РКР) в соответствии с выражением

$$x_{\text{вх}}(\tau) = x_0 + U(\tau) \cdot \bar{K}_{\text{им}} \cdot \tau, \quad (10)$$

где x_0 , $x_{\text{вх}}(\tau)$ – начальное и текущее положение регулирующего клапана РКР; $U(\tau) \in (+1, 0, -1)$ – переключающая функция, определяющая текущее направление движения ИМ.

Величина хода ИМ ограничена конечными выключателями в пределах 0÷100%. Контроль эффективности работы энергосберегающей системы осуществляется по показаниям датчика давления в рабочем пространстве печи (ДД) на уровне нагреваемого металла. Схема без существенных изменений может быть использована для нечеткого управления путем стабилизации этого измеряемого давления в рабочем пространстве печи. Экспериментальная статическая зависимость между содержанием кислорода в продуктах сгорания и коэффициентом расхода воздуха $\alpha_{\text{вых}}(\tau)$ при анализе продуктов сгорания на CO, CO₂, O₂ выражается уравнением

$$\bar{\alpha}_{\text{вых}}(\tau) = 0,92 + 0,11 \cdot O_2, \quad 0 \leq O_2 \leq 7\%, \quad (11)$$

при коэффициенте корреляции 0,705.

Динамические свойства инерционного с запаздыванием управляемого процесса учитываются при использовании численного метода Эйлера при решении системы уравнений [9].

$$\frac{d[\Delta\alpha_{\text{в1}}(\tau)]}{d\tau} = \frac{1}{T_0} \cdot [Y[x_{\text{вх}}(\tau)] - \Delta\alpha_{\text{в1}}(\tau)]; \quad (12)$$

$$\Delta\alpha_{\text{в1}}(\tau+1) = \Delta\alpha_{\text{в1}}(\tau) + \frac{d\alpha_{\text{в1}}(\tau)}{d\tau} \cdot (\tau); \quad (13)$$

$$\frac{d[\Delta\alpha_{\text{в1}}(\tau)]}{d\tau} = \frac{1}{\tau_3} \cdot [\Delta\alpha_{\text{в1}}(\tau) - \Delta\alpha_{\text{в}}(\tau)]; \quad (14)$$

$$\Delta\alpha_{\text{в1}}(\tau+1) = \Delta\alpha_{\text{в}}(\tau) + \frac{d\alpha_{\text{в}}(\tau)}{d\tau} \cdot (\tau). \quad (15)$$

Здесь T_0 , τ_3 – соответственно постоянные времени, количественно характеризующие инерционность и запаздывание; τ , $\tau+1$ – текущий и последующий моменты времени; $\Delta\alpha_{\text{в1}}(\tau)$, $\Delta\alpha_{\text{в}}(\tau)$ – соответственно текущее значение управляемого параметра с учетом только инерционности и запаздывания.

Формирование управляющего воздействия $Y(\tau)$ на выходе НР с использованием принципа нечеткого управления осуществляется следующим образом.

Вводятся лингвистические переменные физических нормированных предметных величин: X_1 – «рассогласование»; X_2 – «скорость рассогласования»; Y – «управляющее воздействие». Нормированные предметные величины X_1 и X_2 фиксируют по оси аргумента функций принадлежности. Нечеткое множество функций принадлежности $\mu(x_i)$ формируется с использованием выбранных технологически обоснованных функций, которые количественно характеризуют степень приближения значения предметной переменной к нечеткому множеству. Значение $\mu(x)$ фиксируются по оси функций [10].

В области определения предметной переменной X_1 использованы пять нечетких множеств $\mu(x_1)$, опреде-

ляющих значение лингвистической переменной X_1 соответствующими функциями принадлежности $A_i^{x_1}$: $A_1^{x_1}$ – «положительное большое»; $A_2^{x_1}$ – «положительное малое»; $A_3^{x_1}$ – «нулевое»; $A_4^{x_1}$ – «отрицательное малое»; $A_5^{x_1}$ – «отрицательное большое».

Аналогично определяем функции принадлежности $A_i^{x_2}$ для значений лингвистической переменной X_2 .

В общем случае вид функций принадлежности $\mu(x_i)$ и форма их представления может быть произвольной. Но наибольшее применение получили так называемые «стандартные» функции принадлежности: «Z» – функции; «L» – функции; «S» – функции; «П» – функции [11].

Применительно к рассматриваемому случаю, функции принадлежности нечетких множеств $\mu(x_i)$ для входных переменных представлены в работе [11].

Нечеткие множества значений выходной лингвистической переменной Y определены функциями принадлежности B_i при $i=1\div5$: B_1 – «положительное большое»; B_2 – «положительное малое»; B_3 – «нулевое»; B_4 – «отрицательное малое»; B_5 – «отрицательное большое» [12].

Нечеткие множества выходной лингвистической переменной представлены в виде функции $\mu^Y(x)$

$$\mu^Y(x) = \delta \cdot (x - B) = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i = B_i; \\ 0, & \text{если } x_i \neq B_i, \end{cases} \quad (16)$$

где величины B_i представлены в виде вектора $B_i = [1; 0,5; 0; -0,5; -1]$ при $i=1\div5$.

При формировании базы правил для реализации нечеткого управления принято основное эвристическое правило, определяющее стратегию качественного управления [13].

Это правило формулируется следующим образом:

Если возникает рассогласование $\varepsilon(\tau)$, тогда необходимо управление возмущение, обеспечивающее устранение возникшего рассогласования. При $\varepsilon(\tau) \leq \varepsilon_n$ процесс управления считать завершённым, если это состояние соблюдается в течение заданного интервала времени. Здесь ε_n – заданная зона нечувствительности системы нечеткого управления [14].

Функционирование системы энергосберегающего управления давлением в рабочем пространстве промышленной печи определяется следующей базой правил:

$$\begin{aligned} R_1 : (X_1 = A_5^{x_1}) \cap (X_2 = A_3^{x_2}) &\rightarrow Y = B_5 = -1; \\ R_2 : (X_1 = A_1^{x_1}) \cap (X_2 = A_5^{x_2}) &\rightarrow Y = B_1 = +1; \\ R_3 : (X_1 = A_4^{x_1}) \cap (X_2 = A_3^{x_2}) &\rightarrow Y = B_4 = -0,5; \\ R_4 : (X_1 = A_2^{x_1}) \cap (X_2 = A_3^{x_2}) &\rightarrow Y = B_2 = 0,5; \\ R_5 : (X_1 = A_4^{x_1}) \cap (X_2 = A_4^{x_2}) &\rightarrow Y = B_5 = -1; \\ R_6 : (X_1 = A_2^{x_1}) \cap (X_2 = A_2^{x_2}) &\rightarrow Y = B_1 = +1; \\ R_7 : (X_1 = A_4^{x_1}) \cap (X_2 = A_2^{x_2}) &\rightarrow Y = B_3 = 0; \\ R_8 : (X_1 = A_2^{x_1}) \cap (X_2 = A_4^{x_2}) &\rightarrow Y = B_3 = 0; \\ R_9 : (X_1 = A_3^{x_1}) \cap (X_2 = A_4^{x_2}) &\rightarrow Y = B_4 = -0,5; \\ R_{10} : (X_1 = A_3^{x_1}) \cap (X_2 = A_2^{x_2}) &\rightarrow Y = B_2 = +0,5; \\ R_{11} : (X_1 = A_3^{x_1}) \cap (X_2 = A_3^{x_2}) &\rightarrow Y = B_3 = 0. \end{aligned}$$

Каждое правило может быть технологически и лингвистически обосновано следующим образом.

R_1 : «Если скорость рассогласования практически нулевая и возникло большое отрицательное рассогласование $\alpha_{\text{вх}}(\tau) > \alpha_{\text{вых}}(\tau)$, то на выходе нечеткого регулятора должно быть сформировано управляющее воздействие в направлении открытия дымового клапана «положительное большое» для устранения значительного выбивания продуктов сгорания».

При формулировке базы правил обязательно следует учитывать два важных обстоятельства [15]:

1. Условия формирования сигнала рассогласования $\varepsilon(\tau)$ на элементе сравнения ЭС.

2. Вид статической зависимости управляемого параметра от управляющего воздействия.

РЕАЛИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЕМ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЕЧИ НА КОНКРЕТНОМ ПРИМЕРЕ

Рассмотрим пример формирования управляющего воздействия $Y(\tau)$ при реализации нечеткого энергосберегающего управления давлением в рабочем пространстве нагревательной печи камерного типа в условиях стабилизации температуры рабочего пространства путем изменения расходов доменного газа и воздуха.

Допустим, что в начальный момент времени $\tau=0$ процесс находится в установившемся состоянии при условиях: расход доменного газа $2\,500\text{ м}^3/\text{ч}$; расход воздуха $2\,500\text{ м}^3/\text{ч}$; $\Delta\alpha_{\text{в}} \approx 0$; $x_{\text{вх}}(\tau=0) = 50\%$; $P_{\text{д}} \approx 0\text{ кг}/\text{м}^3$. В момент $\tau > 0$ за счет уменьшения расходов газа и воздуха до $2\,000\text{ м}^3/\text{ч}$ на вход контура нечеткого управления поступит сигнал $\Delta\alpha_{\text{в}}(\tau) = 0,17$.

Система управления характеризуется следующими параметрами: постоянная скорость перемещения дымового клапана $\bar{K}_{\text{им}} = 1,25\text{ \%}/\text{с}$; постоянная времени $T_0 = 2,2\text{ с}$; время запаздывания $\tau_3 = 1\text{ с}$; средний коэффициент передачи объекта (см. рис. 2) $\bar{K}_{06} = 0,0063\text{ } \Delta\alpha/\%$ хода ИМ; $K_1 = 0,3$; $K_2 = \bar{K}_{06} \cdot \bar{K}_{\text{им}} = 0,0079$; $\Delta Y_{\text{н}} = \pm 0,02$.

В соответствии с направлением изменения суммарных расходов газа и воздуха рабочая характеристика (см. рис.2) $\Delta\bar{\alpha}_{\text{в}}(\tau) = Y[x_{\text{вх}}(\tau)]$ соответственно смещается по оси $x_{\text{вх}}(\tau)$ на величину $0,02\text{ \%}/(\text{м}^3/\text{ч})$ и по оси $\Delta\bar{\alpha}_{\text{в}}(\tau)$ на величину $0,0063\text{ ед } \Delta\bar{\alpha}_{\text{в}}/(\text{м}^3/\text{ч})$.

Дискретность расчета переходного процесса в контуре нечеткого управления принимаем равной $0,25\text{ с}$.

При $\tau > 0$ и $\Delta\alpha_{\text{в}}(\tau) = 0,17$ величина управляющего воздействия $Y(\tau)$ в контуре нечеткого управления инерционным с запаздыванием процессом определяется следующим образом:

$$\varepsilon(\tau) = \Delta\alpha_{\text{в}}(\tau) = 0 - (-0,17) = 0,17;$$

$$\frac{\Delta\alpha_{\text{в}}(\tau)}{d\tau} = \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} = 0; \text{ тогда}$$

$$X_1 = \frac{\Delta\alpha_{\text{в}}(\tau)}{K_1} = \frac{0,17}{0,3} = 0,57;$$

$$X_2 = \frac{0}{K_2} = \frac{0}{0,0079} = 0.$$

Используя зависимости, приведенные в [10], определяем значения функций принадлежности для каждого

нормированного предметного информационного сигнала $A_i^{X_1}$ и $A_i^{X_2}$ при $X_1=0,57$; $X_2=0$ [10].

$$A_1^{X_1} = 0,46; A_2^{X_1} = 0,9; A_3^{X_1} = 0,3; A_4^{X_1} = 0; A_5^{X_1} = 0;$$

$$A_1^{X_2} = 0; A_2^{X_2} = 0,28; A_3^{X_2} = 1; A_4^{X_2} = 0,28; A_5^{X_2} = 0.$$

Определяем уровни «отсечений» для предпосылок каждого из правил (с использованием операции минимума) в соответствии с базой правил (17):

$$\begin{aligned}\mu_1^P &= \min(A_5^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0; 1) = 0; \\ \mu_2^P &= \min(A_1^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,46; 1) = 0,46; \\ \mu_3^P &= \min(A_4^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0; 1) = 0; \\ \mu_4^P &= \min(A_2^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,9; 1) = 0,9; \\ \mu_5^P &= \min(A_4^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0; 0,28) = 0; \\ \mu_6^P &= \min(A_2^{X_1}; A_2^{X_2}) = \min(0,9; 0,28) = 0,28; \\ \mu_7^P &= \min(A_4^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0; 0,28) = 0; \\ \mu_8^P &= \min(A_2^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0,9; 0,28) = 0,28; \\ \mu_9^P &= \min(A_3^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0,3; 0,28) = 0,28; \\ \mu_{10}^P &= \min(A_3^{X_1}; A_2^{X_2}) = \min(0,3; 0,28) = 0,28; \\ \mu_{11}^P &= \min(A_3^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,3; 1) = 0,3.\end{aligned}\quad (17)$$

Далее определяем четкое значение выходной переменной (нормированного управляющего воздействия) в соответствии с выражением

$$Y(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^R \cdot \sum_{i=1}^{11} (\mu_i^R \cdot \mu_i^Y)}{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^P \cdot \sum_{i=1}^{11} \mu_i^P};$$

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{11} (\mu_i^R \cdot \mu_i^Y) &= 0 \cdot (1) + 0,46 \cdot (-1) + 0 \cdot (0,5) + \\ &+ 0,9 \cdot (-0,5) + 0,28 \cdot 1 + 0 \cdot (-1) + 0 \cdot 0 + 0,28 + \\ &+ 0,28 \cdot 0,5 + 0,28 \cdot (-0,5) + 0,3 \cdot 0 = -0,63; \\ \sum_{i=1}^{11} \mu_i^P &= 0 + 0,46 + 0 + 0,9 + 0,28 + 0 + 0 + \\ &+ 0,28 + 0,28 + 0,28 + 0,3 + 0 + 0,46 + 0 + \\ &+ 0,9 + 0,28 + 0 + 0 + 0,28 + 0,28 + 0,28 + \\ &+ 0,3 = 2,78; \\ Y(\tau) &= -0,23.\end{aligned}\quad (18)$$

Поскольку $-0,23 < \Delta Y_{\text{н}}$, то ИМ начинает движение в направлении закрытия дымового клапана.

Расчётные траектории переходного процесса системы регулирования на основе нечёткой логики представлены на **рис. 3** и **4**.

Из графика (см. **рис. 3**) видно, что время регулирования составляет $\tau_{\text{р1}}=40$ с, а значит, система управления, основанная на нечёткой логике, достаточно быстродействующая, и данная система не допускает переключения.

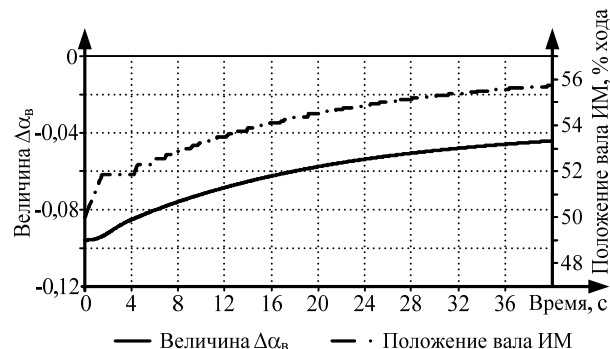


Рис. 3. Переходный процесс системы регулирования

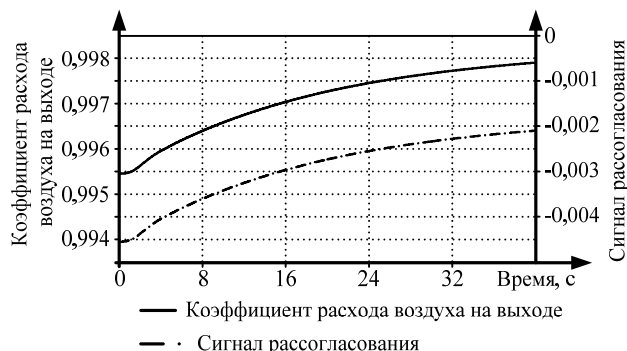


Рис. 4. Траектории изменения коэффициента расхода воздуха на выходе и сигнала рассогласования при стабилизации $\alpha_v=1,0$

Достоинством регуляторов, основанных на нечёткой логике, является не только их технологическая обоснованность, но и возможность поддержания определённой траектории выхода на рациональный режим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании энергосберегающего управления давлением в рабочем пространстве печи в условиях наличия множества случайных факторов и существенной нелинейной связи между входными и выходными параметрами, построенного на основании принципов нечетких множеств и нечеткой логики, выявлены некоторые преимущества по сравнению с традиционными стабилизирующими системами управления.

К таким преимуществам относятся:

1. Технологическая обоснованность системы управления.
2. Возможность поддержания определённой рациональной траектории выхода на рабочий режим.
3. Сниженное значение величины динамической ошибки (колебательности).
4. Переходный процесс осуществляется без переключения и колебаний, что благоприятно сказывается на ресурсе исполнительного механизма перемещения дымового клапана.

Кроме того, наличие базы правил для осуществления управления с помощью методов нечёткой логики делает возможным проведение оптимизации сложных контуров управления без проведения масштабных математических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парсункин Б.Н., Дегтярёв В.В. Определение места отбора импульса для управления давлением в рабочем пространстве методических печей // Изв. вузов. Чёрная металлургия. 1992. №11. С. 63-65.

- Автоматическое регулирование работы регенеративных нагревательных колодцев с помощью устройства для расчета коэффициента расхода воздуха / Парсункин Б.Н., Хусид С.Е., Иванов Н.И., Слесарев А.В. // *Сталь*. 1969. №5. С.169-171.
- Флер Р., Оттенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования: учебн. пособие. М.: Альтекс, 2009. 197 с.
- Прикладные нечёткие системы / под ред. Тэрано Т., Асан К., Сучено К. М.: МИР, 1993. 368 с.
- Батыршин И.З. Основные операции нечёткой логики и их обобщения. Казань: Отечество, 2001. 102 с.
- Рассел, С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. М.: Издательский дом «Вильямс», 2010. 408 с.
- Повышение производительности доменной печи при оптимизации автоматического управления подачей природного газа и технического кислорода в дутье / Парсункин Б.Н., Сеничкин Б.К., Андреев С.М., Рябчиков М.Ю. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2011. №4 (36). С. 69-73.
- Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Бушманова М.В. Расчеты систем автоматической оптимизации управления технологическими процессами в металлургии: учеб. пособие. Магнитогорск, 2009. 267 с.
- Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 452 с.
- Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 166 с.
- Моделирование управления давлением в рабочем пространстве промышленных печей при использовании принципа нечёткой логики / Васильев М.И., Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов Т.У. // *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах*. 2014. №2. С.35-45.
- Либерзон Л. М., Родов А.Б. Шаговые экстремальные системы. М.: Юрайт, 2009. 310 с.
- Syropoulos A. *Theory of Fuzzy Computation*. Springer, 2014. 170 p.
- Uziel Sandler, Lev Tsitolovsky *Neural Cell Behavior and Fuzzy Logic*. Springer, 2008. 478 p.
- Локальные стабилизирующие контуры автоматического управления в АСУ ТП промышленного производства / Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Логунова О.С., Ахметов У.Г. Магнитогорск: ООО «Полиграфия», 2012. 406 с.

Поступила в редакцию 09 февраля 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ENERGY EFFICIENT FUZZY PRESSURE CONTROL IN THE WORKING SPACE OF HEATING FURNACES

Boris N. Parsunkin

D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Automated Control Systems, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pksu035@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1822-2632>.

Mikhail I. Vasiliev

Postgraduate student, Department of Automated Control Systems, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Misha462@yandex.ru.

Natalia S. Sibileva

Postgraduate student, Department of Computer Engineering and Programming, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Natus224@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7242-2622>

The authors proved the feasibility of energy saving control of the gas-dynamic mode in the working space of industrial heating furnaces. They calculated the static relationship between the change in the air flow rate and the position of the chimney valve for the valve opening range of 10 to 100%. The efficiency of the energy saving control based on making use of fuzzy logic and fuzzy-set theory was proved. The structural scheme of the fuzzy energy saving control was developed. The paper describes the principles of control design to provide the automatic control of pressure in the working space of the furnace using fuzzy control principle. The research group considered the implementation of energy saving fuzzy control of pressure in the working space of the heating furnace when the temperature in the working space stabilizes due to the change in the flow of blast furnace gas and air.

Keywords: linguistic variable, truth degree, membership functions, fuzzy sets, heuristic rules.

REFERENCES

- Parsunkin B.N., Degtyarov V.V. Defining the place of pulse sampling to control pressure in the working space of continuous furnaces. *Izvestiya vuzov «Chyornaya metallurgiya»* [Bulletin of Universities «Ferrous Metallurgy»]. 1992, no.11, pp. 63-65. (In Russian)
- Parsunkin B.N., Husid S.E., Ivanov N.I., Slesarev A.V. Automatic control of regenerating soaking pit operation using the device for calculation of air flow coefficient. *Stal* [Steel], 1969, no.5, pp.169-171. (In Russian)
- Fler P., Ottenburger F. *Vvedenie v ehlektronnyuyu tekhniku regulirovaniya* [Introduction to electronic control engineering]: textbook. Moscow: Alteks, 2009. 197 p. (In Russian)
- Prikladnye nechyotkie sistemy* [Applied fuzzy systems] / Under the editorship of Tehrano T., Asan K., Sucheno K. Moscow: MIR, 1993. 368 p. (In Russian)
- Batyrsin I.Z. *Osnovnye operacii nechyotkoj logiki i ih obobshcheniya* [Basic operations of fuzzy logic and their generalization]. Kazan: Otechestvo, 2001. 102 p. (In Russian)
- Rassel, S., Norvig P. *Iskusstvennyj intellekt: sovremennyy podhod* [Artificial intelligence: modern approach]. Moscow: Izdatelskij dom «Vilyame», 2010. 408 p. (In Russian)
- Parsunkin B.N., Senichkin B.K., Andreev S.M., Ryabchikov M.YU. Blast furnace efficiency improvement by optimizing the automatic control of conventional gas and bulk oxygen supply to the blast. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 4 (36), pp. 69-73. (In Russian)

8. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Bushmanova M.V. *Raschety sistem avtomaticheskoy optimizacii upravleniya tekhnologicheskimi processami v metallurgii* [Design of automatic optimization control systems for production processes in metallurgy]: textbook. Magnitogorsk, 2009. 267 p. (In Russian)
9. Rutkovskaya D., Pilinskij M., Rutkovskij L. *Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechyotkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2004. 452 p. (In Russian)
10. Zade L. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoj i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennyh reshenij* [Definition of the linguistic variable and its application to making approximations]. Moscow: Mir, 1976. 166 p. (In Russian)
11. Vasiliev M.I., Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U. Pressure control in industrial workspace furnace using the principle of fuzzy logic. *Matematicheskoe programnoe obespechenie system v promyshlennoy i sotsialnoy sferakh* [Software systems in the industrial and social fields]. 2014, no. 2, pp. 35-45. (In Russian)
12. Liberzon L. M., Rodov A.B. *Shagovye ehkstremaalnye sistemy* [Step-by-step extreme systems]. Moscow: Yurajt, 2009. 310 p. (In Russian)
13. Syropoulos A. *Theory of Fuzzy Computation*. Springer, 2014. 170 p.
14. Uziel Sandler, Lev Tsitolovsky *Neural Cell Behavior and Fuzzy Logic*. Springer, 2008. 478 p.
15. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Ahmetov U.G. *Lokalne stabiliziruyushchie kontury avtomaticheskogo upravleniya v ASU TP promyshlennogo proizvodstva* [Local stabilizing circuits of automatic control in automatic control systems of industrial production processes]. Magnitogorsk: OOO «Poligrafiya», 2012. 406 p. (In Russian)

Парсункин Б.Н., Васильев М.И., Сибилева Н.С. Энергосберегающее автоматическое нечеткое управление давлением в рабочем пространстве нагревательных печей // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2(39). С. 63-69. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-63-69](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-63-69)

Parsunkin B.N., Vasiliev M.I., Sibileva N.S. Energy Efficient Fuzzy Pressure Control in the Working Space of Heating Furnaces. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 63-69. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-63-69](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-63-69)

ЛИНЕЙНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В СХЕМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АМОРТИЗАТОРА

Рассмотрены вопросы создания линейных генераторов с постоянными магнитами возвратно-поступательного движения. Применение высокоэнергетических постоянных магнитов делают перспективы их разработки вполне реальными, в частности при создании электрических амортизаторов, которые являются альтернативным вариантом амортизаторов гидравлических, широко применяемых в автомобилестроении. В электрическом амортизаторе кинетическая энергия колеблющегося элемента подвески преобразуется в электрическую. Эта энергия может быть использована для питания различных приборов автомобиля. Показано, что при выборе конструкции амортизатора предпочтительной оказалась конструкция с коротким наружным индуктором, в пазах которого расположена трехфазная обмотка генератора. Вторичный элемент имеет радиально намагниченные постоянные магниты на основе редкоземельных материалов. Вследствие относительного линейного перемещения элементов первичного с обмоткой и вторичного с постоянными магнитами, в обмотке индуцируется переменное напряжение, которое выпрямляется трехфазным выпрямителем и подается на аккумулятор. Представляет интерес оценить, какая часть энергии колебаний преобразуется в электрическую, а также электромагнитную силу, ее пиковые значения, время переходного процесса, число колебаний. Представлена математическая модель электрического амортизатора в пакете MATLAB/Simulink, позволяющая исследовать переходные процессы при различных законах изменения возмущающей силы. Приведены результаты исследования движущей силы, тока, скорости и перемещения от времени. Исследования показали, что для улучшения работы амортизатора необходимо параллельно аккумулятору подключить добавочное сопротивление, величина которого определяется для каждого конкретного случая. Предложенная математическая модель может быть использована в алгоритмах управления микропроцессоров систем подвески автомобилей и других средств передвижения.

Ключевые слова: электрический амортизатор, линейный генератор, постоянные магниты, Simulink-модель.

ВВЕДЕНИЕ

В современных технологиях успешно применяются линейные генераторы малой и средней мощности возвратно-поступательного движения. В частности, возникли предпосылки для создания таких генераторов мощностью в несколько десятков киловатт для гибридных автомобилей. Применение в линейных генераторах высокоэнергетических постоянных магнитов на основе редкоземельных материалов делает перспективы их разработки вполне реальной.

В автомобилях одной из важных составляющих для обеспечения максимального комфорта является система подвеса, при которой пассажир не ощущает тряску при езде по неровной дороге. Для этого служат гидравлические амортизаторы. При колебаниях упругого элемента подвески залитая в амортизатор жидкость перетекает из одной полости в другую через небольшие отверстия, которые оказывают сопротивление этому перетеканию. Альтернативой такому гидравлическому амортизатору может быть электрический амортизатор, в котором кинетическая энергия колеблющегося элемента подвески преобразуется в электрическую энергию [1-3].

Эта энергия может быть использована для зарядки аккумулятора, который является ее накопителем, и в дальнейшем может быть использована для питания контрольно-измерительных приборов, освещения панели приборов управления, радиоприемника, магнитолы, вентилятора, электростеклопакета.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Электрический амортизатор представлен на **рис. 1**. Он состоит из линейного генератора, пружины и накопителя электрической энергии. Были рассмотрены различные варианты конструкции линейного генератора. Предпочтительной оказалась конструкция с коротким наружным индуктором, в пазах которого расположена трехфазная обмотка генератора. Вторичный элемент имеет радиально намагниченные постоянные магниты. В качестве постоянных магнитов используются магниты на основе редкоземельных материалов Nd-Fe-B, поскольку они обладают более высокой удельной магнитной энергией при сравнительно низкой стоимости исходных материалов по сравнению с другими марками магнитов.

Во время колебаний автомобиля вторичный элемент перемещается относительно индуктора. Вследствие относительного линейного перемещения элементов – первичного с обмоткой и вторичного с постоянными магнитами в обмотке индуцируется переменное напряжение, которое затем выпрямляется трехфазным выпрямителем и подается на аккумулятор. Здесь аккумулятор является накопителем электрической энергии. Так как магнитное поле, созданное постоянными магнитами, меняется относительно индуктора, его сердечник выполняется шихтованным, чтобы уменьшить магнитные потери на гистерезис и вихревые токи.

Существует ряд научных проблем, которые необходимо решить при создании электрического амортизатора. В частности, представляет интерес определить, какая часть энергии колебаний преобразуется в электрическую энергию, также важно оценить электромагнитную силу, ее пиковое значение, время переходного процесса, число и размах колебаний.

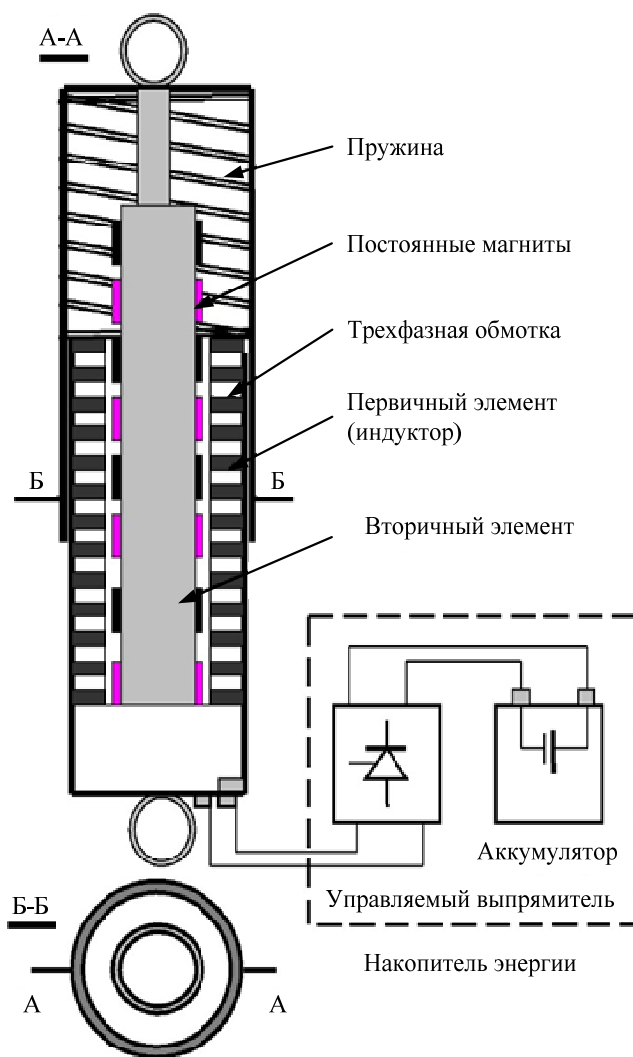


Рис. 1. Конструкция электрического амортизатора

При разработке электромеханического амортизатора основной задачей является оценка качества переходного процесса с целью учета влияния параметров схемы амортизатора на динамический процесс. Такую оценку дает приложение силы в виде ступени (внезапный наброс нагрузки). Ступенчатое возмущение достаточно широко используется в теории автоматического регулирования при исследовании динамических свойств объекта.

РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Для ответа на эти вопросы была создана математическая модель амортизатора, которая включала параметры линейного генератора, пружины, выпрямитель и аккумулятор. Предварительно был рассчитан генератор с постоянными магнитами и на основе его характеристик разработана пружина.

Расчет генератора проводился по известным методикам [4-6]. Линейный генератор с постоянными магнитами заменяет гидравлический амортизатор, поэтому его характеристики должны соответствовать характеристикам последнего. Основной характеристикой механического амортизаторов является зависимость демпфирующей силы F_d , действующей на

поршень, от скорости его перемещения v : $F_d = k_d \cdot v_d$. Была выбрана стандартная характеристика гидравлического амортизатора, установленного на задней подвеске автомобиля с передним приводом [7]. При скорости поршня $v_{d\max} = 0,52$ м/с, максимальная демпфирующая сила, согласно обобщенной характеристики, составляет $F_{d\max} = 1450$ Н. Поэтому генератор проектировался на эту максимальную силу, развиваемую при скорости вторичного элемента $v = 0,52$ м/с, и напряжении на выходе выпрямителя, равном напряжению аккумулятора $U_{ak} = 24$ В.

Размеры линейного генератора и его выходные показатели приведены ниже.

Индуктор: число пар полюсов $p = 4$; внешний диаметр индуктора $D_1 = 0,1048$ м; диаметр яра индуктора $D_{a1} = 0,0988$ м; толщина яра индуктора $h_a = 0,003$ м; полюсное деление $\tau = 0,035$ м; высота зубца $h_z = 0,0244$ м; ширина зубца $b_z = 0,0039$ м; ширина паза $b_n = 0,0078$ м; длина индуктора $l_1 = 0,28$ м; число фаз $m_1 = 3$; число зубцов $Z_1 = 24$; число витков в фазе $W_\phi = 560$. Сопротивление фазы $R_a = 1,3$ Ом; индуктивность фазы $L_a = 6,1$ мГн.

Вторичный элемент: воздушный зазор $\delta = 0,001$ м; наружный диаметр вторичного элемента $D_2 = 0,048$ м; наружный диаметр сердечника вторичного элемента $D_{a2} = 0,040$ м; длина вторичного элемента $l_2 = 0,42$ м; постоянные магниты (NdFeB): остаточная индукция $B_r = 1,2$ Тл; коэрцитивная сила — $H_c = 900$ кА/м; высота постоянного магнита $h_m = 0,004$ м.

Основные выходные показатели линейного генератора: выходное напряжение $U_{\text{вых}} = 24$ В; максимальная сила сжатия, развиваемая генератором при скорости $v = 0,5$ м/с, $F = 1450$ Н.

При проектировании пружины принималось, что она должна работать на сжатие, и может быть изготовлена из хромованадиевой или хромоникелевой стали. Режим работы пружины периодический, с большим интервалом пауз.

Основные параметры пружины: длина пружины $l = 0,14$ м; постоянная пружины $K_s = 10,3 \cdot 10^3$ Н/м; средний диаметр пружины $D = 0,08$ м; число витков пружины $N = 6$; диаметр прутка — $d = 0,023$ м.

Электрическая схема амортизатора и ее элементы представлена на рис. 2.

На ней трехфазная обмотка генератора соединена с выпрямителем, который подключен к накопителю. Для обеспечения передачи энергии генератора к аккумулятору необходимо, чтобы величина ЭДС E , индуцируемая в обмотке индуктора, превосходила напряжение аккумулятора на величину ΔU_a .

Для исследования основных показателей амортизатора, а также зависимости их от параметров электрической системы использовалась упрощенная эквивалентная схема замещения электрического амортизатора, представленная на рис. 3. Ключ $K1$, изображенной на схеме, отражает работу полупроводникового элемента — диода. Ключ закрыт, и ток проходит через него только в том случае, когда мгновенная величина ЭДС e , превышает напряжение аккумулятора.

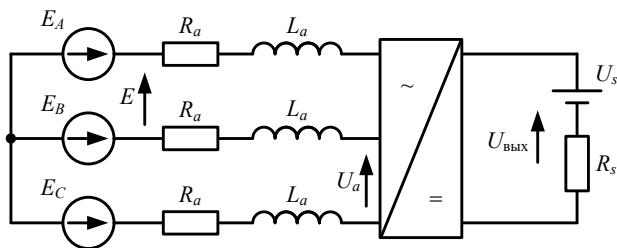


Рис. 2. Электрическая схема амортизатора

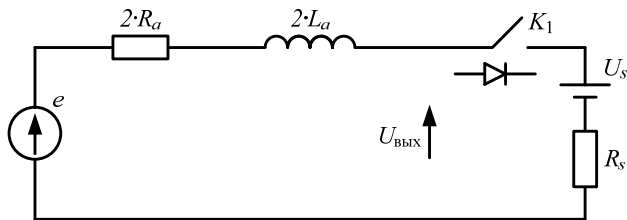


Рис. 3. Эквивалентная схема электрического амортизатора с диодом (ключ K_1)

Уравнение равновесия напряжений и ЭДС для этой схемы имеет вид

$$e = U_s + (2R_a + R_s) \cdot i + L \frac{di}{dt}, \quad (1)$$

где R_s , U_s – сопротивление и напряжение аккумулятора; $L = 2 \cdot L_a$ – общая индуктивность линейного генератора при работе на выпрямитель; L_a – индуктивность фазы.

Линейные напряжения трехфазного генератора, подключенные к трехфазному выпрямителю, могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} e_{AB} &= K_e [\sin(\omega t) - \sin(\omega t - 2\pi/3)]; \\ e_{BC} &= K_e [\sin(\omega t - 2\pi/3) - \sin(\omega t + 2\pi/3)]; \\ e_{CA} &= K_e [\sin(\omega t + 2\pi/3) - \sin(\omega t)], \end{aligned} \quad (2)$$

где $K_e = E/U_{\text{ВЫХ}} > 1$ – коэффициент ЭДС, который уточняется в процессе расчета.

Средняя величина ЭДС на выходе выпрямителя равна

$$E = 3\sqrt{3}E_\phi / \pi. \quad (3)$$

Механическая система автомобиля при действии всех сил описывается следующей системой дифференциальных уравнений второго порядка [1]:

$$F_g + F_d = F_{em} + m \frac{d^2 x}{dt^2} + F_f + F_s, \quad (4)$$

где m – расчетная масса автомобиля, приходящаяся на один амортизатор; $F_{em} = K_E \cdot i$ – электромагнитная сила, i – выходной ток; $F_g = m \cdot g$; g – гравитационная постоянная; F_d – движущая сила; $F_s = K_s \cdot x$ – усилие пружины; K_s – постоянная пружины; x – линейное перемещение вторичного элемента линейного генератора относительно индуктора; $F_f = v \cdot D_f$ – сила трения; D_f – коэффициент трения; v – относительная скорость вторичного элемента; $P_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}} \cdot i$ – мгновенная выходная мощность; $U_{\text{ВЫХ}}$ – выходное напряжение.

На рис. 4 приведена блок-схема модели электрического амортизатора, построенная на основании вышеприведенных уравнений в физико-математическом пакете *MATLAB-Simulink* [8].

Начальные условия для всех интеграторов, за исключением интегратора перемещения, приняты нулевыми. Начальное условие последнего находится из решения уравнения (4) при подстановке в него значений $i = v = 0$, $dx/dt = 0$ и $F_d = 0$, т. е.

$$mg + F_d = K_s \cdot x. \quad (5)$$

Тогда начальное значение $x_0 = m \cdot g / K_s = 0,093$ м. После приложения ступенчатого воздействия система амортизатора реагирует на это воздействие, начинается колебательный процесс, после которого она приходит в новое положение равновесия, отличающееся от начального наличием силы F_d . Поэтому $x_{\text{уст}}$ определяется с учетом действия этой силы на основе баланса всех сил после завершения переходного процесса, как $x_{\text{уст}} = (m \cdot g + F_d) / K_s = 0,237$ м.

Для анализа работы электрического амортизатора в динамических режимах были проведены исследования зависимости движущей силы, тока, скорости и перемещения от времени. При моделировании были использованы следующие параметры и коэффициенты: активное сопротивление фазы генератора $R_a = 1,3$ Ом; индуктивность фазы генератора $L_a = 6,1$ мГн; коэффициент связи напряжения и скорости $K_E = 72$ В·с/м; расчетная масса автомобиля (масса кузова, двигателя и водителя малолитражного автомобиля принята равной 400, кг) на один амортизатор $m = 100$ кг; постоянная пружины $K_s = 10,3 \cdot 10^3$ Н/м; коэффициент трения $D_f = 0,12$ Н·с/м; гравитационная постоянная $g = 9,8$ м/с²; сопротивление источника $R_s = 0,1$ Ом; напряжение источника $U_s = 24$ В. Движущая сила представляет собой динамическую силу, действующую на амортизатор, когда автомобиль попадает на неровность во время движения, она принимается равной максимальной силе $F_d = 1450$ Н. Эта сила прикладывается к амортизатору после 0,1 секунды от начала моделирования. Величина и характер силы задаются в свойствах блока «*Signal Builder*» модели (см. рис. 4). Результаты моделирования при ступенчатом воздействии движущей силы показаны на рис. 5. На графиках представлены временные зависимости перемещения индуктора амортизатора x и скорости v .

Характер зависимости перемещения x показывает, что, после того как к амортизатору приложена усилие, колебания будут затухать до тех пор, пока ЭДС генератора превышает напряжения аккумулятора ($e > U_s$). Эти колебания возникают, если скорость движущейся части линейного генератора превышает определенное значение. Ниже этого значения скорости индуцируемое напряжение меньше напряжения аккумулятора ($e < U_s$). В результате ток генератора стремится к нулю, и демпфирующая электромагнитная сила, развиваемая генератором, также стремится к нулю, что приводит к установившимся колебаниям механической системы около установившегося значения $x_{\text{уст}}$, которое равно $x_{\text{уст}} = 0,235$ м (см. рис. 5).

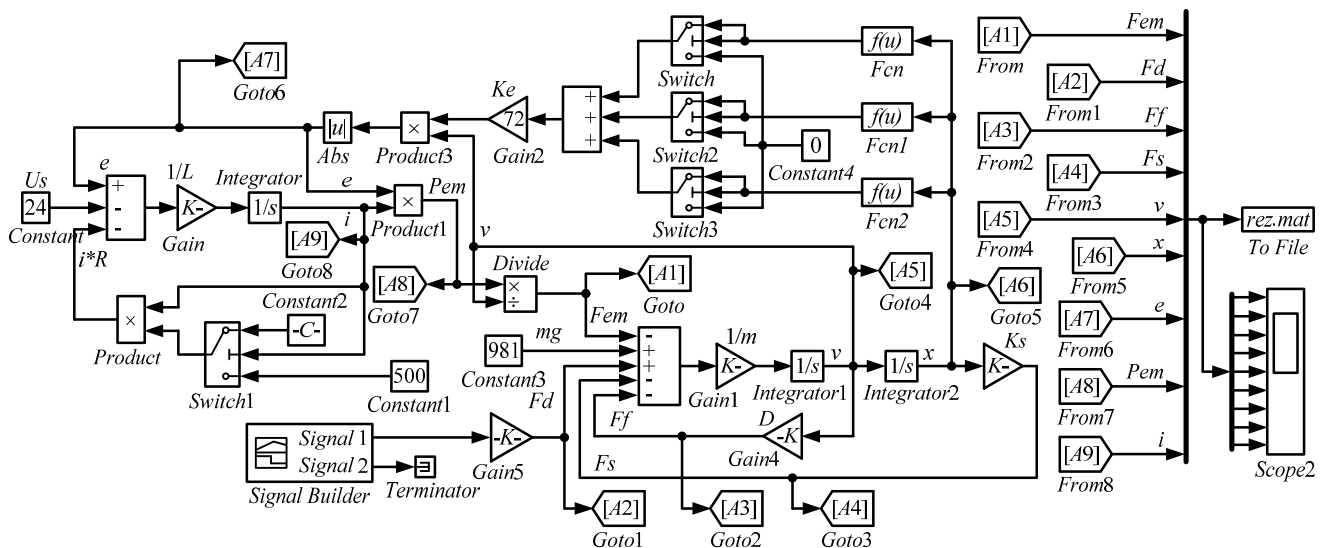


Рис. 4. Модель электрического амортизатора в физико-математическом пакете MATLAB-SIMULINK

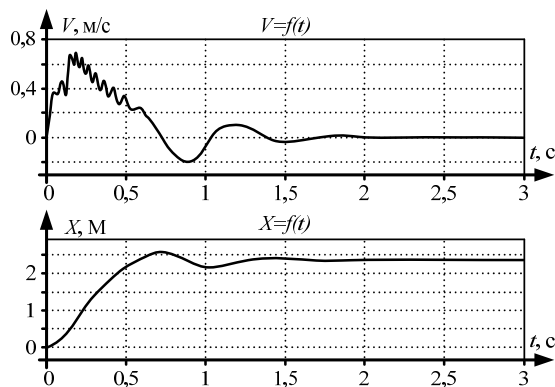


Рис. 5. Графики перемещения и скорости вторичного элемента при воздействии возмущающей силы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что для улучшения работы амортизатора необходимо параллельно аккумулятору подключать небольшое добавочное сопротивление, величина которого определяется для каждого конкретного случая. При включении сопротивления генератор переходит в режим, близкий к короткому замыканию, и колебания механической системы затухают гораздо быстрее, чем при его отсутствии.

В результате проделанной работы предложена математическая модель электрического амортизатора для транспортного средства, позволяющая исследовать динамические процессы и изучать качество его работы на основе анализа мгновенных значений тока, выход-

ного напряжения, мощности, скорости и перемещения вторичного элемента.

Данная математическая модель позволяет значительно снизить затраты расчетного времени при разработке линейных генераторов с постоянными магнитами. Эта модель также может быть использована в алгоритмах управления микропроцессоров систем подвески автомобиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хитерер М.Я., Овчинников И.Е. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. СПб.: Корона-Принт, 2008. 368 с.
2. Gieras J.F., Piech Z.J. Linear Synchronous Motors. CRS, Press. 2000.
3. Zhen Longing and Wei Xiao gang, 'Structure and Performance Analysis of Regenerative Electromagnetic Shock Absorber', Journal of networks, vol. 5, no. 12, December 2010.
4. Мощинский Ю.А. Расчет синхронных генераторов с постоянными магнитами. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 31 с.
5. Соколова Е.М., Мощинский Ю.А. Цилиндрические линейные асинхронные двигатели. М.: Изд-во МЭИ, 1998. 26 с.
6. Проектирование электрических машин / под общ. ред. Копылова И.П. М.: Энергия, 1980. 495 с.
7. Дербаремдикер А.Д. Гидравлические амортизаторы автомобилей. М.: Машиностроение, 1969. 236 с.
8. Черных И.В. Simulink: среда создания инженерных приложений / под общ. ред. Потемкина В.Г. М.: Диалог-МИФИ, 2003. 496 с.

Поступила в редакцию 13 января 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

LINEAR GENERATOR WITH PERMANENT MAGNETS IN THE ELECTRIC SHOCK ABSORBER CIRCUIT

Jurij A. Moshhinskij

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices, Moscow Power Engineering Institute (National Research University). E-mail: MoshchinskyYA@mpei.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9292-2728>

Elena M. Sokolova

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices, Moscow Power Engineering Institute (National Research University). E-mail: CokolovaYM@mpei.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2470-9570>

Kirill V. Shumov

Postgraduate student, Department of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices, Moscow Power Engineering Institute (National Research University). E-mail: k_shumov@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0811-1659>

The problems of creating linear generators with permanent magnets of reciprocating motion are considered. The use of high-energy permanent magnets makes the prospects for their development very real, when creating electric shock absorbers, which are an alternative version of hydraulic shock absorbers widely used in the automotive industry. In the electric shock absorber, the kinetic energy of the oscillating suspension element is converted to electric one. This energy can be used to power various car devices. It is shown that when choosing a shock absorber design, the design with a short external inductor is preferable, in the grooves of which there is a three-phase winding of the generator. The secondary element has radially magnetized permanent magnets based on rare-earth materials. Due to the relative linear displacement of the primary with the winding and the secondary with permanent magnets, an alternating voltage is induced in the winding, which is rectified by a three-phase rectifier and is supplied to the battery. It is of interest to estimate which part of the vibrational energy is converted into electric one, the electromagnetic force, its peak values, the time of the transient process, the number of oscillations. A mathematical model of an electric shock absorber is presented in the MATLAB / Simulink package, which allows one to investigate transient processes under various laws of perturbation force variation. The results of the study of the driving force, current, speed and displacement from time are given. Studies have shown that to improve the performance of the shock absorber, it is necessary to connect in parallel the accumulator an additional resistance, the value of which is determined for each specific case. The proposed mathematical model can be used in algorithms for controlling microprocessors of suspension systems for cars and other vehicles.

Keywords: electric shock absorber, linear generator, permanent magnets, Simulink-model.

REFERENCES

1. Hiterer M.Ja., Ovchinnikov I.E. *Sinhronnye elektricheskie mashiny vozvratno- postupatel'nogo dvizhenija* [Synchronous electric reciprocating machines]. St. Petersburg, Korona-Print. 2008. 368 p. (In Russian)
2. Gieras J.F., Piech Z.J. *Linear Synchronous Motors*. CRS, Press. 2000.
3. Zhen Longing and Wei Xiao gang, 'Structure and Performance Analysis of Regenerative Electromagnetic Shock Absorber', *Journal of networks*, vol. 5, no. 12, December 2010.
4. Moshhinskij Yu.A. *Raschet sinhronnyh generatorov s postojannymi magnitami* [Calculation of synchronous generators with permanent magnets]. Moscow, MPEI Publ., 2002, 31 p. (In Russian)
5. Sokolova E.M., Moshhinskij Yu.A. *Tsilindricheskie lineynye asinhronnye dvigateli* [Cylindrical Linear Asynchronous Motors]. Moscow, MPEI Publ., 1998, 26 p.
6. Kopylov I.P. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Designing of electrical machines]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 495 p. (In Russian)
7. Derbaremdiker A. D. *Gidravlicheckie amortizatori avtomobilei* [Hydraulic shock absorbers for cars]. Moscow: Mashinostroenie, 1969, 236 p. (In Russian)
8. Chernyh I.V., Potemkin V.G., *Simulink: sreda sozdanija inzhenernyh prilozhenij* [Simulink: the environment for creating engineering applications]. Moscow, Dialog – MEPhI Publ., 2003. 496 p. (In Russian)

Соколова Е.М., Мощинский Ю.А., Шумов К.В. Линейный генератор с постоянными магнитами в схеме электрического амортизатора // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 2(39). С. 70-74. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-70-74](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-70-74)

Sokolova E.M., Moshhinskij Ju.A., Shumov K.V. Linear Generator with Permanent Magnets in the Electric Shock Absorber Circuit. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 70-74. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-70-74](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-70-74)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аллаяров Азат Анварович – магистрант, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Багаева Хамис Магомедрасуловна – студент, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: bagaevahamis@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2391-270X>

Бодров Евгений Эдуардович – канд. техн. наук, доц. каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: forheartist@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-8213>.

Бодрова Снежана Ивановна – магистрант, каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: forheartist@mail.ru.

Бочкарев Игорь Викторович – д-р техн. наук, проф., каф. электромеханики, Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: elmech@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

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

Васильев Михаил Иванович – аспирант, каф. автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Misha462@yandex.ru

Верзунов Сергей Николаевич – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории информационно-измерительных систем, Институт автоматики и информационных технологий, Национальная академия наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: verzunov@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3130-2776>

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

Гетопанов Алексей Юрьевич – аспирант, начальник участка подстанций, электроремонтный цех, ОАО «АМУРМЕТАЛЛ», г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: Getopanov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4638-9993>

Данилов Егор Иванович – магистрант, каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Зюзев Анатолий Михайлович – д-р техн. наук, доц., проф. каф. электропривода и автоматизации промышленных установок, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru

Климаш Владимир Степанович – д-р техн. наук, проф. каф. промышленной электроники, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: klimash@yandex.ru.

Кондрашова Юлия Николаевна – канд. техн. наук, доц. каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5280-5666>.

Кононенко Влада Сергеевна – студент, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Vladakononenko29@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2436-295X>

Косматов Валерий Иванович – канд. техн. наук, проф. каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Метельков Владимир Павлович – канд. техн. наук, доц. каф. электропривода и автоматизации промышленных установок, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5640-1637>

Михеева Валерия Олеговна – студент, каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Мошинский Юрий Анатольевич – канд. техн. наук, доц., институт электротехники, каф. электромеханики электрических и электронных аппаратов, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия. E-mail: MoshchinskyYA@mpei.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9292-2728>

Паздерин Андрей Владимирович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. автоматизированных электрических систем, ФГАОУ ВО «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, доц., начальник отдела инновационных разработок, ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: panov.a@konsom.ru.

Панова Евгения Александровна – канд. техн. наук, доц. каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «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>

Парсункин Борис Николаевич – д-р техн. наук, проф. каф. автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: pksu035@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1822-2632>

Патшин Николай Трофимович – канд. техн. наук, доц. каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Поляков Илья Дмитриевич – аспирант, каф. автоматизированных электрических систем, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: a.v.pazderin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0983-7021>

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

Сибилева Наталья Сергеевна – аспирант, каф. вычислительной техники и программирования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Natus224@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7242-2622>

Соколова Елена Михайловна – канд. техн. наук, доц., институт электротехники, каф. электромеханики электрических и электронных аппаратов, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия. E-mail: SokolovaYM@mpei.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2470-9570>

Табаров Бехруз Довудходжаевич – специалист отдела организации, профорientации и рекламы, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: behruz.tabarov@mail.ru

Хатюшина Татьяна Владимировна – студент, каф. вычислительной техники и программирования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: tatyana_hatyushina@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1612-9365>

Шумов Кирилл Валерьевич – аспирант, институт электротехники, каф. электромеханики электрических и электронных аппаратов, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия. E-mail: k_shumov@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0811-1659>

Уважаемые коллеги!

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

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

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

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:

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

Публикация статей является бесплатной.

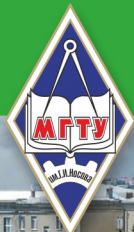
Статьи, направленные в адрес журнала, проходят обязательное научное рецензирование и редактирование. Несоответствие материалов требованиям к статьям может служить поводом для отказа в публикации.

Статья должна быть набрана в шаблоне, который размещен на сайте журнала esik.magtu.ru в разделе «Руководство для авторов». Там же находится инструкция по его заполнению, в которой приведены требования к оформлению статей.

Авторы статьи должны гарантировать, что их работа публикуется впервые. Если элементы рукописи ранее были опубликованы в другой работе (статье, монографии, автореферате и т.д.), в том числе на другом языке, авторы обязаны сослаться на более раннюю работу. При этом они обязаны указать, в чем существенное отличие новой работы от предыдущей и, вместе с тем, выявить ее связь с результатами исследований и выводами, представленными в предыдущей работе. Дословное копирование собственных работ или ее элементов более чем на 30 % и их перефразирование не приемлемы!

Пакет подаваемых документов:

- рукопись статьи;
- информация об авторах;
- экспертное заключение о возможности опубликования;
- лицензионный договор, заполненный на каждого автора в двух экземплярах (отсканированная копия отправляется в формате pdf, оригиналы – по почте вместе с остальными документами).



Научно-образовательный центр «Шнейдер Электрик – МГТУ им. Г.И.Носова



Концептуальной основой НОЦ является интегрированная автоматизированная система управления (ИАСУ), позволяющая на технических и программных средствах SE изучать и проектировать как локальные объекты электроснабжения и электропривода, так и АСУ различных уровней. Такой подход при создании Центра дал возможность в процессе обучения не только изучать конкретное оборудование и программное обеспечение ИАСУ, но и разрабатывать собственные АСУ и системы автоматизации.

Наполнение центра современным оборудованием с возможностью включения его в АСУ различного уровня делает привлекательным прохождение теоретических и практических занятий как для разработчиков и проектировщиков, так и для служб эксплуатации и наладки промышленных предприятий.

Образовательный центр включает в себя компьютерный класс на 12 ПК и 24 посадочных места (разработка программно-технических комплексов с базовым программным обеспечением), мульти-медийный класс на 18 посадочных мест (проведение презентаций, докладов и теоретических занятий), 4 лабораторных стенда, моделирующих работу интегрированной распределенной АСУ участка, цеха.



Перечень направлений подготовки в рамках НОЦ для бакалавров и магистрантов:

- 27.03.04 и 27.04.04 «Управление в технических системах»;
- 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профили «Электропривод и автоматика» и «Электроснабжение»);
- 15.03.06 и 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» (профиль «Мехатронные системы в автоматизированном производстве»).

Совместно разработанные программы «Шнейдер Электрик– МГТУ им. Г.И.Носова:

- системы управления электроприводами на базе преобразователей частоты ATV32, ATV71 и ATV93 и библиотеки SoMove;
- примеры архитектур локальной автоматики. Особенности конфигурирования контроллера Modicon M251и разработка приложений SoMachin;
- интеграция оборудования распределения электроэнергии и АСУТП в единую систему управления. Организация сетей CANOpen и Ethernet. Современные подходы к построению программно-технических комплексов.