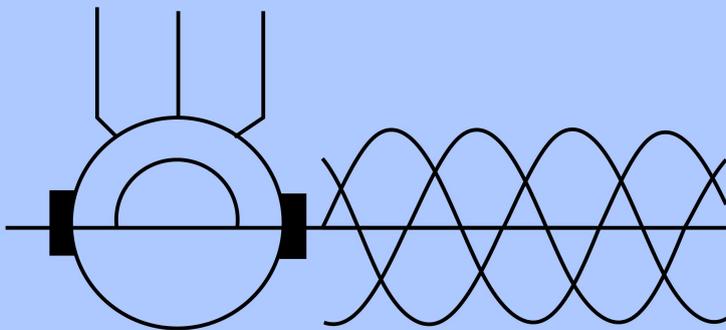
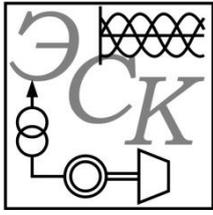


ISSN 2311-8318
ISSN (online) 2658-3151

Электротехнические Системы и Комплексы



№2(43), 2019



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 2(43), ИЮНЬ 2019

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

Редакционная коллегия

Председатель редакционной коллегии:

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

Главный редактор:

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

Н.Ф. Джазаров – проф., д-р техн. наук,
Высшее военно-морское училище
им. Николая 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;

И.Ю. Андриюшин – канд. техн. наук,
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,
ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

Секция электротехнологий в промышленности:

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

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

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

Секция мониторинга, контроля и диагностики электрооборудования:

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

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

Технические редакторы:

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

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

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

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

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

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

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

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

Адрес редакции:

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

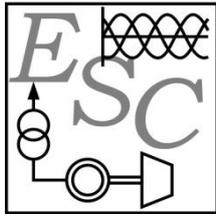
Адрес издателя:

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

Адрес типографии:

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

Выход в свет 28.06.2019. Заказ 184. Тираж 500 экз.
Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 2(43) JUNE, 2019

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

Editorial Board

Head of the Editorial Board:

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

Editor in Chief:

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

Executive Editor:

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

Secton of Theory and Practice of Automated Electric Drive:

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

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

O.A. Kravchenko – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), SRSPU (NPI), Novochoerkassk,
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;

I.Yu. Andryushin – Ph.D. (Engineering),
MMK PJSC, Magnitogorsk, Russia.

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

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

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

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

Secton of Industrial Electro Technology:

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

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

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

Secton of Monitoring, Diagnostics and Control of Electric Equipment:

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

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

Technical Editors:

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

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

© FSBEI HE NMSTU, 2019

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

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

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

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

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

The publisher:

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

The editorial office:

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

The printing-office:

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

Publication date: 28.06.2019. Order 184. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА.....	4
<i>Беляев С.В., Малафеев А.В., Омельченко Е.Я.</i> Разработка оптимальных графиков ремонта оборудования электрических сетей с целью повышения надежности их функционирования.....	4
<i>Газизова О.В., Соколов А.П., Патишин Н.Т., Кондрашова Ю.Н.</i> Анализ допустимости режима потери возбуждения синхронного генератора в условиях промышленной системы электроснабжения сложной конфигурации.....	12
<i>Панова Е.А., Варганова А.В., Панарина М.С., Хатюшина Т.В.</i> Алгоритм автоматизированного выбора и проверки измерительных трансформаторов тока в составе САПР электрических подстанций	19
ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	25
<i>Логунова О.С., Агапитов Е.Б., Баранкова И.И., Андреев С.М., Чусавитина Г.Н.</i> Математические модели для исследования теплого состояния тел и управления тепловыми процессами	25
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	35
<i>Захарова А.А., Комков А.Н.</i> Моделирование самозапуска электроприводов головных агрегатов нефтеперекачивающей станции	35
<i>Гасияров В.Р., Логинов Б.М., Воронин С.С.</i> Повышение точности регулирования толщины раската в режиме профилированной прокатки средствами электро- и гидропривода.....	43
<i>Метельков В.П., Либерман Я.Л.</i> К вопросу о выборе режима пуска ленточного конвейера.....	54
<i>Дубовик М.Е., Соловьев В.А.</i> Динамическая модель машины двойного питания при управлении со стороны ротора.....	60
МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ	65
<i>Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф.</i> Диагностика композитных материалов в электрических машинах	65
<i>Брякин И.В., Боцкарев И.В.</i> Гибридный метод индукционного зондирования для обнаружения подземных кабельных линий и трубопроводов	70
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	79

CONTENT

POWER ENGINEERING	4
<i>Belyaev S.V., Malafeev A.V., Omelchenko E.Ya.</i> Development of Optimum Repair Schedule of Electrical Network Equipment to Improve the Reliability of its Functioning	4
<i>Gazizova O.V., Sokolov A.P., Patshin N.T., Kondrashova Yu.N.</i> Analysis of Permissibility of the Excitation Loss Mode of the Synchronous Generator in the Conditions of the Industrial Electrical Supply System.....	12
<i>Panova E.A., Varganova A.V., Panarina M.S., Khatushina T.V.</i> Algorithm for Automated Selection and Verification of Instrument Current Transformers in the Electrical Substations CAD System	19
TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE AND SOFTWARE	25
<i>Logunova O.S., Agapitov E.B., Barankova I.I., Andreev S.M., Chusavitina G.N.</i> Mathematical Models for Investigation of the Heat Condition of Objects and Heat Processes Control	25
THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE.....	35
<i>Zakharova A.A., Komkov A.N.</i> Simulation of Electric Drive Self-Start of Head Units at the Oil Pumping Station	35
<i>Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Voronin S.S.</i> Improving the Control Accuracy of the Strip Plate During Shaped Rolling Using Electric and Hydraulic Drives.....	43
<i>Metelkov V.P., Liberman Ya.L.</i> Choosing the Belt Conveyor Start Mode	54
<i>Dubovik M.E., Solovyev V.A.</i> Dynamic Model of a Dual Power Machine Controlled from the Rotor Side	60
MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ELECTRIC EQUIPMENT.....	65
<i>Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Sayakhov I.F.</i> Diagnostics of Composite Materials in Electrical Machines	65
<i>Bryakin I.V., Bochkarev I.V.</i> Hybrid Induction Sensing Method for Detection of Underground Cable Lines and Pipelines.....	70
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	79

Беляев С.В.¹, Малафеев А.В.², Омельченко Е.Я.²¹ ПАО «Межрегиональная распределительная сетевая компания Урала», г. Екатеринбург² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ ГРАФИКОВ РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей поддержание в работоспособном состоянии электрических сетей сегодня осуществляется за счет использования системы планово-предупредительного ремонта. В общем случае такая система позволяет выстраивать графики ремонтов оборудования на основе ремонтных циклов на длительное время, заранее предопределить перечень необходимых материальных и трудовых ресурсов. Однако на практике использование данной системы является довольно затруднительным и не всегда эффективным. Это связано с необходимостью изменения ремонтного графика при аварийных или неотложных ремонтах, учета сезонности выполняемых работ и организационной структуры рассматриваемого производственного отделения электрических сетей и смежных подразделений, а также учета особенностей эксплуатации конкретного оборудования. С учетом современных темпов развития электрических сетей со стабильным приростом числа потребителей (что также приводит к усложнению конфигурации электрических сетей) это невозможно без использования соответствующего математического и программного обеспечения, обеспечивающего автоматизацию процессов планирования работ по техническому обслуживанию и ремонту электрических сетей с учетом большого количества факторов. В качестве основного критерия оптимальности принято минимальное время простоя оборудования как фактор, во многом обуславливающий надежность электроснабжения. Разработан алгоритм планирования, учитывающий ранжирование работ по степени важности, возможность их сдвига во времени и вероятную корректировку графика по результатам оценки технического состояния оборудования. Предложены способ минимизации времени простоя ремонтных бригад за счет задействования их на смежных участках, а также методика выявления совокупности оборудования, которое может находиться в ремонте в один и тот же период времени.

Ключевые слова: график ремонтов, надежность электроснабжения, время простоя, ранг работы, резервная бригада, совместимость ремонтов, сдвиг работы, фактическое состояние оборудования, внеплановая работа, корректировка графика.

ВВЕДЕНИЕ

Как показывает опыт эксплуатации, принятая длительность ремонтных циклов оборудования электрических сетей и подстанций не учитывает рост повреждаемости оборудования при увеличении срока его эксплуатации. Вместе с тем при использовании современных средств диагностики появляется техническая возможность раннего выявления дефектов как основного оборудования, так и оборудования распределительных устройств без снятия напряжения, что позволяет обеспечить ремонтные службы дополнительными данными о техническом состоянии. Повышается также степень юридической ответственности сетевых компаний в связи с нарушением электроснабжения потребителей. Тенденция к сокращению штата ремонтных бригад приводит к необходимости как можно более равномерно распределять трудовые ресурсы в течение периода планирования для обеспечения их резерва с целью оперативного реагирования на возникающие аварийные режимы. Таким образом, становится актуальной задача не только оптимального планирования графиков ремонтов, но и их оперативной коррекции в любой момент времени по принятому критерию оптимальности.

Большинство исследований в области организации ремонтов направлено на решение следующих основных задач – оперативное рассмотрение ремонтных заявок, выполняемое диспетчерским персоналом; оперативное обслуживание оборудования, выполняемое дежурным персоналом объектов; разработку планов проведения ремонтов, выполняемую соответствующими функциональными службами – линий, подстанций, релейной

защиты и автоматики и др. Проблеме краткосрочного планирования ремонтных отключений посвящена работа [1]. Отмечается сложность формализации такой задачи. В работе предложена система ранжирования заявок и дальнейший выбор способа решения в зависимости от влияния заявки на вероятный недоотпуск электроэнергии. Вопросы выбора рациональной системы обслуживания электрических сетей рассмотрены в статье [2]. Разработана методика оптимального размещения субъектов обслуживания, основанная на методе линейного программирования. Подход к этой же задаче с учетом размещения дополнительных объектов телемеханики и автоматики за счет применения теории массового обслуживания разработан в [3]. Целый ряд работ посвящен организации проведения ремонтов по фактическому состоянию оборудованию с использованием различных методов неразрушающей диагностики (например, [4]). Так, в [5] предложены новые показатели ремонтпригодности – коэффициенты контролепригодности и ремонтодоступности, дана методика их расчета. Разработке принципов управления техническим состоянием оборудования посвящена статья [6]. Автором получены критерии эффективности, основанные на расчетной оценке остаточного ресурса. Методика анализа топологии оперативных схем, предназначенная для решения задач диспетчерского управления и основанная на синтезе булевой алгебры множеств и алгебры бинарных отношений, предлагается в [7]. Подход к оценке длительности нерабочих состояний оборудования, основанный на статистическом моделировании, рассмотрен в [8]. Методы статистического анализа использованы также в [9] для оценки дискретных показателей состояния электрической сети. Развитие этого подхода, основанное на при-

менении нейронных сетей и теории нечетких множеств, изложено в [10,11]. В работе [12] предлагается для распознавания технического состояния на основе данных диагностики использовать методы искусственного интеллекта, в частности машинного обучения.

При планировании ремонтной деятельности расширение получили экспертные методы. Совершенствованию одного из таких методов – метода анализа иерархий – посвящена работа [13], в которой предложен пошаговый контроль согласованности оценок экспертов. В [14] для повышения надежности технических систем рассмотрено использование генетических алгоритмов в условиях многокритериальности. В работе [15] подход, основанный на экспертных методах, положен в основу автоматизированной системы согласования предположений по графикам ремонтов от сетевых компаний, проводимого СО ЕЭС.

При проведении ремонтов по фактическому состоянию наиболее важным критерием является возможный ущерб при отказе оборудования. В [16] с целью его учета предложена методика организации ремонтов, предусматривающая разработку и анализ дерева отказов системы электроснабжения с учетом технологического оборудования. В [17] предложено для этих целей использовать составной индекс риска. Для формирования заключения применена система нечеткого вывода Мамдани. Методика планирования оптимального складского резерва силовых трансформаторов 230–500 кВ с учетом риска повреждения работающих трансформаторов предложена в [18]. Подход к оценке планируемых ремонтных схем с учетом риска отказов в сочетании с экономичностью сети рассмотрен в [19]. Авторы предлагают рассматривать систему сценариев отказов, оценивая количественно риск по величине CVaR (условная величина риска). Подобная методика, но ориентированная в первую очередь на развитие электрических сетей сельскохозяйственных районов, изложена в [20]. При этом авторы предлагают минимизировать не ущерб от ограничений, а саму величину ограничений. Экспертная система на основе нечетко-темпоральных лингвистических высказываний, позволяющая повысить эффективность оценки риска отказов в системе электроснабжения, предложена в [21].

Таким образом, большая часть исследований направлена на оценку текущих ремонтных заявок, разработку планов ремонта, совершенствование текущей диагностики электроустановок и не затрагивает вопросы оперативной корректировки ремонтного графика по фактическому состоянию оборудования.

ВЫБОР ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ И КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Выбор критериев оптимальности в рамках одной системы ремонтов целесообразнее всего осуществить с точки зрения надежности электроснабжения потребителей, так как очередность вывода в ремонт отдельных единиц оборудования сказывается на изменении схемы электроснабжения потребителей, а значит, и на структурной и функциональной надежности электрических сетей. Далее будем называть это системной надежностью электрических сетей. С этой точки зрения в качестве основного критерия оптимальности следует принять минимальное время простоя оборудования:

$$F = \min \sum_{i=1}^n T_{\text{рем},i} , \quad (1)$$

где $T_{\text{рем},i}$ – время вывода в ремонт i -й единицы оборудования; n – количество единиц оборудования.

Здесь под временем вывода в ремонт i -й единицы оборудования $T_{\text{рем},i}$ понимается не только время, при котором осуществляется ремонт на i -й единице оборудования, но и время, при котором эта единица оборудования находится без напряжения, например для обеспечения безопасности при проведении какой-либо работы на другом оборудовании.

В качестве дополнительных критериев оптимальности примем следующее:

$$N_{\text{рем}}(t) \rightarrow \max , \quad (2)$$

$$T_{\text{пр}}(t) \rightarrow \min , \quad (3)$$

где $N_{\text{рем}}$ – число одновременно выведенных в ремонт единиц оборудования; $T_{\text{пр}}$ – время простоя бригад в течение ремонтного периода.

Критерий (2) относится к участкам сети с последовательно соединенным оборудованием, поскольку при этом увеличение количества выведенного в ремонт оборудования снижает период времени, в течение которого надежность электроснабжения потребителей снижается.

СТРУКТУРА АЛГОРИТМА ПЛАНИРОВАНИЯ

Блок-схема алгоритма разработки оптимального графика ремонтов показана на **рис. 1**. Подготовительная часть алгоритма включает в себя формирование списка работ на текущий год и определение необходимого количества рабочих смен. Выявляются интервалы времени, на протяжении которых вывод в ремонт запрещен. На этом же этапе выполняется ранжирование работ по степени их важности.

Второй этап – составление первоначального графика с учетом принятых критериев оптимальности. В качестве основного интервала принимается рабочая неделя; принимается также, что одна бригада в течение смены может быть задействована только в одной работе. При формировании списка работ на первую неделю должно обеспечиваться максимальное его заполнение работами, имеющими самый высокий ранг (количество рангов принимается равным четырем, согласно опыту эксплуатации). При этом число совпадений ремонтной схемы электрической сети для различных работ должно быть наибольшим.

Произвольным образом выбирается первая бригада, для нее выбирается первая работа по уровню важности, требующая наибольшее количество рабочих смен. Для других бригад проверяется, могут ли работы, принятые для них, выполняться одновременно с работой первой бригады, при несоблюдении этого условия работы переходят в список работ, выполняемых на последующих неделях. Взамен перенесенных рассматриваются работы, следующие по рангу.

Далее аналогичным образом рассматривается следующая бригада, для нее также выбирается одна работа. В результате рассмотрения всех бригад каждая из них будет иметь хотя бы одну работу. В результате может быть намечено несколько вариантов графиков, оптимальных по различным критериям. Предлагается принимать к дальнейшему рассмотрению два типа сочетаний работ:

1) вариант с максимальным числом наиболее ответственных работ для бригад;

2) вариант с максимальным числом совпадений по положениям коммутационных аппаратов.

Перечень работ второй и последующих недель формируется несколько иным путем. Рассматривается сочетание работ первого типа. Из списка работ для второй недели исключаются работы, задействованные на первой неделе, а также работы, которые недопустимо выполнять на второй неделе. Сочетания формируются аналогично первой неделе, кроме работ, продолжающихся после первой недели. Такие работы фиксируются за второй неделей, кроме случаев, когда такая работа может быть поделена на периоды. Затем аналогично первой неделе выбирается два варианта перечней работ, указанных выше двух типов, после чего происходит переход к следующей неделе.

Для каждой недели в результате получается четыре сочетания работ, из которых для дальнейшего рассмотрения принимается два. Процедура ветвления показана на рис. 2.



Рис. 1. Упрощенная блок-схема алгоритма планирования оптимального графика проведения ремонтов

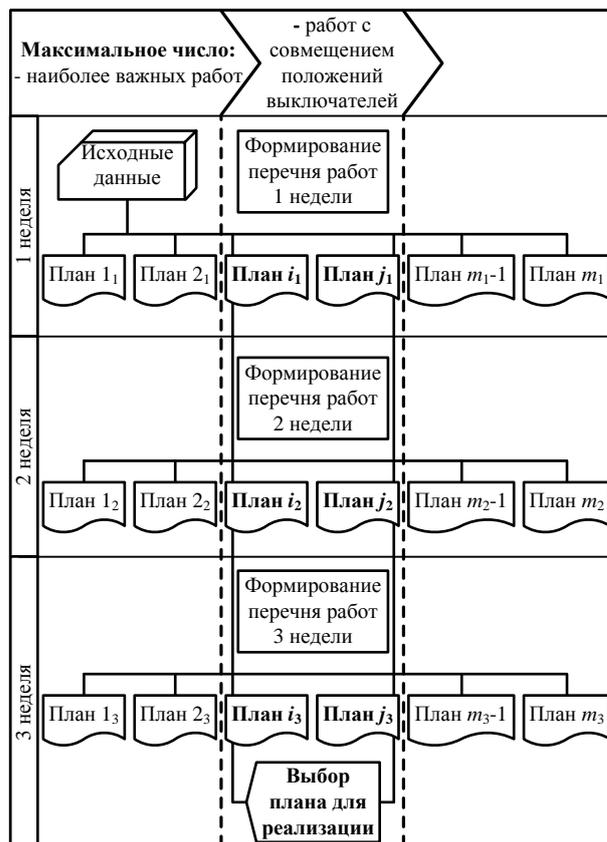


Рис. 2. Процедура ветвления при выборе вариантов для рассматриваемой недели ремонтного графика

Принятый вариант согласовывается с техническими службами предприятия электрических сетей, с главным инженером предприятия, с вышестоящими органами управления деятельностью предприятий электрических сетей. В дальнейшем график корректируется при возникновении внеплановых (аварийных) работ.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ

При разработке графика требуется ряд специфических сведений об оборудовании, среди которых можно выделить следующие:

- 1) основная бригада, за которой закреплено данное оборудование;
- 2) резервная бригада, которая может выполнить ремонт данной единицы оборудования взамен основной. Бригада может быть резервной только на тех единицах оборудования, которые по характеристике идентичны оборудованию, обслуживаемому регулярно данной бригадой. Это исключает возможность появления в ремонте бригада, не имеющая опыта эксплуатации конкретных видов оборудования;
- 3) число аварийных отключений оборудования;
- 4) для коммутационных аппаратов – число оперативных коммутаций;
- 5) длительность эксплуатации;
- 6) коэффициент износа оборудования;
- 7) перечень работ текущего ремонтного периода с учетом либо без учета цикличности (в зависимости от вида оборудования);
- 8) ранг работы – категория срочности планируемой работы (от 1 до 4);
- 9) ограничения, накладываемые на время выполнения тех или иных работ (например, запрет на вывод

в ремонт тупиковых единиц оборудования в зимнее время или запрет на выполнение работ на воздушных линиях электропередачи, проходящих по территории засеиваемых земельных участков в летнее время).

Следует отметить, что при существующей организации ремонтных работ конкретное оборудование закрепляется за какой-либо одной бригадой. Недостатком такой организации работы является тот факт, что при планировании ремонтной деятельности, как правило, не учитывается возможность привлечения той или иной бригады к ремонту схожего по структуре оборудования соседнего участка. Отсутствие возможности проведения одной бригадой ремонта оборудования соседнего участка при планировании ремонтной деятельности приводит к увеличению времени ремонта того или иного участка сети, то есть к увеличению перерыва электроснабжения потребителей. Покажем проявление данного недостатка на примере.

На рис. 3 представлен некоторый участок сети. Ремонт ЛЭП-1 и ТП-1, запитанных от подстанции 1, осуществляется первой бригадой. Ремонт ЛЭП-2, ЛЭП-3, ТП-2 и ТП-3, запитанных от подстанции 2, осуществляется второй бригадой.

Допустим, в текущем ремонтном периоде первая бригада в течение одной рабочей смены должна выполнить ремонт ЛЭП-1 и в течение одной рабочей смены ремонт ТП-1, а вторая бригада в течение одной рабочей смены должна выполнить ремонт ЛЭП-2 и в течение одной рабочей смены ремонт ТП-3. Если первая бригада поочередно будет выполнять ремонт ЛЭП-1 и ТП-1, то потребители, запитанные от подстанции 1, будут обесточены дважды. Однако если во время работы первой бригады на ЛЭП-1 или на ТП-1 будет задействована также вторая бригада для осуществления второго ремонта на ЛЭП-1 или на ТП-1, то потребители окажутся без питания только в течение одной рабочей смены. После этого первая бригада может быть задействована в работе на оборудовании второй бригады ЛЭП-2 или ТП-3. Таким образом, за счет привлечения к ремонту оборудования, расположенного на одном участке, бригад соседних участков возможно сокращение времени перерыва электроснабжения потребителей при ремонте.

Целесообразность привлечения смежных бригад к ремонту оборудования других участков определяется категоричностью потребителей, климатическими условиями, загрузкой ремонтного персонала, а также структурой электрической сети. Кроме того, следует осуществлять экономическую оценку эффективности привлечения той или иной бригады к работе на оборудовании, не входящем в зону обслуживания бригады.

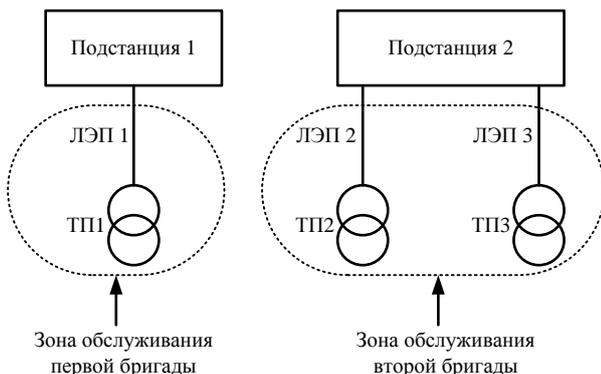


Рис. 3. Поясняющая схема к примеру работы бригады на соседнем участке сети

Поскольку при разработке оптимального графика возможно смещение межремонтных периодов в меньшую сторону для совмещения некоторых работ, необходимо исключать такие смещения для единиц оборудования с меньшим числом аварийных отключений. Это необходимо для того, чтобы избежать излишней частоты вывода в ремонт исправного оборудования. Необходимость ограничения сдвигов цикличности выполняемых работ также обусловлена требованиями Системного оператора ЕЭС.

Одним из способов учета параметра аварийности в алгоритме оптимизации является введение весовых коэффициентов. Из всего массива данных для каждой бригады выбираются единицы оборудования, которые имеют хотя бы один межремонтный интервал и минимальное число аварийных отключений (по опыту эксплуатации менее трех отключений в год). Также выделяется оборудование, обеспечивающее межсистемные перетоки. Для таких единиц вводятся весовые коэффициенты на смещение межремонтных циклов.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫВОДА В РЕМОНТ РАЗЛИЧНЫХ ЕДИНИЦ ОБОРУДОВАНИЯ

С целью минимизации времени простоя оборудования в структуру расчета ремонтных графиков включается условие совмещения работ на элементах сети, соединенных последовательно. При этом техническое обслуживание и ремонт нескольких соединенных последовательно элементов должны осуществляться различными бригадами. Практически такое возможно, когда работы на выведенной в ремонт линии электропередачи совмещены с работами бригад, обслуживающих смежные с данной линией подстанции и электростанции. При этом необходимо учитывать конфигурацию сети.

Для проверки возможности совмещения ремонтных работ предусматривается формирование таблицы, столбцы которой соответствуют коммутационным аппаратам, задействованным в оперативных переключениях при подготовке к ремонту, а строки – выводимым в ремонт единицам оборудования.

В каждой графе таблицы может присутствовать одно из трех значений:

«1» – если коммутационный аппарат для данной единицы оборудования обязательно включен при ремонте (например, с целью обеспечения питания потребителей или обеспечения выдачи мощности электростанцией);

«-1» – если коммутационный аппарат для данного оборудования при ремонте обязательно отключен;

«0» – если положение коммутационного аппарата в данном случае не имеет значения.

Рассмотрим порядок заполнения такой таблицы на примере. Схема показана на рис. 4.

Пусть имеется сеть с двухцепной питающей линией (ВЛ-1 и ВЛ-2), двухцепной транзитной линией (ВЛ-3 и ВЛ-4), две подстанции с трехобмоточными трансформаторами Т-1 и Т-2, РУ среднего напряжения которых связаны одноцепной линией ВЛ-5, выключателями Q1–Q14. С шин среднего и низшего напряжения обеих подстанций питаются потребители. Будем считать, что в текущем периоде запланирован ремонт ВЛ-1; Т-1; РУ-110 кВ ПС-2.

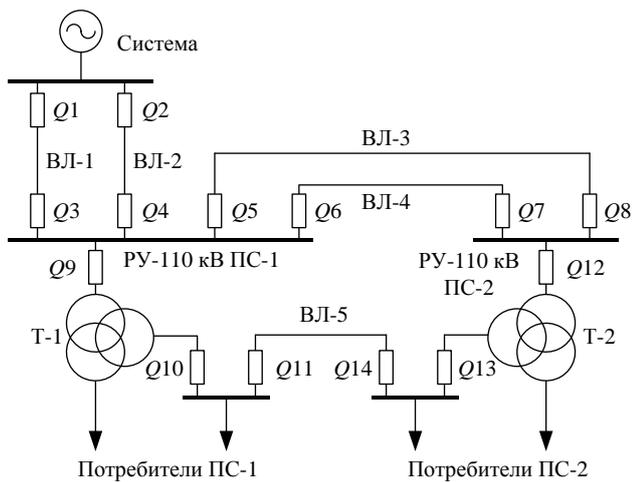


Рис. 4. Поясняющая схема к примеру работы бригады на соседнем участке сети

При выводе в ремонт ВЛ-1 обязательным является включенное положение Q2 и Q4 и отключенное положение Q1 и Q3. Положения остальных выключателей не определяются однозначно и могут строго задаваться при наложении ремонтных (или ремонтного и послеаварийного) режимов, например совмещение планового ремонта ВЛ-1 с неотложным ремонтом Т-2.

При выводе в ремонт Т-1 должны быть отключены выключатели в цепи трансформатора – Q9 и Q10. Для обеспечения питания потребителей на среднем напряжении должны быть включены выключатели Q12, Q13, Q14 и Q11. Питание потребителей ПС-1 на низшем напряжении должно обеспечиваться за счет резерва по сети, на рис. 4 не показано.

Наконец, ремонт РУ-110 кВ ПС-2 сопровождается отключением Q5, Q6, Q7, Q8, Q12. Для обеспечения питания потребителей обеих подстанций через Т-1 должны быть включены Q9, Q10, Q11, Q14, Q13 (если трансформатор Т-2 остается в работе с обмоткой 110 кВ на холостом ходу).

Проверка совместимости для этого случая сведена в таблице.

Проверка совместимости ремонтов

Ед. оборуд. Выкл.	ВЛ-1	Т-1	РУ-110 кВ ПС-2
Q1	-1	0	0
Q2	+1	0	0
Q3	-1	0	0
Q4	+1	0	0
Q5	0	0	-1
Q6	0	0	-1
Q7	0	0	-1
Q8	0	0	-1
Q9	0	-1	+1
Q10	0	-1	+1
Q11	0	+1	+1
Q12	0	+1	-1
Q13	0	+1	+1
Q14	0	+1	+1

Очевидно, что одновременный вывод в ремонт единиц оборудования, имеющих для одного и того же коммутационного аппарата в таблице совместимости ремонтов значения «1» и «-1», невозможен, так как в случае одновременного проведения работ на таких единицах оборудования произойдет перерыв в электроснабжении потребителя. Если в таблице проверки совместимости ремонтов для разных единиц оборудования хотя бы для одного коммутационного аппарата имеются одновременно значения «-1» и «0», «1» и «0», либо «0» и «0», то такие единицы оборудования совместно выводить в ремонт допустимо, так как нет однозначного противоречия относительно положения коммутационного аппарата.

Из таблицы следует, что нельзя выводить в ремонт одновременно Т-1 и РУ-110 кВ ПС-2, однако возможен одновременный ремонт ВЛ-1 и Т-1 или ВЛ-1 и РУ-110 кВ ПС-2.

Выбор конкретного варианта возможен одним из двух способов, определяемых пользователем:

1) наибольшая близость по времени трудоемкости работ для выводимых одновременно в ремонт единиц оборудования, что позволяет обеспечить равномерную загрузку персонала;

2) совместный вывод в ремонт единиц оборудования, имеющих наибольший период эксплуатации либо наихудшие статистические показатели надежности, что позволяет повысить надежность участка электрической сети в более короткие сроки.

Таблица подлежит коррекции только при изменении схемы электрической сети и не зависит от ее нормального оперативного состояния.

ПРОВЕРКА ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ОБЪЕМА РАБОТ ПО ОПТИМАЛЬНОМУ ГРАФИКУ

При планировании ремонтов учитывается количество рабочих смен для выполнения предстоящей ремонтной программы. При подсчете количества рабочих смен из общего числа дней исключается прогнозируемое количество выходных и праздничных дней, а также, при необходимости, часть рабочих смен для различных бригад фиксируется как резервная, для возможного выполнения внеплановых (аварийных) работ.

Для каждой бригады по разработанному графику определяются следующие характеристики:

- 1) количество требуемых смен по техническому обслуживанию (ТО);
- 2) стоимость материалов для ТО;
- 3) количество требуемых смен для проведения капитальных ремонтов (КР);
- 4) стоимость материалов для КР;
- 5) общее количество смен (сумма п. 1 и п. 3);
- 6) общая стоимость материалов (сумма п. 2 и п. 4);
- 7) лимит по количеству рабочих смен;
- 8) лимит по количеству рабочих смен за вычетом резервных;
- 9) лимит затрат на материалы.

Оптимальный график должен быть составлен таким образом, чтобы количество требуемых для выполнения ремонтной программы рабочих смен (п. 5) не превышало количество рабочих смен в году с учетом смен, отведенных для внеплановых работ (п. 8). Если превышение смен незначительное (допустимое

превышение определяется экспертным путем), тогда допускается уменьшение числа смен, отведенных для внеплановых работ. Вместе с этим осуществляется сравнение ориентировочной стоимости необходимых для ремонта материалов с отведенным для закупки материалов бюджетом предприятия электрических сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к формированию графиков ремонта электросетевого оборудования отличается от принятого на настоящий момент возможностью коррекции в течение ремонтного периода, что является крайне важным при внедрении организации ремонтов по фактическому состоянию. Задействование в работах смежных бригад позволит обеспечить более равномерное использование трудовых ресурсов во времени. Совмещение ремонтов на нескольких единицах оборудования при условии сохранения надежности электрооборудования даст возможность снизить вероятный ущерб при отказе работающего оборудования во время выполнения ремонтных работ как для потребителей, так и для сетевой компании.

Результаты исследования могут быть использованы при планировании ремонтных работ службами линий и подстанций производственных отделений сетевых компаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров О.И. Дискретизация плана ремонтов основного оборудования в электроэнергетической системе // Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Энергетика. 2017. Т.60. № 4. С. 320–333.
2. Бойцов Ю.А., Васильев А.П. Решение задачи рациональной организации системы оперативного обслуживания электрических сетей // Известия вузов. Проблемы энергетика. 2008. №1-2. С. 56-63.
3. Васильев А.П., Бандурин И.И. Математические модели оптимальной структуры оперативного обслуживания электрических сетей // Вестник ИГЭУ. 2010. Вып. 2. С. 47-52.
4. Николаев Ан.А., Храмшина Е.А., Николаев Ар.А. Локализация неисправностей трансформатора средствами акустической локации частичных разрядов // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №1(38). С. 48-54.
5. Назарычев А.Н., Жулина Т.А. Ремонтпригодность оборудования станций и подстанций // Вестник ИГЭУ. 2009. Вып. 2. С. 91-96.
6. Назарычев А.Н. Основные принципы и критерии управления техническим состоянием электрооборудования // Вестник ИГЭУ. 2006. Вып. 2. С. 67-71.
7. Головинский И.А. Методы анализа топологии коммутационных схем электрических сетей // Электричество. 2005. №3. С. 10-18.
8. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Метод и алгоритм сравнения эмпирических характеристик относительной длительности нерабочих состояний оборудования энергосистем // Электричество. 2010. №6. С. 10-15.
9. Шубович А.А., Бочаров М.Е., Михалёв В.С. Использование показателей отказов электрооборудования для планирования ремонтов в электрических сетях // Энергетик. 2017. №2. С. 20-22.
10. Принцип формирования оценки технического состояния электрооборудования на подстанциях / А.И. Хальясмаа, С.А. Дмитриев, С.Е. Кокин, Д.А. Глушков, М.В. Осотова // Электричество. 2014. №10. С. 22-27.
11. Скоробогатченко Д.А. О необходимости информационной системы принятия решений при управлении ремонтами электрических сетей // Энергетик. 2017. №4. С. 52-54.
12. Хальясмаа А.И., Сенюк М.Д., Ерошенко С.А. Ключевые проблемы в задачах интеллектуального распознавания образов состояния силовых выключателей // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. №5(50). С. 103-107.
13. Огурцов А.Н., Староверова Н.А. Алгоритм повышения согласованности экспертных оценок в методе анализа иерархий // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 5. С. 81-84.
14. Тарутин А.В., Набатов А.В. Применение методов генетических алгоритмов для построения множества Парето в задачах многокритериальной оптимизации // Инженерный вестник Дона. 2015. №4. ivdon.ru/magazine/archive/n4y2015/3359
15. Принципы построения автоматизированной системы годового планирования ремонтов электросетевого оборудования / Ю.С. Авагимова, В.А. Дьячков, Ю.Я. Любарский, Е.В. Рубцова // Электричество. 2009. №3. С. 10-19.
16. Определение риска возникновения ущерба при отказе электрооборудования подстанций / А.В. Рассказчиков, А.А. Шульпин, П.А. Шомов, С.М. Кулагин, В.В. Гоголюк, Б.Л. Житомирский // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 1. С. 19-24.
17. Vianna E.A.L., Abaide A.R., Canha L.N., Miranda V. Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based onequipment condition // Electric Power System Research. 2017. Vol. 142. P. 36-46.
18. Enders J., Powell W.B., Egan D. A dynamic model for the failure replacement of aging high-voltage transformers // Energy Systems. 2010. Vol. 1. P. 31-59.
19. Shirokikh O., Sorokin A., Boginski V. A note on transmission switching in electric grids with uncertain line failures // Energy Systems. 2013. Vol. 4. P. 419-430.
20. Levin T., Thomas V.M. Modeling the impact of stochastic outages for electricity infrastructure development // Energy Systems. 2014. Vol. 5. P. 519-550.
21. Никольский О.К., Качесова Л.Ю., Шаныгин И.А. Математическая модель оценки и управления рисками аварий в системах электроснабжения // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2018. №10. С. 72-77.

Поступила в редакцию 09 января 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF OPTIMUM REPAIR SCHEDULE OF ELECTRICAL NETWORK EQUIPMENT TO IMPROVE THE RELIABILITY OF ITS FUNCTIONING

Sergey V. Belyaev

Chief specialist, Internal Audit Department, OJSC "Interregional Distributive Grid Company of Urals", Ekaterinburg, Russia. E-mail: belyaev-sv@mrsk-ural.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0011-4369>

Aleksey V. Malafeev

Ph.D. (Engineering), Associate professor, Industrial Electric Power Supply Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: malapheev_av@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1471-9764>

Evgeniy Ya. Omelchenko

D.Sc. (Engineering), Professor, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: momentum2@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0547-485X>

To ensure uninterrupted power supply to consumers, maintenance of the electrical networks in a working condition is today carried out through the use of a system of preventive maintenance. In the general case such a system allows building equipment repair schedules based on repair cycles for a long time predetermining the list of necessary material and labor resources in advance. However, in practice, the use of this system is rather difficult and not always effective. This is due to the need to change the repair schedule for emergency or urgent repairs taking into account the seasonality of work performed and the organizational structure of the production department of electrical networks and related departments as well as taking into account the specific features of the operation of specific equipment. Taking into account the current pace of development of electrical networks with a steady increase in the number of consumers (which also leads to a complication of the configuration of electrical networks) this is impossible without the use of appropriate mathematics and software that automates the planning processes for the maintenance and repair of electrical networks with a large number of factors. The minimum equipment downtime was taken as the main criterion for optimality, as a factor that largely determines the reliability of power supply. A planning algorithm has been developed that takes into account the ranking of works in order of importance, the possibility of their shift in time and the likely adjustment of the schedule based on the results of assessing the technical condition of the equipment. A method for minimizing the downtime of repair crews by using them in adjacent areas as well as a technique for identifying a set of equipment that may be under repair in the same period of time are proposed.

Keywords: repair schedule, reliability of power supply, downtime, rank of work, back-up team, compatibility of repairs, shift in work, actual equipment condition, unscheduled work, schedule adjustment.

REFERENCES

1. Aleksandrov O.I. Discretization of the main equipment repair plan in the electric power system. *Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy i energ. obyedineniy SNG. Energetika*. [Power engineering. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations]. 2017, vol.60, no. 4, pp. 320–333. (In Russian)
2. Boytsov Yu.A., Vasilyev A.P. Solution of the problem of rational organization of the system of operational maintenance of electrical networks. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki* [Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems]. 2008, no. 1-2, pp. 56-63. (In Russian)
3. Vasilyev A.P., Bandurin I.I. Mathematical models of the optimal structure of operational maintenance of electrical networks. *Vestnik IGEU* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University]. 2010, iss. 2, pp. 47-52. (In Russian)
4. Nikolayev An.A., Khrumshina E.A., Nikolayev Ar.A. Localization of transformer faults by means of acoustic location of partial discharges. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2018, no. 1(38), pp. 48-54. (In Russian)
5. Nazarychev A.N., Zhulina T.A. Maintainability of station equipment and substations // *Vestnik IGEU* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University]. 2009, iss. 2, pp. 91-96. (In Russian)
6. Nazarychev A.N. Basic principles and criteria for managing the technical condition of electrical equipment. *Vestnik IGEU* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University]. 2006, iss. 2, pp. 67-71. (In Russian)
7. Golovinskiy I.A. Methods for analyzing the topology of switching circuits of electrical networks. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2005, no. 3, pp. 10-18. (In Russian)
8. Farkhadzade E.M., Muradaliyev A.Z., Farzaliyev Yu.Z. Method and algorithm for comparing the empirical characteristics of the relative duration of non-operating states of equipment of power systems. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2010, no. 6, pp. 10-15. (In Russian)
9. Shubovich A.A., Bocharov M.E., Mikhalyov V.S. The use of electrical equipment failure rates to plan repairs in electrical networks. *Energetik* [Power engineer]. 2017, no. 2, pp. 20-22. (In Russian)
10. Khal'yasmaa A.I., Dmitriyev S.A., Kokin S.E., Glushkov D.A., Osotova M.V. The principle of forming the assessment of the technical condition of electrical equipment at substations. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2014, no. 10, pp. 22-27. (In Russian)
11. Skorobogatchenko D.A. On the need for a decision-making information system in the management of electrical network repairs. *Energetik* [Power engineer]. 2017, no. 4, pp. 52-54. (In Russian)
12. Khal'yasmaa A.I., Senyuk M.D., Eroshenko S.A. Key problems in the tasks of intellectual recognition of the state of power circuit breakers. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye* [Electric power. Transmission and distribution]. 2018, no. 5(50), pp. 103-107. (In Russian)
13. Ogurtsov A.N., Staroverova N.A. Algorithm to improve the consistency of expert assessments in the hierarchy analysis method. *Vestnik IGEU* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University]. 2013, iss. 5, pp. 81-84. (In Russian)
14. Tarutin A.V., Nabatov A.V. Application of methods of genetic algorithms for the construction of the Pareto set in problems of multi-criteria optimization. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don]. 2015, no. 4, ivdon.ru/magazine/archive/n4y2015/3359
15. Avagimova YU.S., Dyachkov V.A., Lyubarskiy YU.YA., Rubtsova E.V. Principles of developing an automated system for annual planning of repairs of power grid equipment. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2009, no. 3, pp. 10-19. (In Russian)
16. Rasskazchikov A.V., Shulpin A.A., Shomov P.A., Kulagin S.M., Gogolyuk V.V., Zhitomirskiy B.L. Determination of the risk of damage in case of failure of electrical substation. *Vestnik IGEU* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University]. 2013, iss. 1. pp. 19-24. (In Russian)
17. Vianna E.A.L., Abaide A.R., Canha L.N., Miranda V. Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based onequipment condition. *Electric Power System Research*. 2017, vol. 142, pp. 36-46.

18. Enders J., Powell W.B., Egan D. A dynamic model for the failure replacement of aging high-voltage transformers. *Energy Systems*. 2010, vol. 1, pp. 31-59.
19. Shirokikh O., Sorokin A., Boginski V. A note on transmission switching in electric grids with uncertain line failures. *Energy Systems*. 2013, vol. 4, pp. 419-430.
20. Levin T., Thomas V.M. Modeling the impact of stochastic outages for electricity infrastructure development. *Energy Systems*. 2014, vol. 5, pp. 519-550.
21. Nikol'skiy O.K., Kachesova L.Yu., Shanygin I.A. Mathematical model for assessing and managing the risks of accidents in power supply systems. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: operation and repair]. 2018, no. 10, pp. 72-77. (In Russian)

Беляев С.В., Малафеев А.В., Омельченко Е.Я. Разработка оптимальных графиков ремонта оборудования электрических сетей с целью повышения надежности их функционирования // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 2(43). С. 4-11. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-4-11)

Belyaev S.V., Malafeev A.V., Omelchenko E.Ya. Development of Optimum Repair Schedule of Electrical Network Equipment to Improve the Reliability of its Functioning. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 4-11. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-4-11)

Газизова О.В., Соколов А.П., Патшин Н.Т., Кондрашова Ю.Н.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова



АНАЛИЗ ДОПУСТИМОСТИ РЕЖИМА ПОТЕРИ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Современные условия функционирования крупных промышленных предприятий требуют обеспечения высокой надежности электроснабжения потребителей при снижении себестоимости потребляемой электроэнергии. Эти требования обеспечиваются за счет широкого внедрения собственных источников электрической энергии. К ним относятся теплоэлектроцентрали, газотурбинные, газопоршневые и парогазовые электростанции. В то же время происходит существенное усложнение конфигурации промышленной сети и возможных аварийных режимов. Одним из аварийных режимов в таких сетях является потеря возбуждения синхронного генератора. Допустимость подобного режима оговаривается нормативными документами. В такой ситуации генератор переходит в режим асинхронного хода и потребляет реактивную мощность из сети. Целью данной работы является выявление допустимости работы синхронного генератора определенное время в режиме асинхронного хода в результате потери возбуждения. Разработан алгоритм расчета переходного электромеханического процесса синхронного генератора, учитывающий потерю возбуждения машины. Исследования производятся для различных эксплуатационных режимов промышленной электростанции с учетом исходной загрузки генератора с помощью программного комплекса «КАТРАН». Результаты расчета позволяют определить загрузку генераторов по активной мощности, при которой возможна работа синхронного генератора в режиме асинхронного хода без возбуждения.

Ключевые слова: промышленный синхронный генератор, переходный электромеханический режим, программное обеспечение, автоматический регулятор возбуждения, параллельная работа, раздельная работа, потеря возбуждения, асинхронный ход.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию статической, динамической и результирующей устойчивости синхронных машин посвящено большое число трудов как отечественных [1-5], так и зарубежных [6-16]. В частности, подробно произведен анализ режима трехфазного короткого замыкания и последующего его отключения, а также режимы асинхронного хода и ресинхронизации [1], [3], [6], [15]. Большое количество отечественных трудов посвящено вопросам эксплуатации объектов распределенной генерации [17-19]. В отдельных трудах рассмотрены вопросы передачи электрической энергии в промышленных сетях [20] и их надежности [21].

Асинхронный ход синхронного генератора может протекать в двух видах. Во-первых, асинхронный ход при наличии возбуждения. Такой режим сопровождается существенным изменением напряжения и токов синхронной машины и не является длительно допустимым.

Асинхронный ход генератора при потере возбуждения сопровождается потреблением из сети реактивной мощности и снижением выработки активной мощности в сеть. Допустимость такого режима зависит от типа и системы охлаждения генератора. Так, для турбогенераторов с косвенным охлаждением допускается работа в режиме асинхронного хода до 30 минут [1]. При этом должна быть снижена его вырабатываемая мощность до 50-70 %, а ток статора не должен превышать 110 % от номинального. Турбогенераторы, имеющие непосредственное охлаждение, могут работать в режиме асинхронного хода не до 15 минут при снижении мощности турбины до 40-55 %. При этом напряжение на выводах генератора от энергосистемы

не должно снижаться более чем на 30% от номинального. В противном случае может нарушиться устойчивость работы синхронных машин в данном узле.

Таким образом, возможность работы синхронного генератора в режиме асинхронного хода при потере возбуждения зависит от большого количества факторов, в том числе исходного режима работы и мощности питающей энергосистемы.

Для анализа подобного режима была разработана соответствующая математическая модель, учитывающая затухание магнитного потока в обмотке возбуждения. Модель была учтена в алгоритме расчета переходного электромеханического процесса при параллельной и раздельной работе с энергосистемой.

Разработанный на кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова программный комплекс «КАТРАН» позволяет рассчитывать режимы асинхронного хода и ресинхронизации с учетом потери возбуждения синхронной машины, а также оценивать допустимость подобных режимов.

УЧЕТ ПОТЕРИ ВОЗБУЖДЕНИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОРА

Математическому моделированию синхронных генераторов посвящено большое число трудов [1-6]. В общем случае математическое моделирование синхронных генераторов с целью расчета переходных режимов может производиться тремя способами, в зависимости от поставленной задачи.

Первым способом является непосредственное определение потокосцеплений, то есть прямое решение системы уравнений Парка-Горева во времени. Такой подход в сочетании с методами численного интегрирования дает очень точные результаты, но является весьма трудоемким и слабо применим в чистом виде для расчета режимов сложносвязанных

систем. В основном он применяется для анализа эксплуатационных режимов отдельных машин с учетом подробных характеристик систем автоматического регулирования.

Другой способ используется в расчетах режимов сложных электроэнергетических систем в сочетании с протяженными линиями электропередачи. При этом имеет место использование эквивалентов отдельных электростанций или их групп, что является достаточным для данной задачи. Особое внимание при данном подходе уделяется устойчивости протяженных линий электропередачи.

Третий способ подразумевает представление отдельных генераторов и их регуляторов внешними характеристиками, позволяет определить устойчивость в отдельно взятом узле, например промышленной электростанции. Источники распределенной генерации в таком узле, как правило, разнотипные и имеют определенную электрическую удаленность относительно друг друга. Поскольку развитие промышленной генерации существенно усложняет аварийные и эксплуатационные режимы систем электроснабжения, то такой подход является оправданным.

В данной статье использован последний метод. В этом случае в математической модели генератор представляется не напрямую потокоцеплениями, а переходными (сверхпереходными) ЭДС, пропорциональными соответствующим потокоцеплениям. Для использования подобного подхода сначала рассчитывается установившийся режим [22-24]. Данный подход используется для анализа динамической устойчивости и изложен в трудах [25-30].

Так, поток реакции статора определяется током статора, который может быть получен из расчета переходного режима на каждом шаге переходного процесса и определяет полную ЭДС машины $E_{(n)} = E_{q(n)} + jE_{d(n)}$. Поток обмотки возбуждения определяется вынужденной ЭДС машины $E_{qe(n)}$. Очевидно, что потеря возбуждения синхронного генератора сопровождается постепенным снижением вынужденной ЭДС до нуля. И генератор из синхронного режима переходит в асинхронный.

При длительном переходном процессе сверхпереходными составляющими можно пренебречь, поэтому в расчет режима генератор задается переходными ЭДС $E'_{(n)} = E'_{q(n)} + jE'_{d(n)}$, пропорциональными суммарному потокоцеплению по продольной и поперечной осям соответственно. На каждом шаге расчета учитывается изменение переходных ЭДС с учетом изменения потока реакции статора и обмотки возбуждения.

Одновременно на суммарный магнитный поток начинает оказывать влияние магнитный поток, обусловленный асинхронными мощностями, изменение которых учитывается по продольной и поперечной осям. При этом условно принято, что одна из осей связана с действительной осью, другая – с мнимой.

На **рис. 1** показан алгоритм расчета переходного режима, учитывающий потерю возбуждения синхронного генератора. В нем показано определение начальных значений ЭДС и их изменение во времени.

На **рис. 1** приняты следующие обозначения: ОКЗ – отношение короткого замыкания, о.н.е.; x_d, x'_d, x''_d –

синхронное индуктивное, переходное и сверхпереходное сопротивления, о.н.е.; T'_{d0}, T''_{d0} – постоянные времени синхронной машины при разомкнутой обмотке статора при наличии и отсутствии демпферных контуров, с; T'_d, T''_d – переходная и сверхпереходная постоянные времени синхронной машины при замкнутой обмотке статора, с; T_a – постоянная времени обмотки статора, с; P_Γ, Q_Γ – действительная нагрузка генераторов, о.н.е., $U_{(n)}, I_{(n)}, I_{d(n)}, I_{q(n)}$ – текущие напряжение и ток и его составляющие для обмотки статора; $\varphi_{(n)}, \delta_{(n)}$ – углы нагрузки и ротора, о.н.е.

В соответствии с уровнем напряжения на выводах обмотки статора определяется асинхронная активная $P_{Ac(n)}$ и реактивная $Q_{Ac(n)}$ мощности и приращение активной $\Delta E'_{ac(n)}$ и реактивной $\Delta E''_{ac(n)}$ составляющей переходной ЭДС на каждом интервале расчета с учетом того, что действительные и мнимые составляющие переходной ЭДС равны переходным ЭДС по продольной и поперечной оси соответственно, а система осей d и q связана с полем статора, а не ротора. Асинхронная мощность, в свою очередь, делится на мощность намагничивания и рассеяния $Q_{\mu(n)}, Q_{pac(n)}$, которые определяются скольжением s .

После определения нового значения переходной ЭДС определяется в соответствии с численным решением уравнения движения ротора новое значение угла ротора, и с новыми параметрами рассчитывается новый режим. Разработанный алгоритм может быть использован для методов численного интегрирования. В данном случае расчет ведется сочетанием методов последовательного эквивалентирования для расчета установившихся режимов и методом последовательных интервалов для расчета переходного электромеханического процесса.

РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «КАТРАН»

Расчет режимов осуществлялся с помощью программного комплекса «КАТРАН», разработанного на кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова. В качестве примера взята промышленная тепловая электростанция (ТЭЦ), схема электрических соединений которой представлена на **рис. 2**.

В случае потери возбуждения генератор из перевозбужденного состояния переходит в недовозбужденное и, как видно из **таблицы**, начинает потреблять реактивную мощность из сети, что объясняется возникновением асинхронного режима работы синхронного генератора. В таком режиме работы, как показано на **рис. 3**, у генератора Г-8, потерявшего возбуждение, значительно увеличивается угол нагрузки по отношению к другим генераторам, не потерявшим возбуждение. При этом значения переходной ЭДС и переходной ЭДС в поперечной оси стремятся к нулю.

При проведении исследований выполняется расчет режима при параллельной работе с энергосистемой и выбирается генератор, у которого произошла потеря возбуждения. Далее выполняется расчет во временном цикле 10 с и снимаются основные показания аварийного режима. Аналогичные расчеты повторяются для всех генераторов выбранной электростанции.

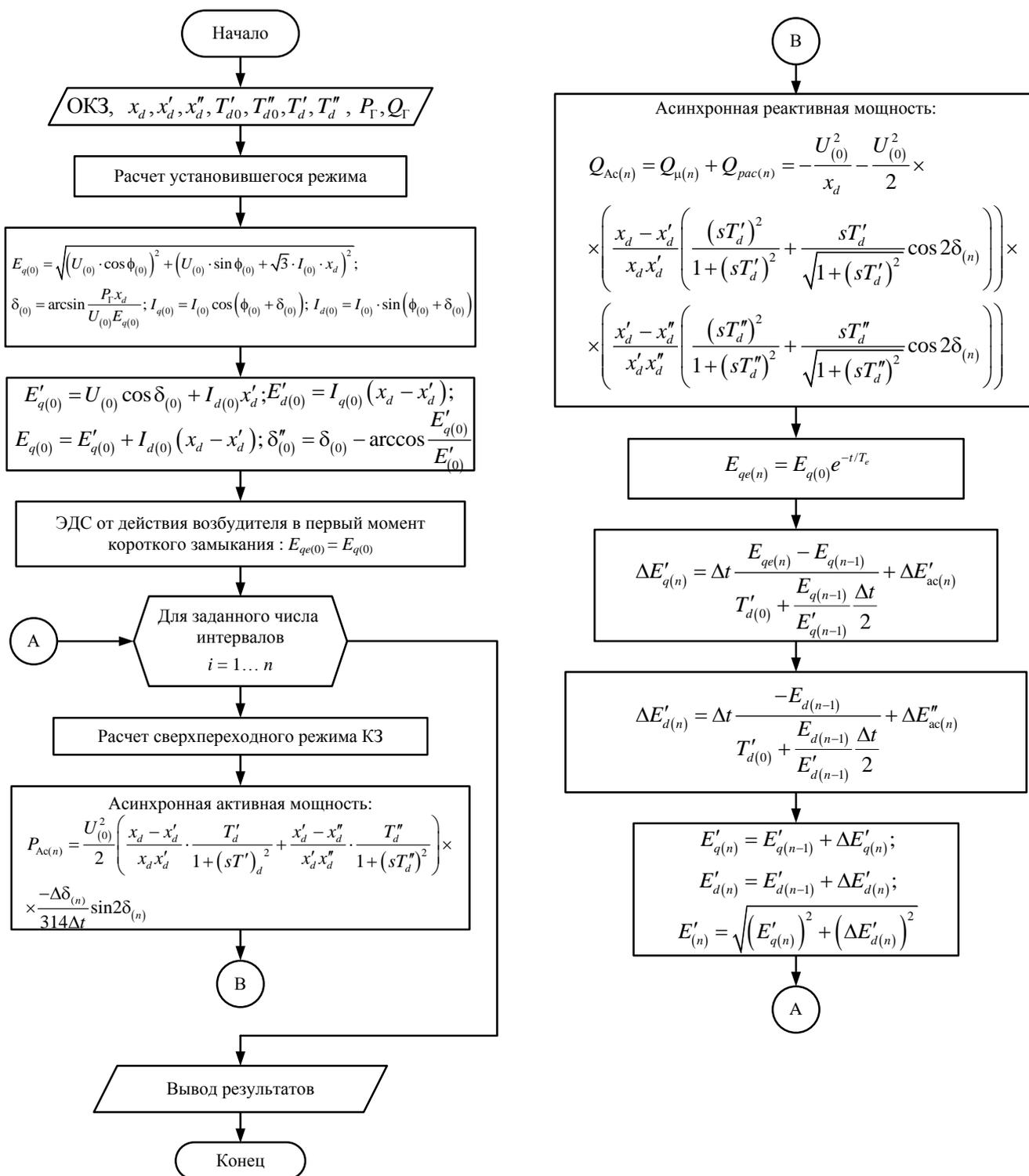


Рис. 1. Алгоритм расчета параметров генератора

В таблице расчетная мощность принимается равной номинальной мощности генератора. По рассчитанному доаварийному установившемуся режиму определялись значения напряжения, а также действительные значения активной и реактивной мощности.

Аварийный ток $I_{п.авар}$, послеаварийное напряжение $U_{п.авар}$, послеаварийные активная $P_{п.авар}$ и реактивная мощности $Q_{п.авар}$ определяются в ходе расчета переходного режима при потере возбуждения одного из генераторов. По полученным токам определяется, на сколько возрос послеаварийный ток по отношению к номинальному току.

Для уменьшения процента перегрузки снижалась

выдаваемая активная мощность генератора, который вышел из синхронизма, и определялось рекомендуемое значение активной мощности в послеаварийном режиме, обеспечивающей значение послеаварийного тока с допустимым процентом перегрузки.

Проведенные расчеты позволяют судить о работе синхронного генератора в режиме асинхронного хода при потере возбуждения. Поскольку в подобном режиме машина потребляет асинхронную реактивную мощность и вырабатывает активную, то имеется возможность регулирования только активной мощности посредством регулятора скорости с целью обеспечения допустимого тока обмотки статора генератора.

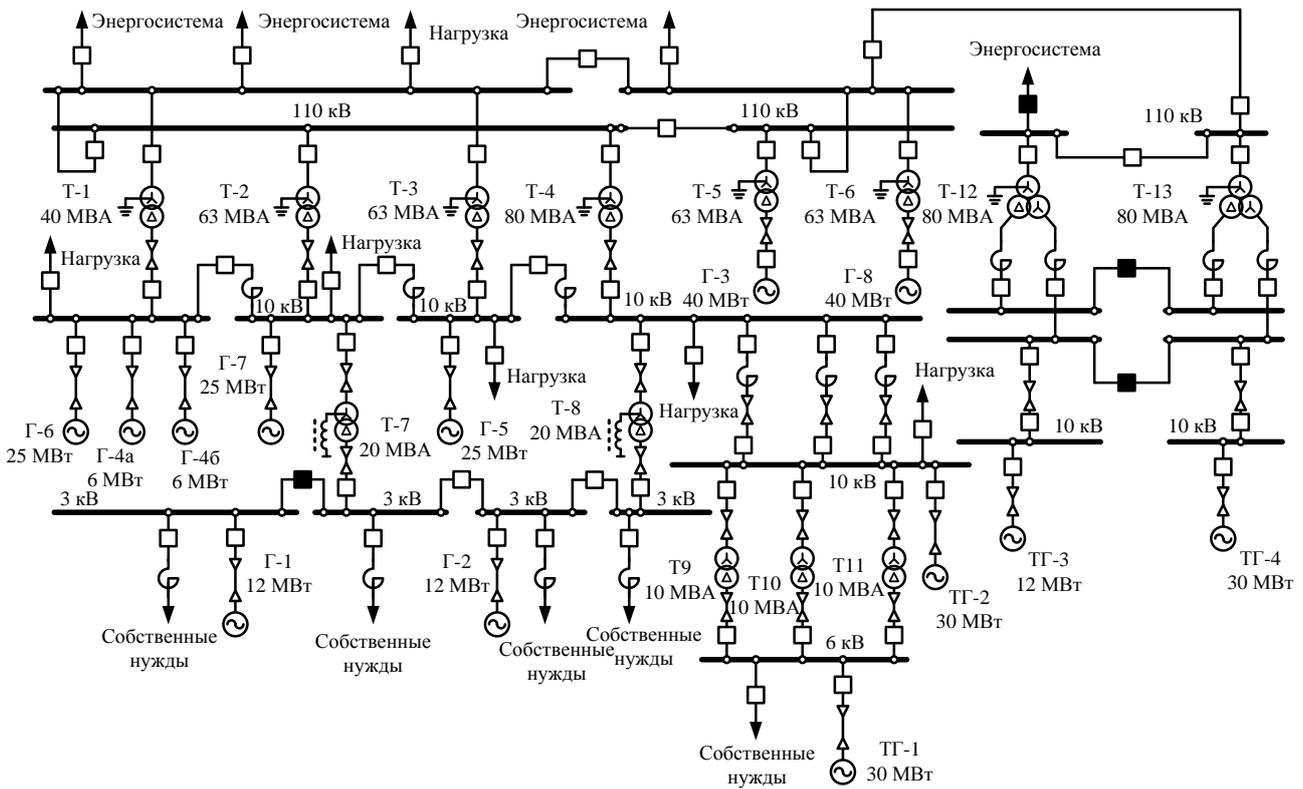


Рис. 2. Схема электрических соединений промышленной электростанции

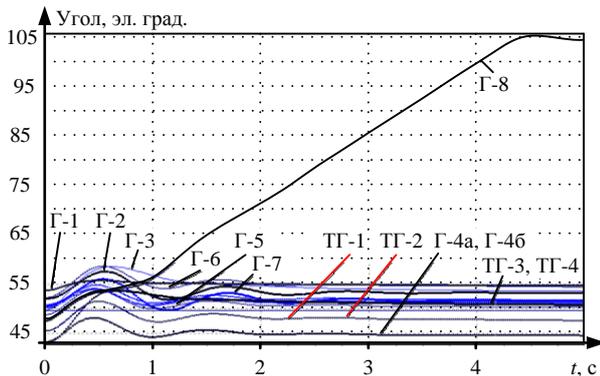


Рис. 3. Изменение собственного угла ротора генератора Г-8 при потере возбуждения по отношению к углам роторов других генераторов схемы

Основные параметры генераторов в до- и послеаварийном режимах на примере промышленной ТЭЦ

Номер генератора	до аварии				после аварии				до аварии				после аварии			
	$I_{\text{ном}}$	$P_{\text{ном}}$	$I_{\text{п.авар}}$	перегрузка, %	$U_{\text{доавар}}$	$U_{\text{п.авар}}$	$P_{\text{дейст}}$	$Q_{\text{дейст}}$	$P_{\text{п.авар}}$	$Q_{\text{п.авар}}$	$P_{\text{рек}}$	$Q_{\text{рек}}$	$P_{\text{рек}}$	$Q_{\text{рек}}$		
Г-8	2,8	40	3,2	15	10,3	9,4	42	10	42	30	34	25	2,6			
Г-3	2,8	40	3,0	10	10,6	9,8	41	15	41	31	35	28	2,6			
Г-6	1,7	25	2,0	16	10,1	10,1	27	8	27	22	22	19	1,7			
Г-4а	0,4	6	0,4	0	10,6	10,5	5,7	2	6	5	-	-	-			
Г-4б	0,4	6	0,4	0	10,6	10,5	5,6	2	6	5	-	-	-			
Г-7	1,7	25	2,1	21	10,5	10,1	29	8	29	23	25	20	1,8			
Г-5	1,7	25	2,1	19	10,4	10,0	28	8	28	22	23	19	1,7			
Г-1	2,4	12	2,9	20	3,12	2,88	12	4	12	8	10	7	2,5			
Г-2	2,4	12	3,0	26	3,07	2,82	12	4	12	8	10	7	2,5			
ТГ-1	3,4	30	4,0	17	6,79	5,52	31	10	31	23	28	20	3,5			
ТГ-2	2,1	3,0	1,6	-25	10,6	10	22	8	22	16	-	-	-			
ТГ-3	0,8	12	0,8	0	10,6	10,3	12	4	12	8	-	-	-			
ТГ-4	2,1	30	2,2	6	10,6	10	32	10	32	20	32	20	2,2			

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен режим асинхронного хода при потере возбуждения синхронного генератора в условиях промышленной электростанции при параллельной работе с энергосистемой.

Разработана математическая модель синхронного генератора, учитывающая изменение переходных ЭДС машины при потере возбуждения. Данная модель может быть применима для расчета переходных режимов методами численного интегрирования. Модель учтена при разработке алгоритма расчета переходного электромеханического режима, положенного в основу программного комплекса «КАТРАН». Расчеты режимов с помощью указанного комплекса велись применительно к промышленной электростанции с турбогенераторами различной мощности.

Расчеты показали, что для обеспечения работы в режиме асинхронного хода без возбуждения необходимо снизить выдаваемую генераторами активную мощность.

Разработанный программный комплекс может быть использован для анализа возможных аварийных и послеаварийных режимов в качестве советчика диспетчера для оперативно-диспетчерского персонала промышленных электростанций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелешкин Г.А., Г.В. Меркурьев. Устойчивость энергосистем: монография. Кн. 1. СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. 369 с.
2. Жданов П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем / под ред. Л.А. Жукова. М.: Энергия, 1979. 456 с.
3. Кимбарк Э. Синхронные машины и устойчивость электрических систем. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. 392 с.

4. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
5. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М.-Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. 625 с.
6. Kothari D.P., Nagrath I.J. Power System Engineering – Second Edition. – New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
7. Xiufeng Shi, Shiguang Mu. Research on Measures to Improve Stability of the Power System – Applied Mechanics and Materials, vol. 742 (2015), pp 648-652.
8. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables. – IET Generation, Transmission & Distribution. Oct 2012, vol. 6 Issue 10, pp. 977-985.
9. Xiufeng Shi, Shiguang Mu. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. Applied Mechanics and Materials. Vol. 742 (2015). P. 648-652.
10. Sathesh 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 Issue 1. P. 38-47.
11. Harikrishna D., Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator // TELKOMNIKA. Vol.10. No.1, March 2012. P. 9-16.
12. Boudour Mohamed, Hellal Abdelhafid. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique // The Arabian Journal for Science and Engineering. 2005. Vol. 30. Number 1B.
13. 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.
14. Zhang Rui, Yan Xu, Zhao Yang Dong, Kit Po. Wong 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.
15. Welhazi Yosra, Tawfik Guesmi, Imen Ben Jaoued, Hsan Hadj Abdallah. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems // J. Electrical Systems. 10-3 (2014): 276-291.
16. Akagi Hirofumi Kenji Takahashi, Toshiaki Kobayashi, Hiroaki Sugihara, Takaaki Kai Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization // Electrical Engineering in Japan. Vol. 133. No.1, 2000.
17. Варганова А.В. Алгоритм внутростанционной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 17–22.
18. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015.
19. 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. P. 748-751.
20. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models // Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. P. 951-955.
21. 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. P. 1-6.
22. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering6 сб. Сер. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015". 2016. P. 012056.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability. Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malapheev A.V. Procedia Engineering 2015. T.128. С. 759-763.
28. Газизова О.В., Малафеев А.В., Кондрашова Ю.Н. Определение предельных параметров режимов для обеспечения успешной ресинхронизации объектов распределенной генерации в условиях предприятия черной металлургии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. Т.16. №4. С. 12-22.
29. Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Малафеев А.В. Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №3(32). С. 27-38.
30. Малафеев А.В., Буланова О.В., Кондрашова Ю.Н. Исследование влияния автоматических регуляторов промышленных генераторов на параметры переходных процессов коротких замыканий и выхода на раздельную работу // Главный энергетик. 2011. №3. С. 26-29.

Поступила в редакцию 21 января 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYSIS OF PERMISSIBILITY OF THE EXCITATION LOSS MODE OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR IN THE CONDITIONS OF THE INDUSTRIAL ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM

Olga V. Gazizova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, 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>

Alexandr P. Sokolov

Undergraduate student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9397-8291>

Nicolay T. Patshin

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

Yulia N. Kondrashova

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

Modern operating conditions of large industrial enterprises require the provision of high reliability of power supply to consumers while reducing the cost of the electricity consumed. These requirements are ensured by the widespread introduction of own sources of electrical energy. These include combined heat and power plants, gas turbines, gas pistons and steam and gas power plants. At the same time, there is a significant complication of the industrial network configuration and possible emergency modes.

One of the emergency modes in such networks is the loss of excitation of the synchronous generator. The admissibility of such a regime is specified by regulatory documents. In this situation, the generator goes into asynchronous mode and consumes reactive power from the network. The purpose of this work is to identify the admissibility of the synchronous generator operation for a certain time in the asynchronous mode as a result of the loss of excitation. An algorithm has been developed to calculate the transient electromechanical process of a synchronous generator taking into account the loss of machine excitation. Investigations have been carried out for various operating modes of an industrial power plant taking into account the initial generator load using the KATRAN software. The calculation results allow determining the generator load by active power at which the synchronous generator can operate in the asynchronous mode without excitation.

Keywords: industrial synchronous generator, transient electromechanical mode, software, automatic excitation controller, parallel operation, separate operation, loss of excitation, asynchronous operation.

REFERENCES

- Meleshkin G.A., Merkur'yev G.V. *Ustoychivost energosistem* [Stability of power systems]. Monograph. Book 1. S.Peterburg: Center for training of energy personnel, 2006. 369 p. (In Russian)
- Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti energeticheskikh sistem* [Questions of stability of power systems] / Ed. L.A. Zhukov. Moscow: Energy, 1979. 456 p. (In Russian)
- Kimbar'k E. *Sinkhronnye mashiny i ustoychivost elektricheskikh sistem* [Synchronous machines and stability of electrical systems]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. 392 p. (In Russian)
- Kovach K.P., Raz J. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transients in AC machines]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. 744 p. (In Russian)
- Kazovsky E.Y. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transients in electric machines AC]. Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1962. 625 p. (In Russian)
- Kothari D.P., Nagrath I.J. *Power System Engineering*. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
- Xiufeng Shi, Shiguang Mu/ Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *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.
- Xiufeng Shi, Shiguang Mu. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 742 (2015), pp. 648-652.
- Satheesh, A. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 10th March 2013, vol. 49 Issue 1, pp. 38-47.
- 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.
- Boudour Mohamed, Hellal Abdelhafid. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2005, vol. 30, number 1B.
- 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 Issue 1, pp. 85-91.
- Rui Zhang, Yan Xu, Zhao Yang Dong, Kit Po Wong. 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.
- Welhazi Yosra, Tawfik Guesmi, Imen Ben Jaoued, Hsan Hadj Abdallah. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. *J. Electrical Systems*, 10-3 (2014): pp. 276-291.

16. 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.
17. Varganova A.V. Algorithm of intra-station optimization of the operating modes of boiler units and turbogenerators at industrial power plants. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2018, no. 1, pp. 17-22. (In Russian)
18. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. 2015.
19. Shevchenko A.F. Construction and Design Features of Permanent Magnet electric Motors for General Industrial Purposes / Shevchenko A.F., Pristup A.G., Novokreshchenov O.I., Toporkov D.M., Korneev V.V. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85. no. 12, pp. 748-751.
20. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 129, pp. 951-955.
21. 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.
22. 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 Series. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015"*. 2016. pp. 012056.
23. Nikolaev N.A., Bulanov O.V., Malafeev A.V., Kondrashova Yu.N., Tarasov V.M. Qualification regulating rectification effect for load-defined division parameters established modes of power supply systems of industrial enterprises. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Proceedings of the higher educational institutions. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 115-118. (In Russian)
24. Zaslavets B.I., Igumenshev V.A., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N., Panova E.A. Comprehensive evaluation of current and for the 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)
25. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Research of dynamical stability of industrial power systems with own power stations at separation from the electric system in the result of short-circuit failure. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics"], 2008, no. 17(117), pp. 72-74. (In Russian)
26. Bulanova O.V., Malafeev A.V., Rotanova Yu.N., Tarasov V.M. Analysis of transient modes of power supply systems of industrial enterprises having in its composition objects small energy. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2010, no. 4, pp. 22-28. (In Russian)
27. Kondrashova Yu.N., Gazizova O.V., Malafeyev 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.
28. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Yu.N. Determination of limit mode parameters to ensure successful resynchronization of distributed generation units at iron and steel works. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2016, vol. 16, no. 4, pp. 12-22. (In Russian)
29. Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Malafeyev A.V. Increase of Effective Management of Modes of Electric Power Plants Due to Forecasting of Static and Dynamic Stability at Change of Network Configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 3(32), pp. 27-38. (In Russian)
30. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Kondrashova Yu.N. The study of the influence of automatic regulators of industrial generators on the parameters of transients of short circuits and output to separate operation. *Glavnyi energetik* [Head power engineer], 2011, no. 3, pp. 26-29. (In Russian)

Газизова О.В., Соколов А.П., Патшин Н.Т., Кондрашова Ю.Н. Анализ допустимости режима потери возбуждения синхронного генератора в условиях промышленной системы электроснабжения сложной конфигурации // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 2(43). С. 12-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-12-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-12-18)

Gazizova O.V., Sokolov A.P., Patshin N.T., Kondrashova Yu.N. Analysis of Permissibility of the Excitation Loss Mode of the Synchronous Generator in the Conditions of the Industrial Electrical Supply System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 12-18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-12-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-12-18)



АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА И ПРОВЕРКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В СОСТАВЕ САПР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ

Одним из наиболее трудоемких этапов выполнения проекта понизительной подстанции является выбор и проверка электрооборудования. Это связано с необходимостью в выполнении больших объемов однообразных расчетов. Поэтому актуальной является задача разработки систем автоматизированного проектирования, позволяющих выполнять такого рода расчеты. Данная статья посвящена разработке алгоритма автоматизированной проверки измерительных трансформаторов тока. Предложенный авторами алгоритм позволяет автоматизировать выполнение расчетов, связанных с проверкой условий работы измерительных трансформаторов в утяжеленных и аварийных режимах. Также алгоритм позволяет выполнить проверку трансформаторов тока по вторичной нагрузке. Разработанный алгоритм учитывает не только номинальные параметры измерительного трансформатора, но и его конструктивное исполнение, схему соединения, класс напряжения и тип присоединения на котором он будет использован.

Ключевые слова: САПР, подстанция, выбор электрооборудования, измерительные трансформаторы, алгоритм, программное обеспечение.

ВВЕДЕНИЕ

Работа проектировщика сегодня связана не только с необходимостью принятия качественных обоснованных проектных решений, но и с требованием к выполнению проекта в максимально сжатые сроки. Для выполнения этих требований, в том числе при выполнении проектов электрической части подстанций, широко применяются системы автоматизированного проектирования.

В первую очередь САПР используются при выполнении чертежей. Такие системы как AutoCAD [1], КОМПАС [2] позволяют проектировщику использовать стандартные библиотеки элементов электрических схем, выполненные в соответствии с действующей ЕСКД. Также САПР используются при составлении проектной документации, например смет [3]. Существуют САПР, позволяющие автоматизировать не только отрисовку схем, но и осуществить выбор схемы электрических соединений распределительного устройства подстанции на основе технического задания [4], а также разработать последовательность оперативных переключений для различных режимов работы распределительного устройства [5].

При проектировании электрических подстанций САПР также используются для расчета устройств защитного заземления [6, 7], освещения [8]. Существуют также САПР, позволяющие автоматизировать разработку плана распределительного устройства подстанции [9].

В части выбора и проверки электрического оборудования электроустановок САПР решают такие задачи, как выбор и проверка силовых кабелей [10], высоковольтных выключателей [11], гибкой ошиновки [12] и другого электрооборудования.

Зачастую САПР применяются при проектировании систем электроснабжения таких объектов, как цеха

промышленных предприятий [13], жилые и общественные здания, а также иные объекты капитального строительства [14].

Основным недостатком всех рассмотренных САПР является отсутствие комплексного подхода к выполнению проекта. Все они направлены на автоматизацию только одного или нескольких этапов проектирования. При этом исходными данными для их использования являются, как правило, не техническое задание, а проектные решения, принятые на предыдущих этапах. Это обуславливает актуальность выполняемой работы.

Данная статья посвящена разработке и программной реализации алгоритма автоматизированного выбора и проверки измерительных трансформаторов тока. Данный алгоритм реализован в разработанной авторами САПР понизительных подстанций [15], позволяющей на основе технического задания осуществлять выбор схемы распределительного устройства на основе технических [16] и экономических [17] критериев, а также выполнять выбор и проверку электрооборудования с использованием информации о номинальных параметрах электрических аппаратов из базы данных [18]. Результатом работы данной САПР является комплект проектной документации, состоящей из пояснительной записки и однолинейных схем, выполненных автоматически и импортированных в графический редактор КОМПАС. На любом этапе выполнения проекта проектировщик может вносить изменения, которые учитываются при автоматизированном выполнении следующих этапов. Такой подход позволяет проектировщику не тратить время на выполнение рутинных задач и реализовать свой потенциал при реализации нетиповых проектных решений.

АЛГОРИТМ ВЫБОРА И ПРОВЕРКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ПО УСЛОВИЯМ НОРМАЛЬНОГО И АВАРИЙНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Начальным этапом является выбор проектировщиком из базы данных [18] трансформатора тока требу-

мого типа. При этом из базы данных для дальнейших расчетов в качестве исходных данных принимаются тип трансформатора тока, так как его конструктивные особенности влияют на условия его проверки по режиму короткого замыкания, номинальное напряжение и ток, ток и время термической стойкости и ток электродинамической стойкости, а также номинальное сопротивление нагрузки.

Далее в зависимости от типа присоединения, для которого осуществляется выбор электрооборудования, определяется ток утяжеленного режима с учетом перегрузочной способности электрооборудования (трансформатора, двигателя и т.п.). Затем выполняется сравнение напряжения распределительного устройства с номинальным напряжением трансформатора тока и тока утяжеленного режима с номинальным первичным током. Если хотя бы одно из перечисленных условий не выполняется, то проектировщику предлагается выбрать другой трансформатор тока из базы данных.

По результатам расчета режима короткого замыкания в качестве исходных данных вводятся начальное значение периодической составляющей тока КЗ и ударный ток.

Проверка на электродинамическую стойкость осуществляется только в том случае, если тип трансформатора тока равен «опорный». В противном случае данная проверка не нужна, так как электродинамическая стойкость шинного трансформатора тока определяется стойкостью сборных шин.

Для выполнения проверки на термическую стойкость необходимо определить тепловой импульс, величина которого зависит от значения периодической составляющей тока короткого замыкания, протекающего по данной цепи, и длительности его протекания.

Согласно ПУЭ расчетная продолжительность КЗ складывается из времени действия основной релейной защиты данной цепи $t_{рз}$ с учетом действия АПВ и полного времени отключения выключателя $t_{о.в.}$, которое указывается в каталожных данных и принимается на основе номинальных параметров выбранного ранее для данного присоединения выключателя из базы данных:

$$t_{отк} = t_{рз} + t_{о.в.} \quad (1)$$

Время действия релейной защиты принимается для присоединений силового трансформатора со стороны ВН – 0,02 с, со стороны НН – 1 с, на линиях напряжением 35 кВ и выше – 0,1 с, на линиях 6-10 кВ – 0,5 с, на присоединениях двигателей и компенсирующих устройств – 0,02 с.

Постоянная времени электрической цепи определяется при расчете тока короткого замыкания в зависимости от класса напряжения электроустановки и параметров элемента цепи, через который осуществляется подпитка.

На рис. 1 представлена блок-схема предложенного авторами алгоритма выбора и проверки измерительных трансформаторов тока по условиям их работы в утяжеленном и аварийном режимах.

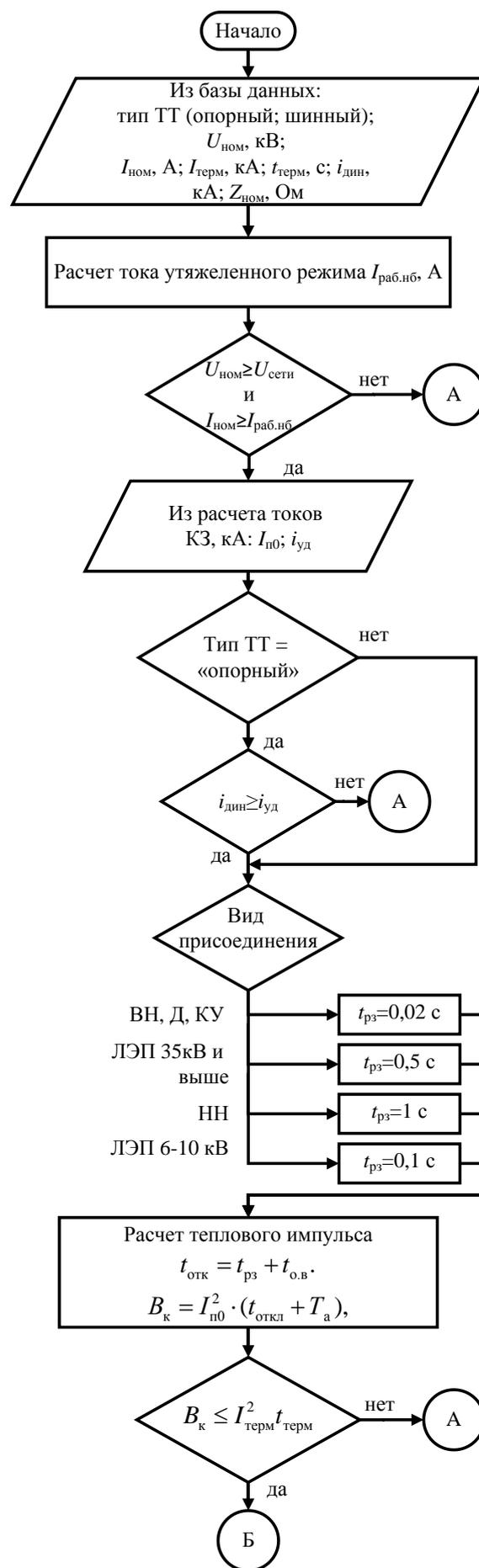


Рис. 1. Алгоритм выбора и проверки измерительного трансформатора тока

ПРОВЕРКА ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА
ПО ВТОРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

Наибольшую сложность при автоматизированной проверке измерительных трансформаторов тока представляет оценка его вторичной нагрузки. Предложенный авторами алгоритм автоматизированного расчета вторичной нагрузки трансформатора тока представлен на рис. 2 и 3. Исходными данными для выполнения данного расчета является перечень измерительных приборов и приборов учета, которые подлежат установке на данном присоединении, схема соединения обмоток трансформатора тока, мощность, потребляемая приборами. Перечень требуемых приборов определяется автоматически в зависимости от типа присоединения и класса его напряжения и соответствует требованиям ПУЭ в части измерения электрических величин и учета электрической энергии на подстанциях. Алгоритм определения перечня приборов учета и измерения описан в [19].

Нагрузка на фазу измерительного трансформатора тока, создаваемая счетчиком, будет зависеть от его конструкции и схемы включения. Для однофазных счетчиков в качестве номинальной производится фазная нагрузка, которая и используется в дальнейших расчетах. Для трехфазных счетчиков нагрузка на фазу будет определяться следующим образом:

$$\begin{cases} S_{PIK.\phi} = \frac{S_{PIK}}{3}, \text{ трехтрансформаторная схема;} \\ S_{PIK.\phi} = \frac{S_{PIK}}{2}, \text{ двухтрансформаторная схема;} \\ S_{PIK.\phi} = \frac{S_{PIK}}{3} + \frac{S_{PIK}}{6}, \text{ двухтрансформаторная} \\ \text{с обмоткой в обратном проводе.} \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, вторичная нагрузка измерительного трансформатора тока, создаваемая измерительными приборами и приборами учета, будет складываться из мощности амперметра, ваттметра, варметра и фазы счетчика:

$$S_{\text{приб}} = S_A + S_W + S_{VAR} + S_{PIK.\phi} \quad (3)$$

Сопротивление приборов в фазе измерительного трансформатора тока определяется по известному соотношению:

$$r_{\text{приб}} = S_{\text{приб}} / I_{2.\text{ном}}^2 \quad (4)$$

где $I_{2.\text{ном}}$ – номинальный вторичный ток трансформатора тока (из базы данных), А.

Кроме измерительных приборов и приборов учета, вторичную нагрузку трансформатора тока составляют также контакты и соединительные провода. В предлагаемом алгоритме сопротивление контактов учитывается упрощенно и при числе приборов три и менее принимается равным 0,05 Ом, а при большем числе приборов – 0,1 Ом.

Для расчета сопротивления проводников вторичных цепей в алгоритме задана длина соединительных проводов (l) в зависимости от класса напряжения. Данные длины взяты усредненно. Так как на подстанциях с высшим напряжением 110 кВ и ниже рекомендуется во вторичных цепях использовать алюминиевые проводники, а на подстанциях более высокого класса – медные, это учтено в алгоритме величиной их удельного сопротивления (ρ).

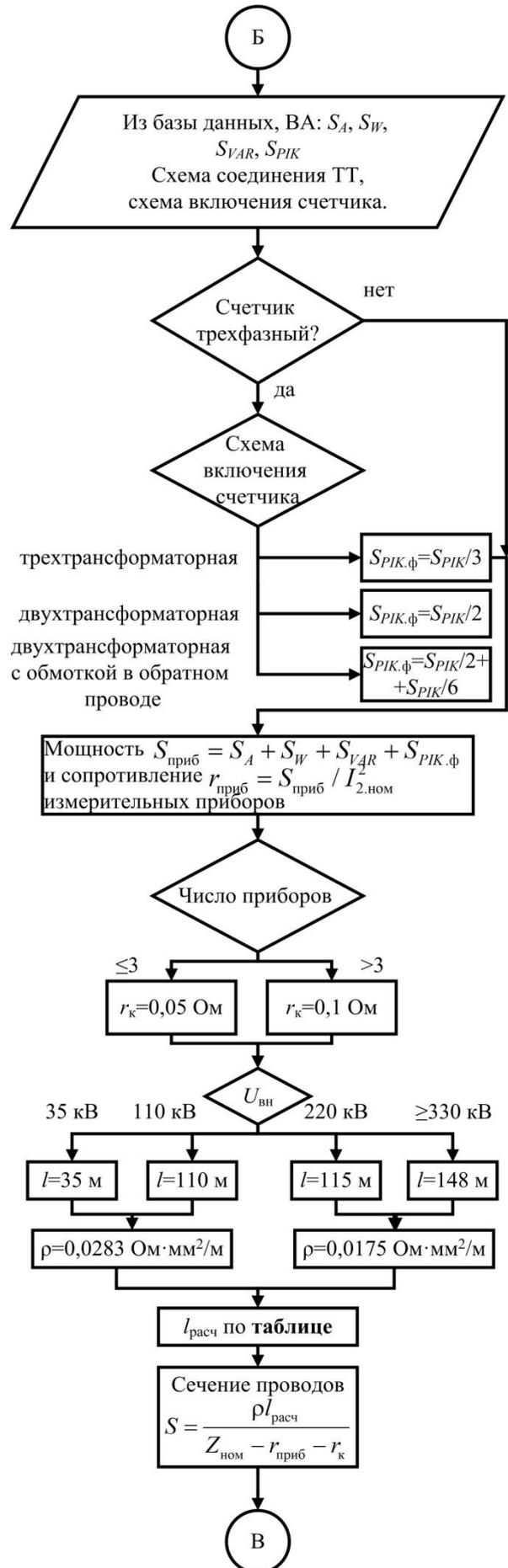


Рис. 2. Алгоритм проверки трансформатора тока по вторичной нагрузке (начало)

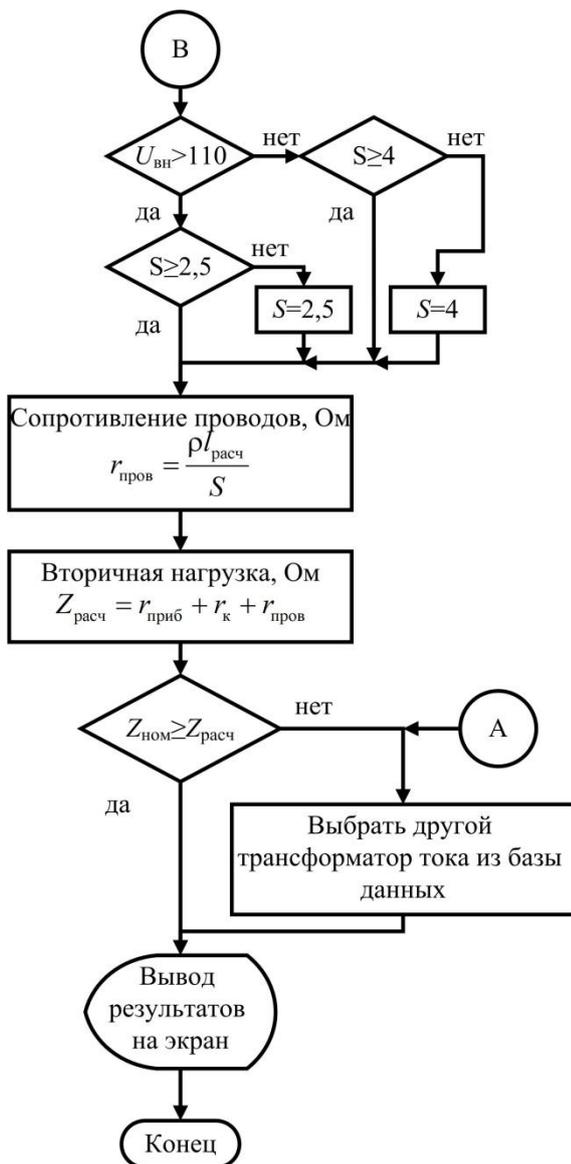


Рис. 3. Алгоритм проверки трансформатора тока по вторичной нагрузке (окончание)

Так как на длину трассы соединительных проводов влияет не только класс напряжения распределительного устройства, но и схема соединения обмоток трансформаторов тока, то далее рассчитывается длина трассы ($l_{расч}$) в соответствии с таблицей.

Определение длины трассы соединительных проводов

Схема соединения трансформаторов тока	$l_{расч}$, М
В одну фазу	$l_{расч} = 2l$
Звезда	$l_{расч} = \sqrt{3}l$
Неполная звезда	$l_{расч} = l$

После определения $l_{расч}$ рассчитывается сечение соединительных проводов:

$$S = \frac{\rho l_{расч}}{Z_{ном} - r_{приб} - r_k} \tag{5}$$

Для обеспечения требований к механической прочности проводов при высшем напряжении на подстанции

110 кВ и менее сечение, которое по расчетам получилось меньше 4 мм^2 , округляется до данного значения, а при высшем напряжении более 110 кВ – до $2,5 \text{ мм}^2$.

Далее выполняется расчет сопротивления проводов

$$r_{пров} = \frac{\rho l_{расч}}{S} \tag{6}$$

На заключительном этапе выполнения алгоритма определяется вторичная нагрузка измерительного трансформатора:

$$Z_{расч} = r_{приб} + r_k + r_{пров} \tag{7}$$

В конце выполняется сравнение расчетной вторичной нагрузки с номинальной. Если условия проверки выполняются, то результат выводится на экран. В противном случае пользователю предлагается выбрать другой трансформатор тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен алгоритм автоматизированной проверки измерительных трансформаторов тока, позволяющий выбрать электрический аппарат из базы данных осуществить оценку его работы в условиях утяжеленного и аварийного режимов электроустановки. Предложенный алгоритм отличается возможностью автоматизированного расчета вторичной нагрузки измерительного трансформатора.

Разработанный авторами алгоритм реализован в оригинальном программном обеспечении САПР понижительных подстанций и может быть использован в работе проектных организаций, а также при учебном проектировании.

Использование разработанного алгоритма и программного обеспечения позволит значительно сократить время, затрачиваемое проектировщиком на выполнение однообразных рутинных расчетов.

Работа выполняется при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых - кандидатов наук МК-939.2019.8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт Autodesk Inc. <https://www.autodesk.ru/products/autocad/overview>.
2. Официальный сайт ООО «АСКОН - Системы проектирования». <https://kompas.ru/>
3. Игнатъев К.Е. Автоматизация деятельности инженера-энергетика при составлении сметной документации по строительству типовых линий электропередачи // Аллея науки. 2018. Т.1. №5(21). С. 1007-1010.
4. Панова Е.А., Варганова А.В. Алгоритм автоматизированного выбора схем электрических соединений открытых распределительных устройств напряжением 35-750 кВ в САПР «ОРУ САД» // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т.18. № 3. С. 52-60.
5. Sachdev M.S., Dhakal P. and Sidhu T.S., "Design tool generates substation interlock schemes," in IEEE Computer Applications in Power, vol. 13, no. 2, pp. 37-42, April 2000.
6. Duta M.I., Diga S.M., Rusinaru D.G., Brojboiu M.D. and Popescu D.N., "Computer aided design of the earthing installations for the substations," 2010 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), Galati, 2010, pp. 34-38.

7. Patel A.B. and Velani K., "Digital application for grounding grid design calculations of substation," 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), Vellore, 2017, pp. 1-6.
8. Dialux – расчёт и проектирование освещения. <http://www.dialux-help.ru/>
9. Fletcher R., "Using modern IT to improve distribution planning substation siting optimization - a new approach," IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, IL, USA, 2002, vol. 1, pp. 356-361.
10. Программа выбора аппаратуры, кабелей и защит в сетях 0,4 кВ / В.И. Готман, С.Г. Слюсаренко, А.В. Скворцов, С.Н. Аверин, А.Д. Кадай // Проблемы и перспективы развития Томского нефтехимического комбината: тезисы докладов 10-го отраслевого совещания. 1996. С. 89-90.
11. Бриштен А.В., Беляев Я.С. Разработка системы автоматизированного выбора высоковольтных выключателей // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. 2017. С. 136-138.
12. Воронин А.А., Одрузова В.А., Наурзов Т.Б. Система автоматизированного выбора гибких сборных шин распределительных устройств // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: материалы VIII Международной научно-технической конференции. 2017. С. 154-157.
13. Постановка задачи синтеза принципиальных схем промышленного электроснабжения средствами современных САПР / А.Л. Ахтулов, Л.Н. Ахтулова, Е.Н. Леонов, С.И. Смирнов // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2011. № 1. С. 110-113.
14. Иващенко В.С. Автоматизированное проектирование электроустановок жилых и общественных зданий // Энергобезопасность в документах и фактах. 2007. №5. С. 18-19.
15. ОРУ САД / А.В. Варганова, Е.А. Панова, Т.В. Хатюшина, В.С. Кононенко, Х.М. Багаева // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2018660517 30.07.2018.
16. Панова Е.А., Варганова А.В. Алгоритм автоматизированного выбора схем электрических соединений открытых распределительных устройств напряжением 35–750 кВ в САПР «ОРУ САД» // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18. № 3. С. 52-60.
17. Расчет экономических составляющих целевой функции алгоритма определения оптимального варианта схемы распределительного устройства подстанции с высшим напряжением 35 кВ и более / Е.А. Панова, А.С. Ирихов, И.А. Дубина, Н.Т. Патшин // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №1(42). С. 4-11. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-4-11).
18. Разработка базы данных электрооборудования 35-220 кВ для САПР «ОРУ САД» / А.В. Варганова, Е.А. Панова, Т.В. Хатюшина, В.С. Кононенко, Х.М. Багаева // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №2(39). С. 28-33.
19. Варганова А.В., Панова Е.А., Багаева Х.М. Выбор контрольно-измерительных приборов в цепях оборудования распределительных устройств 6-220 кВ в САПР «ОРУ САД» // Современные проблемы электроэнергетики и пути их решения: материалы III Всероссийской научно-технической конференции. 2018. С. 34-37.

Поступила в редакцию 24 марта 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ALGORITHM FOR AUTOMATED SELECTION AND VERIFICATION OF INSTRUMENT CURRENT TRANSFORMERS IN THE ELECTRICAL SUBSTATIONS CAD SYSTEM

Evgeniya A. Panova

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, 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>.

Aleksandra V. Varganova

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, 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>.

Mariya S. Panarina

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

Tatiana V. Khatushina

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

One of the most labor-intensive stages of the design of a substation is the selection and testing of electrical equipment. This is due to the need to perform large volumes of uniform calculations. Therefore, the urgent task is to develop computer-aided design systems that allow performing such calculations. This paper is devoted to the development of an algorithm for automated testing of measuring current transformers. The algorithm proposed by the authors makes it possible to automate the execution of calculations related to the verification of the working conditions of measuring transformers in heavy and emergency modes. The algorithm also allows you to test current

transformers for the secondary load. The developed algorithm takes into account not only the nominal parameters of the measuring transformer, but also its design, connection scheme, voltage class and type of connection on which it will be used.

Keywords: CAD, substation, selection of electrical equipment, instrument transformers, algorithm, software.

REFERENCES

1. Autodesk Inc. <https://www.autodesk.ru/products/autocad/overview>.
2. LLC «Ascon – Project systems». <https://kompas.ru/>

3. Ignat'ev K.E. Automation of the activities of an energy engineer in the preparation of estimates for the construction of typical power lines. *Alleia nauki* [Alley of science], 2018, vol. 1, no. 5(21), pp. 1007-1010. (In Russian)
4. Panova Ye.A., Varganova A.V. ORU-CAD algorithm for computer-aided SLD selection for 35- to 220-kV outdoor switchgears. *Vestnyk Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: E'nergetika* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2018, vol.18, no.3, pp.52-60. (In Russian)
5. Sachdev M.S., Dhakal P. and Sidhu T.S., "Design tool generates substation interlock schemes," in IEEE Computer Applications in Power, vol. 13, no. 2, pp. 37-42, April 2000.
6. Duta M.I., Diga S.M., Rusinaru D.G., Brojboiu M.D. and Popescu D.N., "Computer aided design of the earthing installations for the substations," 2010 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), Galati, 2010, pp. 34-38.
7. Patel A.B. and Velani K., "Digital application for grounding grid design calculations of substation," 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), Vellore, 2017, pp. 1-6.
8. Dialux – lighting calculation and design. <http://www.dialux-help.ru/>
9. Fletcher R., "Using modern IT to improve distribution planning substation siting optimization - a new approach," IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, IL, USA, 2002, vol.1, pp. 356-361.
10. Gotman V.I., Sliusarenko S.G., Skvortcov A.V., Averin S.N., Kadai' A.D. Program for selection of equipment, cables and protections in networks of 0.4 kV. *Problemy i perspektivy razvitiia Tomskogo nefehimicheskogo kombinata Tezisy docladov 10-go otraslevogo soveshchaniia* [Problems and prospects of development of the Tomsk Petrochemical Combine Abstracts of the 10th Sectoral Meeting], 1996, pp. 89-90. (In Russian)
11. Brishten A.V., Beliaev Ia.S. Development of an automated selection of high-voltage circuit breakers system. *Nauka. Tekhnologii. Innovatcii: sb. nauch. trudov* [The science. Technology. Innovation: a collection of scientific papers], 2017, pp. 136-138. (In Russian)
12. Voronin A.A., Odruzova V.A., Naurzov T.B. System of automated selection of flexible busbars of switchgears. *E'lektroenergetika glazami molodezhi – 2017. Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhniceskoi konferencii* [Electric power industry through the eyes of youth - 2017. Materials of the VIII International Scientific and Technical Conference], 2017, pp. 154-157. (In Russian)
13. 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 Izhevsk State Technical University], 2011, no. 1, pp. 110-113. (In Russian)
14. Ivashchenko V.S. Automated electrical design of residential and public buildings. *E'nergobezopasnost' v dokumentakh i faktakh* [Energy security in documents and facts], 2007, no. 5, pp. 18-19. (In Russian)
15. Varganova A.V., Panova E.A., Hatiushina T.V., Kononenko V.S., Bagaeva Kh.M. *ORU CAD* [ORU CAD], Software, RUS 2018660517 30.07.2018.
16. Panova Ye.A., Varganova A.V. ORU-CAD Algorithm for Computer-Aided SLD Selection for 35- to 220-kV Outdoor Switchgears. *Vestnyk IUUrGU. Seriya «E'nergetika»* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering], 2018, vol. 18, no. 3, pp. 52–60. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180307
17. Panova E.A., Irikhov A.S., Dubina I.A., Patshin N.T. Calculation of Economic Components of Target Function of the Algorithm for Determining the Optimal Option of Scheme of Substations Distribution Device with the High Voltage of 35 kV and Above. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 4-11. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-4-11)
18. Varganova A.V., Panova E.A., Hatiushina T.V., Kononenko V.S., Bagaeva H.M. Development of Electrical Equipment Database of 35-220 kV for "ORU CAD". *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2 (39), pp. 28-33.
19. Varganova A.V., Panova E.A., Bagaeva Kh.M. Selection of measuring instruments in the chains of equipment of distributive devices of 6-220 kV in CAD "ORU CAD". *Sovremennye problemy elektroenergetiki i puti ikh resheniya. Materialy III Vserossiiskoi nauchno-tekhniceskoi konferencii* [Current problems of the power industry and their solutions], 2018, pp. 34-37. (In Russian)

Панова Е.А., Варганова А.В., Панарина М.С., Хатюшина Т.В. Алгоритм автоматизированного выбора и проверки измерительных трансформаторов тока в составе САПР электрических подстанций // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2(43). С. 19-24. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-19-24](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-19-24)

Panova E.A., Varganova A.V., Panarina M.S., Khatushina T.V. Algorithm for Automated Selection and Verification of Instrument Current Transformers in the Electrical Substations CAD System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 19-24. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-19-24](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-19-24)

ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 658

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-25-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-25-34)Логунова О.С., Агапитов Е.Б., Баранкова И.И.,
Андреев С.М., Чусавитина Г.Н.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова



МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Целью исследования является систематизация проблем и способов их разрешения, связанных с изучением теплового состояния тел и расплавов в промышленном производстве. Выделены проблемы, характерные для металлургического предприятия, в частности: математическое моделирование электромагнитных полей в системах индукционного нагрева продукции метизной отрасли; построение информационного обеспечения энергосберегающего режима нагрева заготовок перед прокаткой в нагревательной печи проходного типа; применение классических уравнений теплообмена и многофакторного анализа для моделирования процессов в агрегате печь-ковш (АПК); развитие псевдодинамической и квазидинамической моделей для описания теплового состояния протяженного тела. Все указанные задачи имеют тепловую природу и, несмотря на различие объектов исследования, при решении используют математические модели для исследования теплового состояния тел и управления тепловыми процессами. Реализация математических моделей выполнена с использованием современного программного обеспечения средств вычислительной техники. Все исследования проведены научными направлениями в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», имеют широкую апробацию и внедрение в действующее производство.

Ключевые слова: математическое моделирование, металлургические процессы, управление тепловыми процессами, металлургические агрегаты, псевдо- и квазидинамика.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые явления и процессы являются самыми распространенными в окружающем мире. Они занимают второе место после механического движения. Открытие законов протекания тепловых явлений и процессов позволило применять их на практике и в технике, конструирование тепловых двигателей, холодильных установок и многие другие устройства на основе этих законов. Тепловые процессы и явления связаны с нагревом или охлаждением тел и требуют разработки систем управления.

Основные положения теории теплопереноса разрабатывались в течение длительного времени. Известны фундаментальные труды Лыкова А.В., Борисова В.Т., Журавлева В.А., Самойловича Ю.А., в которых изложены основы теплопроводности и их применения для описания теплового состояния тел типовой и любой произвольной формы [1-4], а также особенности их применения для технологических процессов, в которых главной составляющей является перенос тепла и массы [4-6]. К таким технологическим процессам относятся нагрев тел и жидкостей, перемешивание жидких горячих расплавов, охлаждение горячих тел и жидких расплавов при затвердевании. Для металлургического производства эти процессы характерны для выплавки стали, обработки металлов в АПК, охлаждения заготовок на технологической линии машин непрерывного литья заготовок, нагрева заготовок в нагревательных печах и при индукционном нагреве.

Современным направлением является включение в математические модели параметров, характеризующих свойства материалов, которые изменяются во времени и являются функциями температуры материала или расплава. Введение функциональных зависимостей позволяет выполнить моделирование тепловых процессов в

зональных агрегатах. В указанных агрегатах затруднены прямые измерения по методикам, приведенным в [7, 8]. Однако математические модели с переменными свойствами материала необходимы при создании новых конструкций металлургических агрегатов [9-11], разработке новых функций автоматизированных систем управления технологическими процессами [12-14].

Моделирование является одним из основных методов научных исследований и, в том числе, тепловых процессов. Компьютерное моделирование является инструментом для решения сложнейших практических и теоретических проблем науки и техники. В основе компьютерного эксперимента лежит математическая модель, которая содержит формализованное описание объекта изучения, включающее числовые параметры, константы, ограничения, а также аналитические зависимости. При отсутствии известных аналитических закономерностей используются современные технологии на основе искусственных нейронных сетей, теории нечетких множеств и нечеткой логики, древовидных структур и их комбинации.

Именно благодаря важной роли в научных исследованиях, математическое моделирование активно внедряется в систему высшего образования. Подготовка бакалавров, магистров и аспирантов по группам: 01 «Математика и механика», 02 «Компьютерные и информационные науки», 09 «Информатика и вычислительная техника», 44 «Образование и педагогические науки» включает ряд дисциплин, связанных с моделированием явлений и процессов.

Высокая востребованность результатов моделирования привела к активной разработке программных средств, таких как: Matlab для реализации моделей; AnyLogic для имитационного моделирования на языке Java с библиотекой визуальных компонентов и позволяющая создавать 2D- и 3D- анимацию для эффективного проведения вычислительного эксперимента [15-17].

В ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» сложилось несколько научных направлений, которые, применяя основы теплотехнического исследования и математического моделирования, проводят научные исследования в области изучения и управления тепловыми процессами для металлургических объектов. В данной работе приводятся примеры построения и реализации моделей для металлургической области.

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СИСТЕМАХ
ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА
ПРОДУКЦИИ МЕТИЗНОЙ ОТРАСЛИ

Индукционный нагрев массивных тел требует решения одной из задач по определению теплового состояния массивных тел и содержит три подзадачи: распространение электромагнитной энергии в системе; возникновение источников теплоты внутри нагреваемых объектов; передача теплоты в системе [18, 19]. Учитывая факт неоднородности свойств изучаемых тел, возникает необходимость в экспериментальном изучении процессов или в использовании интегральных распределений вероятности [20, 21]. Учитывая указанные особенности системы, обобщенная математическая модель включает несколько частей: имитационная модель свойств нагреваемого объекта, модель для определения напряженности электромагнитного поля на поверхности объекта, модель для определения влияния электромагнитного поля на интенсификацию теплообмена, электротепловая модель для определения тепловых полей внутри объекта.

Модель для определения напряженности электромагнитного поля на поверхности нагреваемых тел описывает распространение электромагнитной энергии в системе и содержит уравнения электродинамики в интегральной форме. Модель для определения влияния электромагнитного поля на интенсификацию теплообмена описывает влияние электромагнитного поля системы на возникновение вибрации витков проволоки, вызывающей дополнительный перенос теплоты. Электротепловая модель термообработки бунтов проволоки описывает распространение электромагнитной волны в исследуемом объекте. Она базируется на решении уравнения теплопроводности Фурье с внутренними источниками теплоты с переменными коэффициентами.

Все численные методы расчета электромагнитных полей можно отнести к двум различным постановкам задачи. Первая основана на описании электромагнитного поля дифференциальными уравнениями Максвелла второго порядка с соответствующими граничными условиями. Вторая постановка задачи основана на теории дальнего действия и заключается в том, что поле в любой точке определяется как сумма полей, создаваемых всеми источниками, первичными и вторичными. Первичными являются сторонние источники (точки, заряды), вносимые в систему. Вторичные источники определяют поле реакции тел, составляющих систему, на поле первичных источников. При этом все тела заменяются распределенными в их объеме источниками, взаимодействие между которыми определяется в вакууме.

Интегральные методы удобны для расчета квазистационарных систем, в которых можно пренебречь запаздыванием сигнала. Все индукционные устройства подчиняются этому условию. Важным достоинством метода является то, что расчет производится только для областей, занятых вторичными источниками. Естественными вторичными источниками здесь являются круговые токи проводимости загрузки, плотность которых заранее неизвестна. Учет воздействия на отдельный элемент всех токов приводит к уравнению Фредгольма второго рода относительно плотности тока этого элемента, справедливое относительно всех элементов загрузки:

$$2\pi R_Q \rho_Q j_Q + j\omega \int_{S_A} M_{QP} J_P dS_P = -j\omega \int_{S_B} M_{QT} J_T dS_T, \quad (1)$$

где M_{QP} и M_{QT} – взаимные индуктивности объемных колец с равномерным распределением тока в них, Гн; R_Q – радиус кольца Q , м; ρ_Q – удельное сопротивление материала, Ом/м; J_Q, J_P, J_T – круговые токи проводимости колец Q, P, T, A ; j – плотность тока, А/м³; ω – круговая частота, 1/с.

Расчет взаимных индуктивностей зависит от расположения элементов и определяется с помощью полных эллиптических интегралов первого и второго рода. В общем случае записываются как

$$M_{QP} = \frac{1}{l_Q l_P} \int_{l_Q} \int_{l_P} \mu_0 r \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K - E \right],$$

где E, K – полные эллиптические интегралы первого и второго рода от модуля k ; l_Q, l_P – длина соленоидов Q, P , м; r – радиус соленоидов, м; k – модуль, определяемый формулой

$$k^2 = \frac{4R_Q}{\rho R_P},$$

где R_Q, R_P – радиусы колец Q и P , м; ρ – удельное сопротивление материала, Ом/м.

Интегральное уравнение (1) является уравнением Фредгольма второго рода. В общем виде уравнение Фредгольма второго рода можно записать как

$$x(t) = \lambda \int_a^b Q(t,s)x(s)ds + f(t), \quad (2)$$

где $x(t)$ – решение уравнения на отрезке $[a, b]$; $f(t)$ – заданная функция – свободный член на отрезке $[a, b]$; $Q(t, s)$ – ядро интегрального уравнения на множестве точек квадрата $[a, b] \times [a, b]$.

Для некоторых уравнений с ядрами определенной структуры имеются формулы, позволяющие найти точное решение $x(t)$. Так, например, решение уравнения (2) с вырожденным ядром

$$Q(t, s) = \sum_{i=1}^m p_i(t) q_i(s)$$

ции и себестоимость проката. Поэтому решение задачи повышения эффективности управления процессом нагрева заготовок перед прокаткой с целью минимизации затрат топлива и получения требуемых качественных показателей имеет актуальное значение [22]. Определение теплового состояния нагреваемой заготовки выполняется на основе псевдодинамической математической модели, включающей уравнение теплопроводности с граничными условиями третьего рода на поверхности.

Новой концепцией управления является повышение эффективности управления процессом нагрева, при котором достигаются минимальные затраты топлива и заданное качество продукции. Расчет режимов управления усложняется необходимостью согласования производительности нагревательных печей и прокатного стана. Так как производительность прокатного стана является крайне неравномерной, то при реализации энергосберегающего управления процессом нагрева требуется производить непрерывную коррекцию тепловых режимов нагревательной печи, чтобы повысить эффект от оптимального управления нагревом [23].

В Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова сложилось научное направление, в рамках которого используется теория оптимального управления при моделировании технологических процессов, в том числе и нагрева заготовок в методических печах. Разработаны теоретические основы оптимального управления нагревом с учетом следующих положений:

Использование информационного обеспечения автоматизированных систем управления объектов, функционирующих в энергосберегающем режиме и непрерывным мониторингом за тепловым состоянием каждой заготовки.

Контроль тепловой нагрузки по зонам нагревательной печи и ее перераспределение по зонам необходимо направлять на достижение максимальной производительности металлургического агрегата.

Информационное обеспечение энергосберегающего режима нагрева металла направлено на реализацию новых функциональных возможностей системы:

- синхронизация процесса определения опти-

мальных параметров и скорости протекания производственного процесса каждой заготовки с использованием псевдодинамической математической модели и с применением принципа максимума Л.С. Понтрягина [22];

- математическое моделирование распределения тепловых нагрузок по зонам нагревательной печи для обеспечения оптимального графика нагрева [24];

- прогнозирование минимального времени нагрева каждой заготовки на момент ее подачи в печь, последующей коррекции этого времени по ходу нагрева и контроля положения [25];

- выполнение независимой автономной оценки текущего температурного состояния каждой заготовки перед выдачей ее из печи на стан и передача информации на диспетчерский пост управления процессом прокатки [12];

- формирование величины соотношения газ – воздух при сжигании газообразного топлива с целью обеспечения максимально возможного теплового эффекта [27].

Структура информационного обеспечения энергосберегающего режима нагрева включает в себя ряд подсистем, совместная работа которых с локальными контурами управления обеспечивает формирование и реализацию энергосберегающего управления нагревом и контролем теплового состояния заготовок перед выгрузкой из нагревательной печи и подачи к прокатному стану. Структура информационной системы приведена на **рис. 1**.

Работа системы энергосберегающего управления основана на поддержании расчетной траектории нагрева заготовки, обеспечивающего минимизацию расхода топлива на нагрев с учетом действующих на процесс нагрева технологических и конструктивных ограничений. Пример расчета траектории оптимального управления нагревом с учетом ограничений показан на **рис. 2**. На **рис. 2** введены обозначения: 1 – ограничения не действуют; 2 – ограничение на максимальный перепад температуры по сечению нагреваемой заготовки; 3 – ограничение на управляющее воздействие; 4 – ограничение на температуру греющей среды; 5 – ограничение на температуру поверхности.

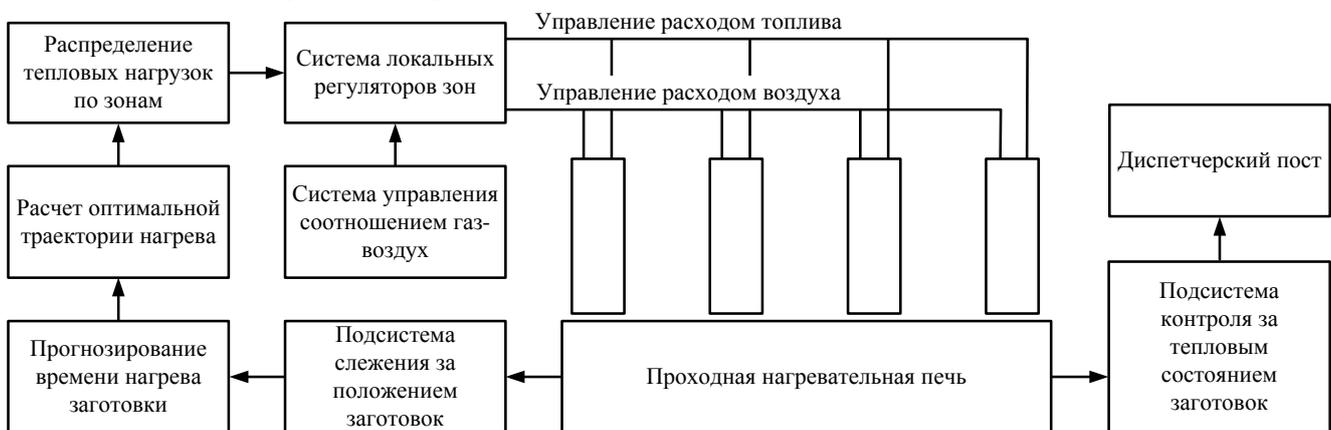


Рис. 1. Информационное обеспечение автоматизированной системы управления нагревом заготовок при использовании энергосберегающего режима

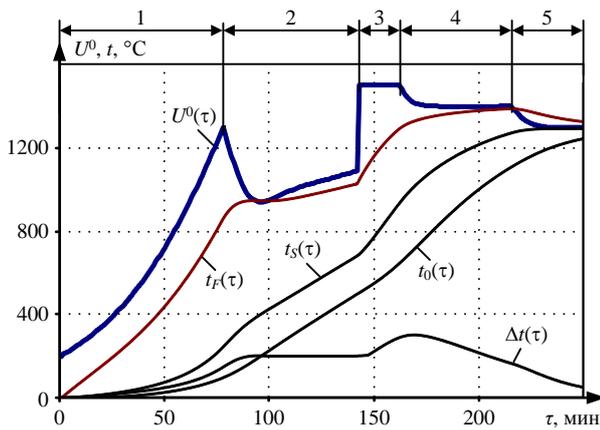


Рис. 2. Расчетные траектории нагрева при решении задачи оптимального с учетом действующих на процесс нагрева ограничений: U^0 – управляющее воздействие – характеристическая температура управления, °С; $t_F, t_S, t_0, \Delta t$ – температура греющей среды, поверхности, центра заготовки и перепад температуры по сечению соответственно, °С

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АПК
НА ОСНОВЕ МНОГОФАКТОРНОГО АНАЛИЗА
И КЛАССИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

Необходимость использования компьютерных технологий в комплексных работах, связанных с оценкой теплового состояния сталеплавильных ковшей во время внепечной обработки стали является одной из задач, поставленной на кафедре теплотехнических и энергетических систем в 2004 – 2005 годах. АПК является промежуточным звеном между агрегатом выплавки стали и машиной непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и работает в ритме крупного производственного цеха, таких как кислородно-конвертерный цех или электросталеплавильный цех ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Траектория движения ковша по цеху определяется химическим составом стали, времени, отведенного на ее обработку и загруженности агрегатов внепечной обработки. В производственных условиях возникают ситуации, в которых ни тепловое состояние, ни химический состав стали по объему ковша на момент начала обработки не известны. При этом неравномерность температурного поля расплава по массе достигает 40–50°С и данные локальных замеров разовой термпарой погружения не являются показательными для оценки средней температуры расплава. Это приводит к погрешностям в выполнении заданий по температуре и последующим проблемам при непрерывной разливке расплава на МНЛЗ. Для точного прогнозирования изменения температуры стали в ходе обработки на АПК необходимо определять статьи теплового баланса АПК в условиях, которые многие из этих статей невозможно корректно оценить. Так, например, невозможно точно определить тепловые потери через футеровку ковша и аккумуляцию тепла футеровкой во время обработки. Для устранения температурных градиентов по высоте расплава применяют перемешивание аргоном, подаваемым через пористые пробки в днище ковша, при этом эффективность продувки зависит не только от количества подведенного газа, но и от состояния пробок, наличия шлака на поверхности металла и его физического состояния. Так как эти характеристики невозможно измерить,

в условиях эксплуатации персонал для оценки качества перемешивания использует приблизительные оценки и терминологию «нечеткой логики» – «пробка дует хорошо/плохо», «перемешивание идет хорошо/плохо».

Анализ исследований, проведенных отечественными и зарубежными авторами, привел к пониманию невозможности создания универсальной модели, описывающей многообразие всех производственных процессов, и в итоге разработаны модели, алгоритмы и программный продукт, адаптируемый к условиям конкретного АПК на основе классических уравнений теплообмена и многофакторного анализа базы данных паспортов плавов по агрегату на длительном временном промежутке. С помощью программного продукта определяют тепловой баланс АПК на коротком периоде времени, среднюю температуру расплава, энергетические характеристики нагрева и обработки при различных исходных данных.

Модель выполнена в пакете Matlab в приложении Simulink, что определяет ее специфический интерфейс и особенности работы с ней (рис. 3).

Выполнение расчетов по разработанным алгоритмам выполняется средствами MS Excel и Simulink, сочетание которых позволяет выполнить решение любой задачи при моделировании теплового состояния тела.

Каждый из блоков, например блок расчета нагрева металла (рис. 4), выполняет комплекс локальных расчетов. В данной блоке исходными данными является количество тепла, затраченное на нагрев расплава, которое рассчитывается по формуле

$$Q_1 = (Q_2 + Q_3) - Q_4,$$

где Q_2 – суммарное количество тепла, полученное в результате нагрева электрической дугой и окисления электродов, Дж; Q_3 – тепловой эффект химических реакций, Дж; Q_4 – суммарные потери тепла, Дж.

Расчет температуры металла, которая пересчитывается каждую секунду, выполняется по формуле

$$t_i = t_{i-1} + \frac{Q_1}{c},$$

где t_{i-1} – температура расплава в предыдущий момент времени, в начале расчета температура равна приходной температуре металла, отраженной в паспорте плавки: $t_{01} = t_{pas}$; c – теплоемкость стали, Дж/кг·К.

В качестве примера организации отдельных блоков расчета приведен блок «Приход тепла от окисления электродов» (рис. 5).

В блоке рассчитывается приход тепла от окисления электродов в течение всех нагревов. При сгорании 1 кг графита выделяется 33520 кДж тепла, а расход электродов составляет 0,008 кг/кВт·ч затраченной на горение дуги электроэнергии. Во время работы электродовой установки происходит окисление электродов с коэффициентом прихода тепла 0,074 Дж/Дж.

Расчет прихода тепла в каждый момент времени ведется по этому уравнению в зависимости от электрической мощности установки, связанной со ступенью трансформатора, используемой при нагреве. На рис. 5 показана динамика изменения потока тепла при различных ступенях (столбцы). В результате расчета в окне «Приход тепла от окисления электродов» показывается суммарное количество тепла по этой статье прихода – за весь период обработки.

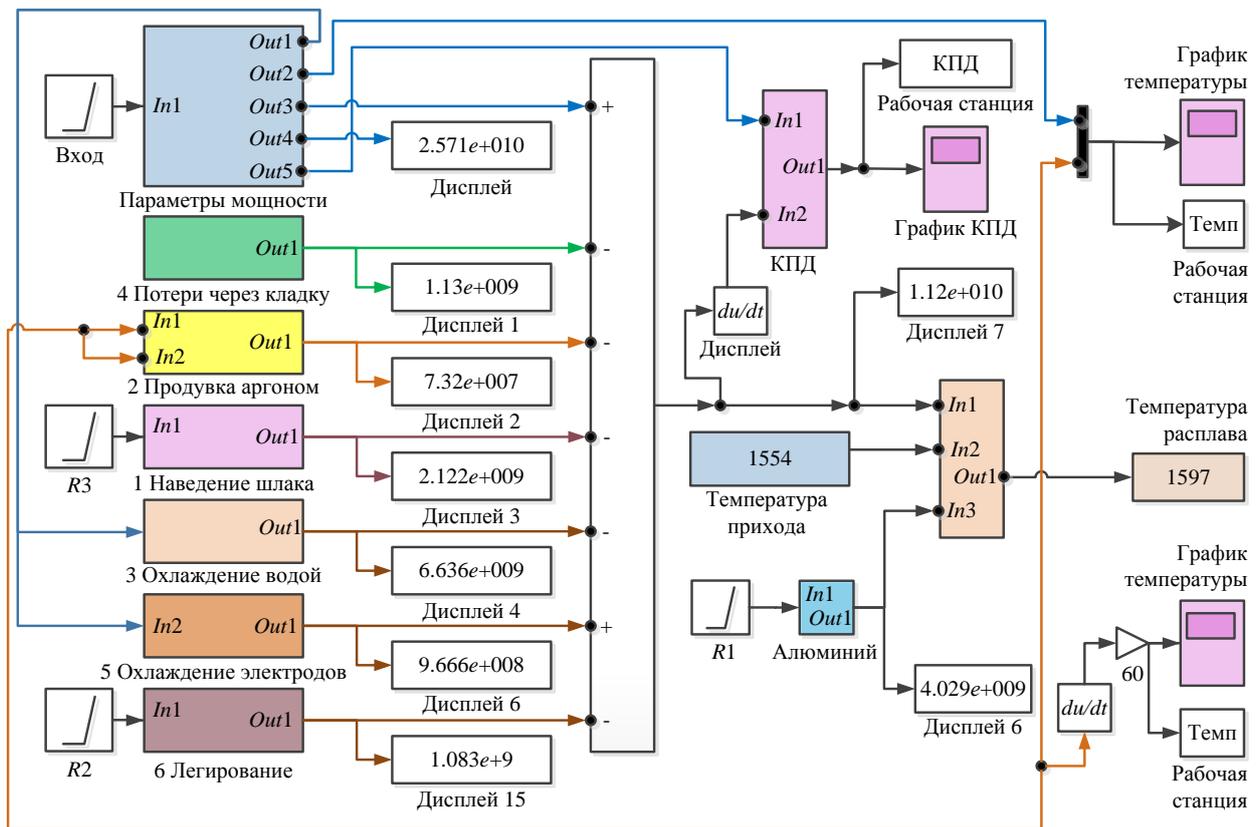


Рис. 3. Общий вид программы расчета теплового баланса АПК

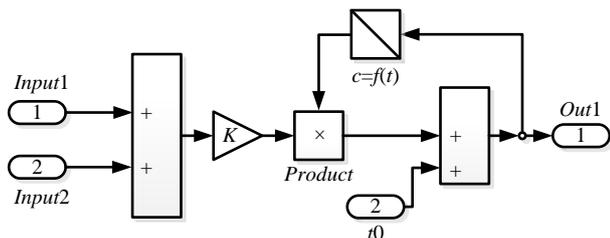


Рис. 4. Схема блока «Нагрев металла»: $K=1/m$, m – масса металла в ковше, кг

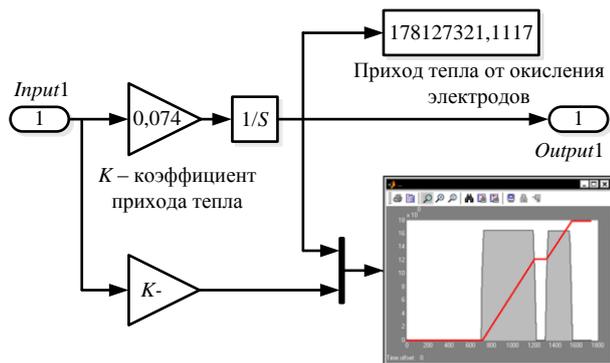


Рис. 5. Структура блока «Приход тепла от окисления электродов»

Использование программного продукта позволило оценить влияние эффективности нагрева расплава на разных этапах технологических операций, осуществляемых в АПК, и выдать рекомендации по совершенствованию технологии нагрева.

На выходе из блока отражается график температуры расплава и окно, в котором температура отражена в численном виде, рассчитанная в данный момент времени.

Количество факторов, влияющих на качество конечной продукции, может достигать 20, но все они имеют разное «весовое значение». Предварительно проведен анализ базы данных 20 тысяч паспортов плавков на АПК, который позволил оценить влияние этих факторов на процессы термодинамики, тепломассообмена и кинетики, и интегрировать результаты анализа в виде корректирующих коэффициентов в отдельные блоки программы.

Другим направлением исследования явилась оценка влияния интенсивности продувки на гидродинамику расплава и тепломассообмен. На основе результатов вычисленного эксперимента на основе моделирования разработаны режимы продувки с переменным изменением расхода аргона на пористые пробки, позволяющие количественно оценить эффективность перемешивания расплава и выравнивания температуры по массе. Результаты проведенных исследований реализованы в промышленных условиях.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕПЛОГО СОСТОЯНИЯ БЕСКОНЕЧНЫХ ТЕЛ: ПСЕВДО- И КВАЗИДИНАМИКА

Распространенность тепловых явлений в производственных процессах привело к поэтапному развитию математических моделей, целью которых является увеличение размерности, приводящее к повышению точности моделирования. Наиболее известными являются одномерные модели, содержащие одну пространственную координату, и двухмерные, содержащие две пространственные координаты. В работах Самойловича Ю.А. [14] доказано, что при соотношении геометрических размеров сечения 1:4 достаточно использовать одномерную математическую модель. Введем

понятия, определяющие характеристики указанных моделей:

– псевдодинамическая модель – это математическая модель, в которой происходит идеализация тепловых процессов и производится расчет температурного поля внутри отрезка по геометрической оси тела в различные моменты времени (рис. 6, 7);

– квазидинамическая модель – это математическая модель, в которой определение температурного поля производится внутри сечения в разные моменты времени (рис. 8).

Каждая из указанных псевдодинамических моделей имеет ряд допущений и ограничений, которые позволяют экономить вычислительные ресурсы и время расчета температурных полей. Каждый вычислительный эксперимент, проводимый с использованием указанных моделей, требует обоснования выбранной вычислительной схемы, сходимости вычислительных процессов [2, 12].

Однако, псевдодинамика математических моделей оставляет нерешенной проблему учета теплопереноса по длине бесконечно протяженного тела при изменении его объема. Для решения указанной проблемы и вводится понятие квазидинамической модели на третьем шаге эволюции. Этот шаг требует дискретного представления сплошного тела в виде множества дискретизированных тел конечного объема, которые изменяют свою координату вдоль оси аппликат. При этом образуется три взаимосвязанные упорядоченные

области Z_0, Z_{+1}, Z_{-1} (рис. 8), каждая из этих областей определяет тепловое состояние фрагмента в текущий, предшествующий и последующий момент времени. Каждый элемент представляет собой цилиндр (в общем смысле геометрического понятия, рис. 8), из которых формируется полный объем тела. Для описания теплового состояния каждого объемного элемента используется уравнение теплопроводности для трех пространственных координат в заданный момент времени. Граничные условия задаются для каждого i -ого сегмента, составляющего объем всего тела (рис. 9). Граничные условия задаются для каждой грани в соответствии с классической теорией теплопроводности, изложенной в [3, 5]. Для начального момента времени поле распределения температур задается на основе эмпирических данных, для каждого последующего момента времени по результатам расчета на предыдущем сегменте. Как правило, граница поверхности $A_{2i}A_{3i}B_{3i}B_{2i}$ является открытой и на это границе формируется граничное условие исходя из результатов расчета предыдущего шага.

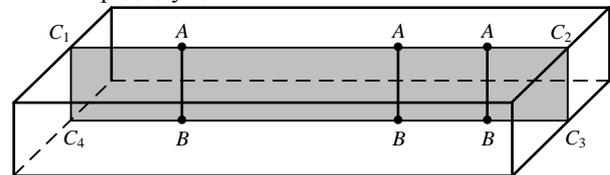


Рис. 6. Псевдодинамическая модель бесконечно протяженного тела

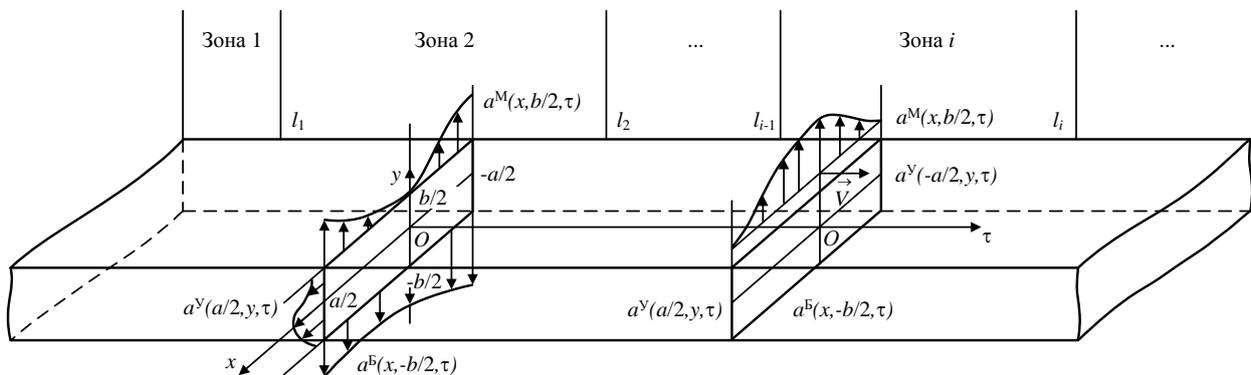


Рис. 7. Изменение положения сечения для обеспечения двухмерной псевдодинамики:

x, y – пространственные координаты для фиксированного сечения бесконечного тела, m ; τ – временная координата, s ; V – скорость движения фиксированного сечения тела, m/s ; a и b – геометрические размеры фиксированного сечения поперечного сечения тела, m ; $\alpha(x, y, \tau)$ – значение коэффициента теплоотдачи с поверхности тела, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$; индексы М, Б, У – обозначение граней тела

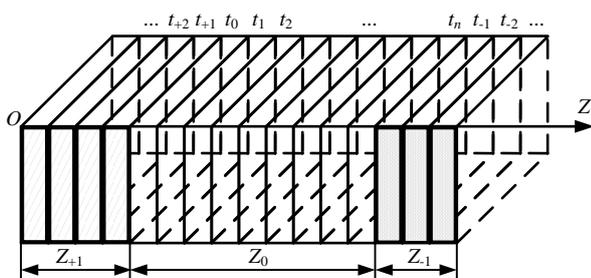


Рис. 8. Структура и схема перемещения фиксированного 3D-сечения бесконечно протяженного тела во времени

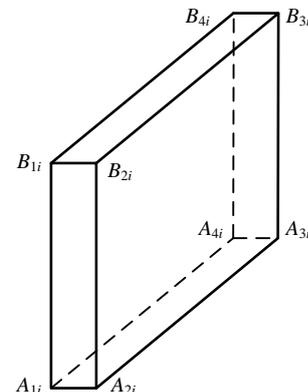


Рис. 9. Сегмент i -го слоя бесконечно протяженного тела

Таким образом, показано, что современные псевдо-динамические математические модели не позволяют выполнить моделирование теплового состояния тела при изменении его объема в динамике. Однако переход к квазидинамическим математическим моделям усложняет форму представления тела и вычислительные процессы, но приводит к более высокому приближению модели к реальному процессу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что тепловые процессы являются основополагающими и самыми распространенными в окружающем мире. На их основе описываются явления, протекающие при реализации металлургических переделов, таких как обработка стали в АПК, непрерывная разливка, нагрев заготовок в печах проходного типа, индукционный нагрев продукции метизной отрасли. Изучение этих процессов и прогнозирование их поведения наиболее рационально проводить по результатам математического моделирования, в основу которых положены классические основы тепло- и массопереноса.

2. Особенностью индукционного нагрева тел является сочетание и взаимодействие электромагнитных и тепловых процессов. Сложность математической модели требует использовать для ее реализации приближенные методы с использованием квадратурных формул.

3. При построении систем управления и разработки структуры информационного обеспечения для нагрева заготовок в методических печах проходного типа одной из важнейших частей становятся модули для расчета тепловых нагрузок, оптимальной траектории нагрева и прогнозирования теплового состояния заготовок.

4. Использование классических уравнений тепло-массообмена и многофакторного анализа для моделирования процессов в АПК позволило построить систему прогнозирования теплового состояния расплава с использованием современных программных обеспечений MATLAB, Excel Link 2.0, MS Excel.

5. Математические модели до настоящего времени остаются единственным средством исследования в условиях высокой загрязненности и высоких температур рабочих пространствах металлургических агрегатов. Построение новых видов моделей, учитывающих динамику во времени свойств и объема исследуемых тел, позволило совершить третий шаг эволюции в моделировании, раскрывая безграничные возможности для исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логунова О.С., Мацко И.И., Сафонов Д.С. Моделирование теплового состояния бесконечно протяженного тела с учетом динамически изменяющихся граничных условий третьего рода. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2012. № 27. С. 74-85.
2. Логунова О.С., Девятков Д.Х., Ячиков И.М. Математическое моделирование макроскопических параметров затвердевания непрерывных слитков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1997. №2. С. 49-51.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М., 1952.
4. Лыков А. В. Тепло- и массообмен при фазовых и химических превращениях // Тепло- и массообмен в процессах испарения / отв. ред. А. В. Лыков. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 7-14.
5. Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. М.: Металлургия, 1987. 224 с.
6. Журавлёв В.А., Колодкин В.М., Васькин В.В. Динамика двухфазной зоны металлических сплавов с химическими реакциями // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. 1983. Т.4. №4. С. 64-68.
7. Шестаков А.Л., Свиридюк Г.А. Новый подход к измерению динамически искаженного сигналов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2010. №16 (192), вып. 5. С. 116-120.
8. Белоусов М.Д., Шестаков А.Л. Метод самодиагностики термпреобразователя сопротивления в процессе работы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2009. №3. С. 17-19.
9. Сафонов Д.С., Логунова О.С. Автоматизация проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №1. С. 110-125.
10. Сафонов Д.С., Логунова О.С. Структура интерактивной системы автоматизированного проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2014. № 2 (5). С. 75-81.
11. Тутарова В.Д., Сафонов Д.С. Выбор рациональной схемы расстановки форсунок в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2013. №1(3). С. 76-81.
12. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. and etc. all Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. DOI: 10.1007/s00170-015-6934-4.
13. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A. and etc. all Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 74. Iss. 9. Pp. 1407-1418.
14. Применение математических моделей для исследования процессов затвердевания и охлаждения непрерывных стальных слитков прямоугольного поперечного сечения / Самойлович Ю.А. и др. // Непрерывная разливка стали: сб. М.: Металлургия, 1974. 314 с.
15. Guseva E. N, Efimova I.Yu., Varfolomeeva T.N. Mochan I.N. Discrete event simulation modelling of patient service management with Arena International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 // IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Phys-ics: Conf. Series 1015 (2018). URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032095/pdf>.
16. Гусева Е.Н. Методика преподавания дисциплины «Имитационное моделирование» у бакалавров прикладной информатики // Электротехнические системы и комплексы. 2015. №1(26). С. 48-51.
17. Гусева Е.Н., Варфоломеева Т.Н. Применение имитационных моделей для решения экономических задач оптимизации // Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. С. 200-206.
18. Баранкова, И.И. Влияние индукционного способа нагрева на качество термообработки калиброванной стали в бунтах / И.И. Баранкова // Электрометаллургия. 2009. №3. С. 26-40
19. Barankova I.I, Demidovich V.B., Sit'ko P.A. Increase in the Efficiency of Induction Heating during Heat Treatment of Wires // Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2012. No. 6. Pp. 552-557.

20. Баранкова И.И. Определение эффективного электрического сопротивления бунтов проволоки // *Электричество*. 2010. № 2. С. 79-84
21. Баранкова И.И., Коринченко Г.М. Определение тепловых физических параметров анизотропных тел на основе решения обратных задач // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2009. №3. С. 35-39.
22. Оптимальные топливосберегающие режимы нагрева непрерывнолитых заготовок в методических печах / Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Жадинский Д.Ю. [и др.] // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2015. №3. С.89-96.
23. Генкин А.Л., Власов С.А., Масальский Я.С. Возможности энергосберегающего управления листопркатным комплексом // *Автоматизация в промышленности*. 2003. №3. С.44-47.
24. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Система оптимального управления тепловым режимом промышленных печей // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2013. №2. С.18-29.
25. Андреев С.М. Прогнозирование времени нагрева заготовок в условиях нестационарного режима работы методических печей // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. №3(36). С. 35-39.
26. Zhu H., Wen Z., Wang X., Xu H., Tao S. Application of optimization technology for ratio of air to fuel combining feedforward with feedback in heating furnace // *J Therm Sci*. 2002. Vol. 11(3). Pp. 271–276.

Поступила в редакцию 18 марта 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MATHEMATICAL MODELS FOR INVESTIGATION OF THE HEAT CONDITION OF OBJECTS AND HEAT PROCESSES CONTROL

Oksana S. Logunova

D.Sc. (Engineering), Professor, Director of the Institute, Civil Engineering, Architecture and Arts Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Logunova66@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

Galina N. Chusavitina

Ph.D. (Pedagogics), Professor, Head of the Department, Department of Business Computing and IT, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: gn.chusavitina@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2468-7519>

Sergey M. Andreev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Department of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: andreev.asc@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0735-6723>

Evgeniy B. Agapitov

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Department of Heat and Power Engineering Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: jek_agapitov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5643-4225>

Inna I. Barankova

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Department of Computer Science and Cyber security, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Inna_Barankova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6077-6164>

The purpose of the study is the systematization of problems related to the study of the thermal state of objects and melts in industrial production and ways to solve them. In particular, the problems characteristic for a metallurgical enterprise are: mathematical modeling of electromagnetic fields in systems for induction heating of the hardware industry; development of information support for an energy-saving mode of heating billets before rolling in a continuous-type heating furnace; application of the basis of the classical equations of heat and mass transfer and multivariate analysis to simulate the processes in the ladle furnace unit; development of pseudo-dynamic and quasidynamic models describing the thermal state of an infinitely extended object. All these tasks have a thermal nature and despite the difference in the objects of study, they use mathematical models to study the thermal state of objects and control thermal processes. The implementation of mathematical models is made using modern computer software. All studies were conducted by scientific schools of the Nosov Magnitogorsk State Technical

University and were extensively tested and implemented in operating production facilities.

Keywords: heat processes, mathematical model, control of heat processes, simulation modeling, thermal state of the object, melting facilities, pseudo- and quasi-dynamics.

REFERENCES

1. Logunova O.S., Matsko I.I., Safonov D.S. Simulation of thermal state of an infinite body taking into account dynamically changing boundary conditions of the third order. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye* [Bulletin of the South-Ural state University. Series: Mathematical simulation and programming]. 2012, no. 27, pp. 74-85. (In Russian)
2. Logunova O.S., Devyatov D.H., Yachikov I.M. Mathematical simulation of macroscopic parameters of hardening of continuously cast ingots. *Izvestiya vysshikh uchenykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of universities. Ferrous

- metallurgy]. 1997, no. 2, pp. 49-51. (In Russian)
3. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Thermal conductivity theory]. Moscow, 1952. (In Russian)
 4. Lykov A.V. Heat and mass transfer during phase and chemical transformations. *Teplo- i massoobmen v protsessakh ispareniya* [Heat and mass transfer in evaporation processes] / Editor-in-chief A.V. Lykov. M.: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1958, pp. 7-14. (In Russian)
 5. Borisov V.T. *Teoriya dvukhfaznoy zony metallichesкого slitka* [Theory of the two-phase region of metal ingot]. Moscow: Metallurgy, 1987. 224 p. (In Russian)
 6. Zhuravlev V.A., Kolodkin V.M., Vaskin V.V. Dynamics of the two-phase region of metal alloys with chemical reactions. *Izv. AN SSSR* [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR]. Series. Metals. 1983, vol. 4, no. 4, pp. 64-68. (In Russian)
 7. Shestakov A.L., Sviridyuk G.A. New approach to measuring of dynamically distorted signals. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye* [Bulletin of the South-Ural state university. Series: Mathematical simulation and programming]. 2010. no. 16(192), Issue 5. pp. 116-120. (In Russian)
 8. Belousov M.D., Shestakov A.L. Self-diagnostics test of the resistance temperature device during operation. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompyuternye tehnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South-Ural state university. Series: Computer technology, control, radio electronics]. 2009, no. 3, pp. 17-19. (In Russian)
 9. Safonov D.S., Logunova O.S. Computer-aided engineering of design of secondary cooling section of a continuous casting machine. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 1, pp. 110-125. (In Russian)
 10. Safonov D.S., Logunova O.S. Structure of the interactive system of computer-aided engineering of design of secondary cooling sections of a continuous casting machine. *Matematicheskoe i programnoye obespecheniye sistem v promyshlennoy i sotsialnoy sferah* [Mathematical software of systems in industry and social sphere]. 2014, no. 2(5), pp. 75-81. (In Russian)
 11. Tutarova V.D., Safonov D.S. Choice of the rational scheme of nozzle distribution in the secondary distribution zone of CCM. *Matematicheskoe i programnoye obespecheniye sistem v promyshlennoy i sotsialnoy sferah* [Mathematical software of systems in industry and social sphere]. 2013, no. 1 (3), pp. 76-81. (In Russian)
 12. Parsunkin, B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. and etc. all Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. DOI: 10.1007/s00170-015-6934-4.
 13. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A. and etc. all Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, vol. 74, Iss. 9, pp. 1407-1418.
 14. Samoilovich Yu.A. Making use of mathematical models for investigation of processes of hardening and cooling of continuously cast steel rectangular billets. In the collection of scientific papers *Nepreryvnaya razlivka stali* [Continuous casting of steel]. Mocsow: Metallurgy, 1974. 314 p. (In Russian)
 15. Guseva E.N., Efimova I.Yu., Varfolomeeva T.N. Mochan I.N. Discrete event simulation modelling of patient service management with Arena International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018. IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Phys-ics: Conf. Series 1015 (2018). URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032095/pdf>
 16. Guseva E.N. Teaching methodology of "Simulation Modeling" course for bachelor students majoring in applied information science. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2015, no. 1 (26), pp. 48-51. (In Russian)
 17. Guseva E.N., Varfolomeeva T.N. Application of simulation models to solve optimization problems in economics. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Current problems of science and education]. 2014, no. 6, pp. 200-206. (In Russian)
 18. Barankova I.I. Influence of induction heating on the quality of heat treatment of calibrated steel in coils. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2009, no. 3, pp. 26-40. (In Russian)
 19. Barankova I.I., Demidovich V.B., Sit'ko P.A. Increase in the Efficiency of Induction Heating during Heat Treatment of Wires. *Russian Metallurgy* (Metally), vol. 2012, no. 6, pp. 552-557.
 20. Barankova I.I. Calculation of effective electrical resistance of wire coils. *Elektrichestvo* [Electricity], 2010, no. 2, pp. 79-84. (In Russian)
 21. Barankova I.I., Korinchenko G.M. Calculation of thermophysical parameters of anisotropic bodies on the basis of solution of inverse problems. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009, no. 3, pp. 35-39. (In Russian)
 22. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinskiy D.Yu. and others. Optimum fuel-saving modes of heating continuously cast slabs in holding furnaces. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 89-96. (In Russian)
 23. Genkin A.L., Vlasov S.A., Masalskiy Ya.S. Feasibility of energy-saving control of a sheet rolling mill. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in industry]. 2003, no. 3, pp. 44-47. (In Russian)
 24. Andreev S.M. Parsunkin B.N. System of optimum control of thermal mode of industrial furnaces. *Mashinostroeniye: setevoye elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Machine building: network scientific journal]. 2013, no. 2, pp. 18-29. (In Russian)
 25. Andreev S.M. Forecasting of heating time of billets in terms of nonstationary operating mode of holding furnaces. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2017, no. 3(36), pp. 35-39. (In Russian)
 26. Zhu H., Wen Z., Wang X., Xu H., Tao S. Application of optimization technology for ratio of air to fuel combining feedforward with feedback in heating furnace. *J Therm Sci*. 2002, vol. 11(3), pp.271-276.

Логунова О.С., Агапитов Е.Б., Баранкова И.И., Андреев С.М., Чусавитина Г.Н. Математические модели для исследования теплового состояния тел и управления тепловыми процессами // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2(43). С. 25-34. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-25-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-25-34)

Logunova O.S., Agapiov E.B., Barankova I.I., Andreev S.M., Chusavitina G.N. Mathematical Models for Investigation of the Heat Condition of Objects and Heat Processes Control. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 25-34. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-25-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-25-34)

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.313.3, 621.313-57, 621.311, 621.311.001.57

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-35-42)

Захарова А.А., Комков А.Н.

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина

МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГОЛОВНЫХ АГРЕГАТОВ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩЕЙ СТАНЦИИ

В данной статье рассмотрены вопросы, связанные с реализацией группового самозапуска электроприводов головных насосных агрегатов на нефтеперекачивающей станции. Поскольку нефтеперекачивающие станции относятся к объектам повышенной опасности, для них эта проблема стоит особенно остро из-за жестких требований к непрерывности процессов трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. Проведены исследование и моделирование самозапуска группы электроприводов смешанного состава в программном комплексе ЕТАР для действующей нефтеперекачивающей станции. Рассмотрена задача обеспечения самозапуска электродвигателей именно большой единичной мощности с целью изучения также их взаимного влияния друг на друга. В результате проведения многократных модельных экспериментов определены значения напряжений статической устойчивости и время динамической устойчивости электротехнической системы предприятия. На основании полученных данных построена граница динамической устойчивости системы, определены оптимальные условия реализации группового самозапуска, соблюдение которых позволяет обеспечить бесперебойную работу нефтеперекачивающих станций при провалах напряжения в системе внешнего электроснабжения. Особое внимание уделено оценке уставок и селективности существующих устройств релейной защиты и автоматики, поскольку только при их корректной отстройке самозапуск позволяет расширить область устойчивой работы электротехнической системы и сохранить электроприводы магистральных насосных агрегатов в работе после нарушений электроснабжения. На основе проведенного анализа предложен вариант исполнения защиты минимального напряжения, учитывающий все особенности осуществления самозапуска электроприводов смешанного состава на рассматриваемой нефтеперекачивающей станции, значительно отличающийся от общепринятого для таких объектов, но позволяющий в полной мере использовать запас устойчивости электротехнической системы. Установлено отсутствие скачкообразного изменения времени динамической устойчивости для электротехнической системы смешанного состава с электроприводами большой единичной мощности при сопоставимых мощностях асинхронной и синхронной двигательной нагрузки. Точка бифуркации на границе динамической устойчивости при этом сохраняется.

Ключевые слова: самозапуск, электротехническая система смешанного состава, нефтеперекачивающая станция, устойчивость, синхронный электродвигатель, асинхронный электродвигатель, защита минимального напряжения, моделирование, автоматический ввод резерва, ПК ЕТАР.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в состав магистрального нефтепровода входят головные сооружения, линейная часть, промежуточные нефтеперекачивающие станции (НПС), конечные пункты и нефтебазы [1, с. 63]. Основная функция промежуточных станций заключается в поддержании давления нефти на линейном участке трубопровода. В случае выхода из строя одной такой станции на остальные «соседние» промежуточные станции нагрузка, соответственно, повышается. Стоит отметить, что данная ситуация носит непредсказуемый характер, поскольку отключение всего одной станции может спровоцировать срабатывание автоматической защиты по давлению на ближайших станциях, что приведет уже к их отключению. Важно подчеркнуть, что такую защиту по давлению устанавливают непосредственно в схемы управления насосными агрегатами, благодаря чему осуществляется контроль давления во всех точках технологической схемы [2, с. 56-57]. В дальнейшем ситуация будет развиваться таким образом, что нагрузка будет продолжать увеличиваться, и возможно последовательное «веерное» отключение большинства промежуточных станций. Безусловно, даже если остановятся все промежуточные станции, это не остановит перекачку нефти при нормально функционирующей головной насосной станции, однако неблагоприятные последствия

такой ситуации могут значительно повлиять на сроки поставок плановых объемов нефти. Также необходимо обратить внимание на то, что рост числа гидравлических ударов нефти при таких условиях повлечет за собой образование трещин в стенках трубопровода.

В данной статье рассматривается ситуация, в которой отключение магистрального насосного агрегата вызвано неудачно реализованным самозапуском электроприводов насосов. Поскольку давление нефти на выходе прямо пропорционально квадрату скорости вращения центробежных насосов, участвующих в процессе перекачки нефти, то самозапуск позволяет сохранить насос в работе во время провала напряжения и выйти на рабочий режим после восстановления уровня напряжения. Суть процесса самозапуска состоит в том, что восстановление уровня напряжения приходится на ещё выбегающий двигатель, при этом сохраняется связь с системой электроснабжения. За счет наличия начальной скорости такой двигатель гораздо быстрее разгонится до номинальной скорости, что предпочтительно, учитывая зависимость уровня давления в трубопроводе от скорости вращения ротора [3, с. 5]. Но при этом стоит отметить, что после глубокого провала напряжения время самозапуска из-за взаимного влияния электроприводов может быть ещё больше, чем при пуске. Необходимо также учитывать тот факт, что на НПС в качестве приводов центробежных насосов часто используются электродвигатели смешанного состава большой единичной

мощности. Это связано с эффективностью совместной работы синхронных и асинхронных двигателей, так как синхронные электродвигатели (далее СД) позволяют повысить энергетические показатели. Поэтому при решении задачи реализации самозапуска нужно учитывать вид границы динамической устойчивости двигателей, участвующих в этом процессе. Разнородность электродвигательной нагрузки определяет условия группового самозапуска. Это вызвано тем, что асинхронные двигатели (далее АД) обладают хорошими показателями динамической устойчивости, в отличие от синхронных, которые не выдерживают глубоких провалов напряжения и сразу же выпадают из синхронизма. С другой стороны, АД уступают СД при незначительных, но длительных провалах напряжения, из-за квадратичной зависимости электромагнитного момента от напряжения. Кроме того, при групповом самозапуске нужно учитывать ещё и влияние, оказываемое электродвигателями друг на друга [4]. Так, например, при снижении напряжения питающей сети ниже некоторого значения асинхронные двигатели, для которых эта величина близка к границе их статической устойчивости, начинают тормозиться, за счет чего значительно увеличивается потребляемый ими ток, что провоцирует дальнейшее снижение напряжения на шинах остальных двигателей. Это может привести к переходу на пусковой участок механической характеристики тех двигателей, которые ещё удерживались в работе. Дальнейшее снижение напряжения приводит к «лавине» напряжения [5, с.122-123].

Таким образом, для осуществления группового самозапуска требуется комплексный подход и соблюдение множества условий, определение которых являлось целью проведенного исследования.

ОБЪЕКТ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для успешного самозапуска электроприводов смешанного состава на НПС нужно определить оптимальные уставки устройств релейной защиты и автоматики системы [6]. Для этого необходимо построить экспериментальную границу динамической устойчивости при естественном поведении электротехнической системы, то есть без учета работы релейной защиты и автоматики. Данная граница при этом наглядно показывает области возможного и потенциально успешного самозапуска. Таким образом, уставки будут учитывать параметры электротехнической системы, что позволит приблизить её поведение к поведению в естественных условиях и в большей степени использовать запас динамической устойчивости.

Объектом исследования является действующая НПС, электротехническая система (далее ЭТС) которой содержит разнородную электродвигательную нагрузку смешанного состава большой единичной мощности: АД серии 5А, номинальная мощность каждого из которых составляет 5 МВт, и СД серии СТД номинальной мощностью по 6,3 МВт каждый. Схема ЭТС представлена на рис. 1. На каждой секции шин один из двигателей является резервным согласно режимам перекачки данной НПС. Помимо электродвигателей приводов центробежных насосов в состав каждой секции дополнительно входит низковольтная электродвигательная нагрузка. На обоих вводах нагрузка идентична, и в связи с этим одна цифровая модель используется для обоих вводов, что позволяет сократить время на экспериментальную часть.

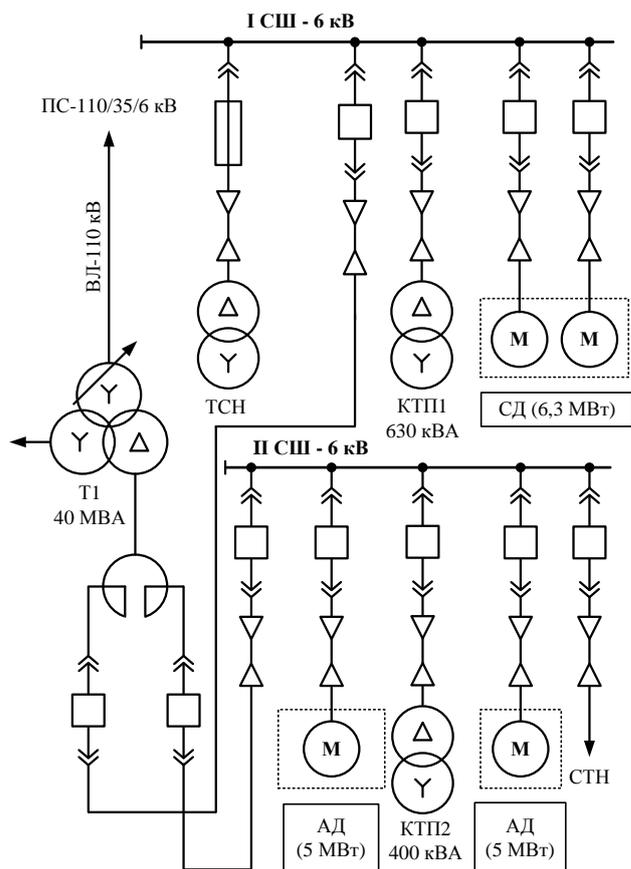


Рис. 1. Схема 1-го ввода электротехнической системы нефтеперекачивающей станции

ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ

В качестве среды моделирования выбран программный комплекс ЕТАР. Данный программный комплекс содержит в себе ряд модулей, предназначенных для анализа электромеханических переходных процессов. В основе расчетов лежит метод Ньютона-Рафсона. Асинхронные двигатели представлены Т-образной схемой замещения. Параметры АД главного электропривода представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики асинхронных двигателей

Тип	5А3МВ-5000	5АМ315МА2	5АМ280S2
Параметры	Значение	Значение	Значение
Номинальная мощность, кВт	5000	200	110
Номинальное напряжение, кВ	6	0,38	0,38
Частота вращения, мин ⁻¹	2985	2970	2965
Коэффициент мощности	0,9	0,93	0,92
КПД, %	97,3	95,0	93,5
Кратность максимального вращающего момента, о. е.	2,7	2,7	2,3
Кратность пускового вращающего момента, о. е.	0,8	1,8	1,6
Кратность пускового тока, о. е.	7,0	8,0	6,5

На этой платформе построена цифровая модель электротехнической системы рассматриваемой НПС. Система внешнего электроснабжения представлена моделью «ЭДС за сопротивлением» и включает источник синусоидального напряжения 110 кВ мощностью короткого замыкания 481,3 МВА, что эквивалентно реактансу системы $x_c=24,3$ Ом. Сопротивление системы установлено до зажимов трансформатора Т1 и содержит в себе сопротивление воздушной линии, подходящей к НПС. Электротехническая система связана с питающей энергосистемой через понижающий трансформатор Т-1 ТДТН-40000/110. Технические характеристики трансформатора представлены в **табл. 2**. Обмотки низшего напряжения (6 кВ) трансформатора связаны с секциями шин через реакторы типа РТСТ 6-4000-0,18, технические характеристики которого представлены в **табл. 3**.

Электротехническая система содержит четыре секции шин 6 кВ, I и II относятся к первому вводу. Как уже упоминалось выше, на I и III, а также на II и IV секциях шин нагрузка одинаковая, в связи с этим представлена подробная информация только по I и II секциям.

Таблица 2
Технические характеристики трансформатора ГПП

Тип	ТДТН-40000/110	
Параметры	Значение	
Номинальная мощность, кВА	40000	
Номинальное напряжение обмоток, кВ	ВН	115
	СН	38,5
	НН	6,6
Схема и группа соединения обмоток	Yн/Yн/Δ-0-11	
Потери холостого хода, кВт	В-С	30
	В-Н	30
	В-С	30
Потери короткого замыкания, кВт	В-С	200
	В-Н	200
	В-С	200
Напряжение короткого замыкания, %	В-С	10,5
	В-Н	17,5
	С-Н	6,5
Ток холостого хода, %	0,23	
Сопротивление между выводами ВН-СН, %	10,5	
Сопротивление между выводами ВН-НН, %	17,5	
Сопротивление между выводами СН-НН, %	6,5	

Таблица 3
Технические характеристики реактора РТСТ 6-4000-0,18

Параметры	Значение
Напряжение сети, кВ	6
Номинальный ток, А	4000
Номинальное индуктивное сопротивление, Ом	0,18
Ток термической стойкости, кА (6 с)	32,1
Ток электродинамической устойчивости, кА	81,9

К первой секции шин (I СШ) присоединены:

- трансформатор собственных нужд (ТСН) ТМГ-40/6 (технические характеристики трансформатора ТМГ-40/6 представлены в **табл. 4**);
- комплектная трансформаторная подстанция (КТП-1), в составе которой трансформатор типа ТМГ-630/6 (технические характеристики трансформатора ТМГ-630/6 представлены в **табл. 4**);
- два синхронных двигателя серии СТД номинальной мощностью по 6300 кВт каждый (технические характеристики синхронных двигателей представлены в **табл. 5**).

Ко второй секции шин (II СШ) присоединены:

- два асинхронных двигателя серии 5 А, номинальная мощность каждого из которых составляет 5000 кВт (технические характеристики асинхронных двигателей представлены в **табл. 1**),
- комплектная трансформаторная подстанция (КТП-2), в составе которой трансформатор типа ТМГ-400/6 (технические характеристики трансформатора ТМГ-400/6 представлены в **табл. 3**).

Таблица 4

Технические характеристики трансформаторов ТП

Тип	ТМГ-400/6		ТМГ-630/6		ТМГ-40/6	
Параметры	Значение		Значение		Значение	
Номинальная мощность, кВА	400		630		40	
Номинальное напряжение обмоток, кВ	ВН	6	ВН	6	ВН	6
	НН	0,4	НН	0,4	НН	0,4
Схема и группа соединения обмоток	Δ/Yн-11		Δ/Yн-11		Δ/Yн-11	
Потери холостого хода, кВт	0,78		1,07		0,16	
Потери короткого замыкания, кВт	5,5		7,6		0,88	
Напряжение короткого замыкания, %	4,5		5,5		4,5	
Ток холостого хода, %	1,4		1,0		2,8	

Таблица 5

Технические характеристики синхронных двигателей

Параметры	Значение
Номинальная мощность, кВт	6300
Номинальное напряжение, кВ	6
Частота вращения, мин ⁻¹	3000
КПД, %	97,6
Индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси, %	218
Индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси, %	218
Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси, %	26,4
Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси, %	26,4
Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси, %	14,9
Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси, %	15,2
Переходная постоянная времени, с	6,03

Все двигатели в нормальном режиме работают с коэффициентом загрузки по активной мощности, равным 90%, и нагружены на одинаковые механизмы с вентиляторным моментом сопротивления.

КТП-1 представлена статической нагрузкой величиной 126 кВА и двигательной нагрузкой – 189 кВА. В качестве эквивалентной двигательной нагрузки выбран двигатель серии 5AM315MA2 (основные технические данные представлены в табл. 1).

КТП-2 представлена статической нагрузкой 80 кВА, двигательной нагрузкой 120 кВА. В качестве эквивалентной двигательной нагрузки выбран двигатель серии 5AM280S2 (основные технические данные представлены в табл. 1).

Модель ЭТС состоит из общепринятых схем замещения. Особенностью исследованной цифровой модели является наличие единичных АД и СД с близкими по значению мощностями и малой долей низковольтной нагрузки. Данная модель позволила установить поведение ЭТС смешанного состава при таком соотношении мощностей.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате серии модельных экспериментов определены значения показателей статической и динамической устойчивости ЭТС.

Установлено, что при снижении напряжения сети на 27% статическая устойчивость системы нарушается. Данная ситуация характеризуется переходом на пусковой участок механической характеристики всех АД и последующим выпадением из синхронизма СД. Как уже было упомянуто выше, после перехода АД на пусковой участок механической характеристики, синхронные могут оставаться в работе, поскольку их электромагнитный момент пропорционален напряжению, в отличие от АД, у которых он зависит от квадрата питающего напряжения. Но в данном случае, поскольку мощности СД и АД близки по своей величине, снижение напряжения на шинах за счет влияния асинхронного привода оказывает значительное влияние на работу нагрузки, состоящей из СД. Графики изменения тока АД и СД при снижении напряжения на 26 и 27% от номинальной величины представлены на **рис. 2** и **3** соответственно. Таким образом, напряжение статической устойчивости составляет $U_{c,y}=0,74$ о.е. или 74%.

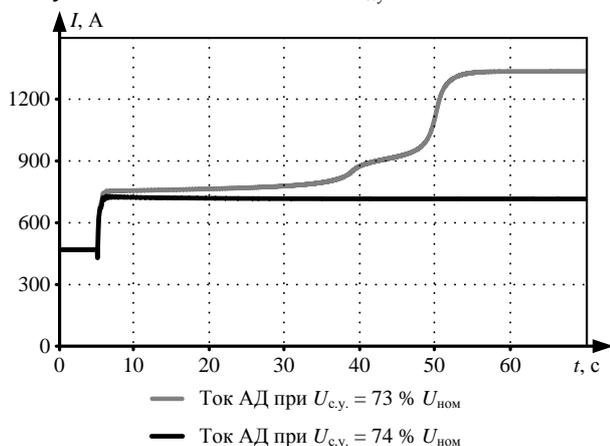


Рис. 2. График изменения тока АД при $U_{c,y} = 74\%$ и при $U_{c,y} = 73\%$

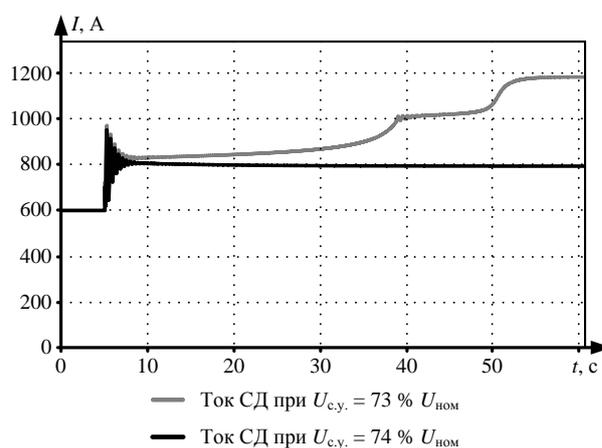


Рис. 3. График изменения тока СД при $U_{c,y} = 74\%$ и при $U_{c,y} = 73\%$

В результате моделирования в ПК ЕТАР определено, что время динамической устойчивости для данной ЭТС составляет $\tau_0=128$ мс. При прерывании напряжения длительностью 129 мс СД выпадает из синхронизма, что мы можем наблюдать на **рис. 4**, это является достаточным признаком для идентификации факта потери устойчивости. Возвращение к нормальному состоянию системы при этом возможно в следующем порядке: гашение поля в СД, потерявшем устойчивость; повторный разгон этой машины после восстановления нормального уровня напряжения до подсинхронной скорости; подача возбуждения и втягивание машины в синхронизм. В данной работе такая задача не рассматривалась.

Стоит отметить, что запас времени до выпадения двигателя из синхронизма определяется скоростью изменения угла Θ . Сама эта скорость для случая провала ЭДС до нуля определяется только инерционными свойствами электропривода [7, с. 204].

Также на **рис. 5** видно, что АД при перерыве электроснабжения продолжительностью 129 мс не переходит в пусковой режим, а через определённое время возвращается к нормальной работе. Это связано с тем, что в это же время СД выпадает из синхронизма и, в конце концов, останавливается, благодаря чему напряжение на шинах возрастает до номинальной величины, что позволяет АД вернуться к нормальной работе. Однако затянутость переходных процессов неблагоприятно скажется на состоянии асинхронных машин. Была также отключена синхронная составляющая электродвигательной нагрузки и определён запас динамической устойчивости отдельно для асинхронного привода. Результаты моделирования показали, что АД при отключении СД обладает абсолютной динамической устойчивостью, что для данной схемы аналогично пуску АД. Большая динамическая устойчивость объясняется тем, что при достаточно малом значении эквивалентного сопротивления питающей энергосистемы величина мощности энергосистемы значительно больше мощности единичного электропривода [8].

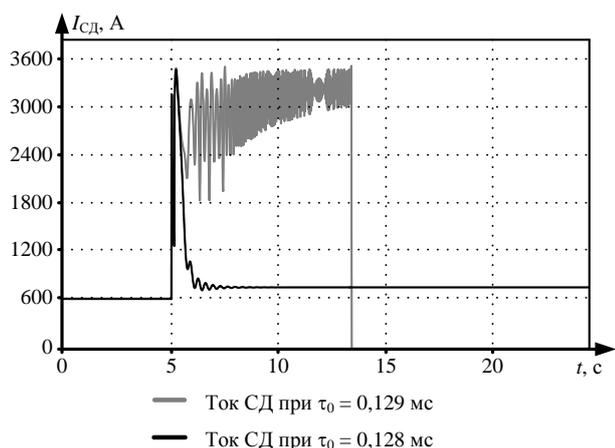


Рис. 4. График изменения тока СД при $\tau_0 = 128$ мс и при $\tau_0 = 129$ мс

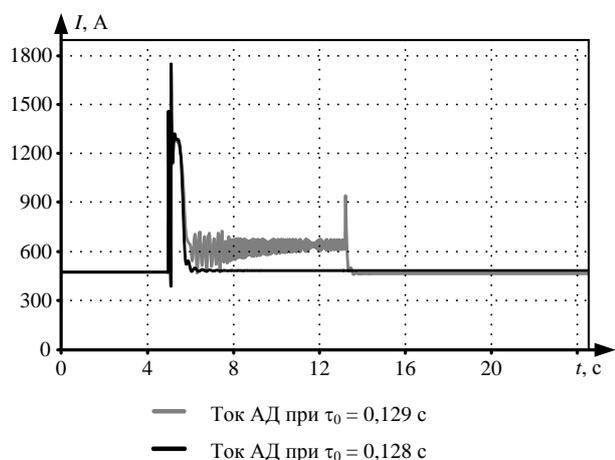


Рис. 5. График изменения тока АД ПРИ $\tau_0 = 128$ мс и при $\tau_0 = 129$ мс

Также установлено, что значительную составляющую в суммарный пусковой ток при восстановлении электропитания вносит ток СД. Это можно наглядно продемонстрировать графиком токов двигателей на границе динамической устойчивости (рис. 6).

На рис. 6 видно, что, несмотря на то, что мощности АД и СД по своей величине близки, после снижения напряжения до 10% продолжительностью 145 мс «бросок» тока СД (3411 А) почти в два раза превышает «бросок» тока АД (1719 А). Это объясняется тем, что при нормальном режиме работы ЭДС СД близка к величине напряжения сети и при выбеге её величина снижается медленнее, чем у АД, и в момент восстановления питания остаточная ЭДС у СД может оказаться весьма значительной.

По результатам моделирования построена граница динамической устойчивости для системы. Вид данной зависимости максимально допустимого времени перерыва в электроснабжении от величины остаточного напряжения представлен на рис. 7. Результаты моделирования отображены в табл. 6.

Характерной особенностью границы динамической устойчивости для системы смешанного состава считается отсутствие непрерывности: граница динамической устойчивости распадается на две ветви, причём переход с одной ветви на другую происходит скачком, то есть имеется точка бифуркации.

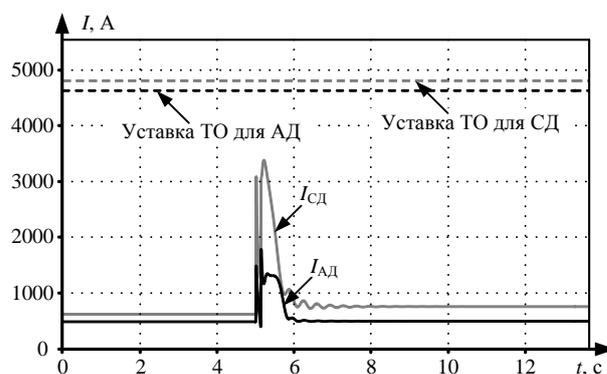


Рис. 6. Сравнение уставок токовых отсечек (ТО) АД и СД в условиях самого тяжёлого самозапуска

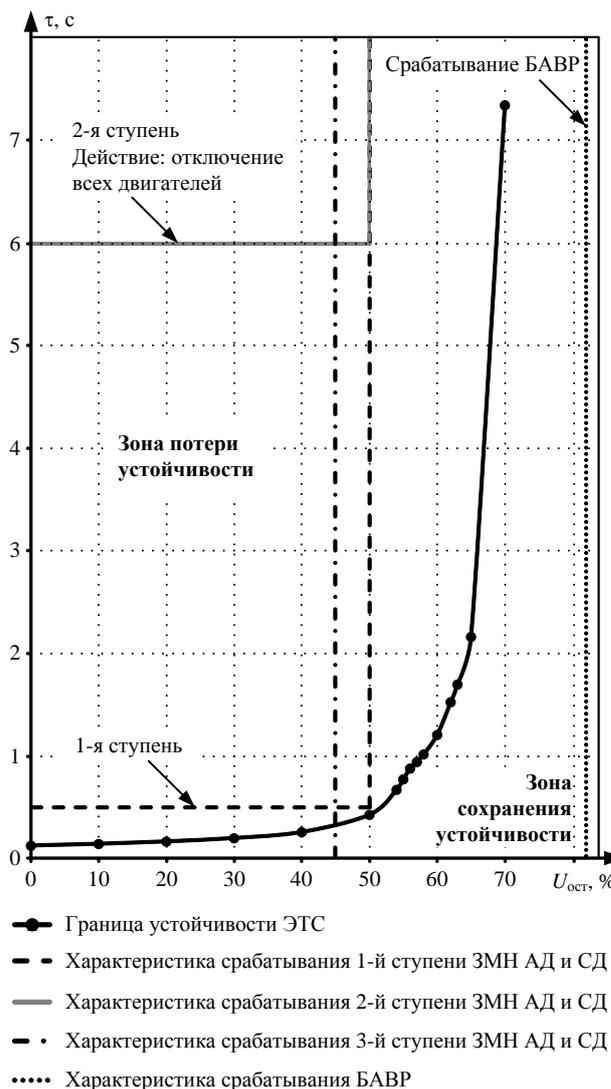


Рис. 7. Характеристика защиты минимального напряжения до корректировки её параметров

Это объясняется различной физикой процессов, приводящих к потере устойчивости при различных значениях остаточного напряжения. Так, при малых значениях остаточного напряжения потеря динамической устойчивости обусловлена потерей устойчивости именно синхронного электропривода. При больших значениях остаточного напряжения устойчивость системы теряется в основном за счет нарушения устойчивости асинхронного электропривода [9].

Таблица 6
Результаты моделирования границы устойчивости

Остаточное напряжение $U_{c.у.}, \%$	Запас динамической устойчивости τ_0, c
0	0,128
10	0,145
20	0,168
30	0,201
40	0,260
50	0,429
54	0,673
55	0,775
56	0,880
57	0,944
58	1,018
60	1,208
62	1,527
63	1,699
65	2,163
70	7,345

Однако в рассматриваемой ЭТС такого скачкообразного изменения динамической устойчивости не наблюдается. Заметно только нарушение непрерывности кривой при остаточном напряжении в районе 56%. Мощности АД и СД близки по величине, доля низковольтной нагрузки незначительна, поэтому скачок отсутствует.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОРРЕКТИРОВКЕ УСТАВОК РЗИА

Следующий шаг после построения границы устойчивости – это корректировка уставок устройств релейной защиты и автоматики. Корректная настройка параметров защиты может помочь избежать многих ложных отключений двигателя [10].

Выполнена проверка уставок срабатывания токовых защит и защит от перегрузки двигателей на несрабатывание в области сохранения устойчивости. В противном случае возможны ложные срабатывания защит во время потенциально успешного самозапуска электродвигателей. Результаты моделирования показали, что уставки существующих токовых отсеков и защит от перегрузки отстроены корректно. Сравнение результатов моделирования с уставками срабатывания токовых отсеков представлено на рис. 6. Также было установлено, что только при нарушении статической устойчивости срабатывают защиты от перегрузки асинхронных и синхронных двигателей: защита от перегрузки АД срабатывает на 46,7-й секунде; защита от перегрузки СД срабатывает на 53,9-й секунде. Возникновение провала такой продолжительности маловероятно, поэтому корректировка защит от перегрузки не требуется.

Основное внимание необходимо уделить защите минимального напряжения (далее ЗМН), поскольку именно от работы этой защиты зависит сохранение замкнутым выключателя двигателя, сохранения связи с энергосистемой и последующий самозапуск [11]. Данные, полученные в результате моделирования в ПК ETAP, показали, что параметры существующей много-

ступенчатой ЗМН не удовлетворяют условиям группового самозапуска. Характеристика ЗМН не охватывает всю область сохранения устойчивости, в чём можно убедиться, обратив внимание на рис. 7. Также эта защита была одинаково отстроена как для секции шин с СД, так и для секции с АД, что не позволяло полностью использовать запас динамической устойчивости АД. В связи с этим предложено изменить логику работы и уставки ЗМН как для секций с СД, так для секций с АД так, как представлено на рис. 8.

Предложено отказаться от общепринятой логики работы ЗМН и АВР, чтобы сократить число необоснованных отключений. Важно подчеркнуть, что реализация ЗМН осуществляется на уже имеющейся элементной базе.

Для СД 1-я ступень защиты должна обеспечить отключение синхронной составляющей электродвигательной нагрузки повреждённой секции шин при неуспешной работе быстродействующего ввода резерва (далее БАВР) или после его срабатывания в случае снижения напряжения ниже 3000 В, с выдержкой времени длительностью 0,128 секунды. Выдержка времени 1-й ступени при этом превышает время работы БАВР, которое составляет 40–80 мс, и не повлияет на его работу. Реализация данной ступени позволит предотвратить потерю питания на исправной секции шин.

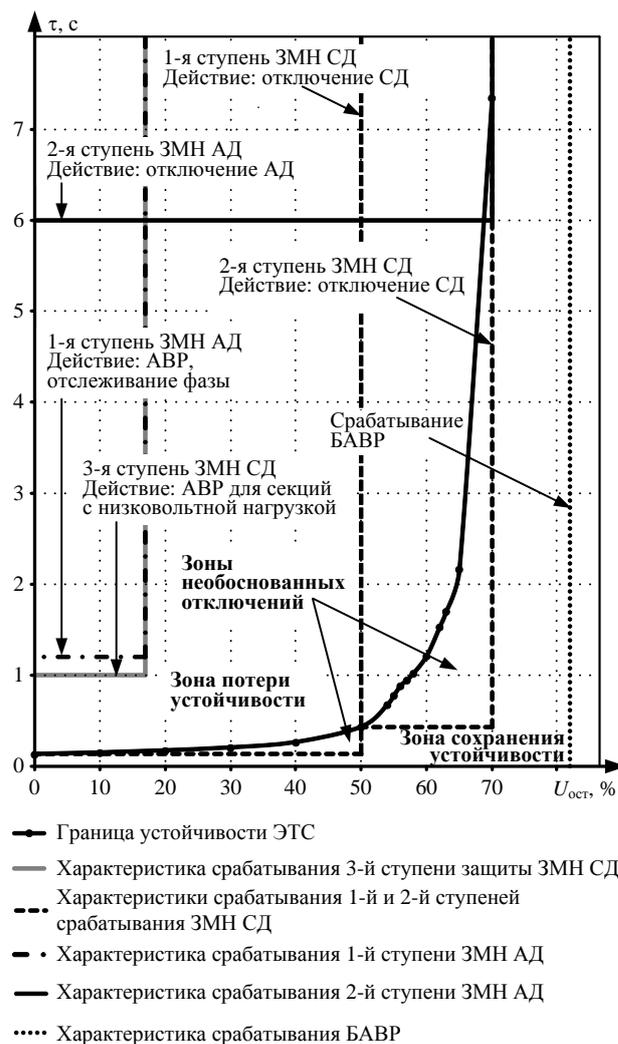


Рис. 8. Характеристика защиты минимального напряжения после корректировки её параметров

2-я ступень ЗМН СД также должна осуществлять отключение СД, участвующих в самозапуске, в другой области границы устойчивости, что сократит зону необоснованных отключений. Напряжение срабатывания этой ступени защиты около 4200 В, время выдержки – 0,429 секунд. Это необходимо для того, чтобы избежать потери устойчивости системы в целом.

3-я ступень ЗМН СД подает сигнал на работу АВР. При низком остаточном напряжении (порядка 1000 В) с выдержкой по времени около 1 секунды проверяется наличие питания на соседней секции шин, и при достаточном напряжении подаётся сигнал на отключение вводного выключателя повреждённой секции и включение секционного выключателя. Таким образом, предлагается использовать работу ЗМН как пусковой орган АВР для электродвигателей взаиморезевируемых механизмов.

Для секции с АД ЗМН рекомендуется отстраивать иначе. Во-первых, ЗМН АД предлагается выполнить двухступенчатой. Во-вторых, необходимо учитывать то, что в рассматриваемом примере АД обладает абсолютной динамической устойчивостью, и, следовательно, нет необходимости отключать через 0,5 секунды ввод РП, поскольку время перерыва питания для асинхронных приводов ограничивается временем работы защит от перегрузки. В-третьих, необходимо помнить, что, для того чтобы включить выбегающий АД (время выбега которого составляет 15 секунд) на соседний ввод, необходимо дождаться затухания ЭДС до 30% от номинального напряжения. У двигателя мощностью 5 МВт это займёт около 1–1,2 секунд. Следовательно, до этого момента должен быть запрет на секционирование, или же должны отслеживаться фазы напряжения.

Несоблюдение этого условия может привести к броску тока самозапуска, в случае, если вектор ЭДС и вектор напряжения питающей сети будут находиться в противофазе [12].

1-я ступень ЗМН АД выполняет функцию пускового органа АВР: при напряжении около 1000 В и по истечении 1,2 секунды подаётся сигнал на отключение ввода распределительного пункта (далее РП) и включение секционного выключателя, проверяя при этом фазу напряжения исправной шины.

2-я ступень при пониженном напряжении (около 4200 В) подает сигнал на отключение АД через 6 секунд, при условиях затянувшегося пуска (самозапуска). Уставка по напряжению выбрана из условия нарушения статической устойчивости второго ввода при работающем СД. Выдержка по времени подобрана с целью улучшения теплового режима машины при нарушении статической устойчивости.

Важно также отметить, что область, лежащая между кривой устойчивости и характеристикой срабатывания защиты, представляет собой область необоснованных отключений. Уменьшение данной области способствует снижению числа таких отключений и, соответственно, повышению эффективности функционирования ЭТС предприятия в целом [7, с. 257-265].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Корректировка уставок релейной защиты и автоматики в соответствии с границей динамической устойчивости электротехнической системы позволяет существенно расширить область устойчивой работы электротехнической системы. Корректировки требуют в том

числе уставки защиты минимального напряжения.

Изменение логики работы ЗМН на использование 1-й ступени защиты для отключения высоковольтных электроприводов, а 3-й (или 2-й) для запуска АВР позволяет расширить область использования самозапуска, не прибегая к подхвату и автоматическому повторному пуску. При условии, что на подхват накладываются ограничения по остаточной ЭДС, а на автоматический повторный пуск по числу пусков из горячего состояния, самозапуск является приоритетным способом для сохранения технологического процесса.

Определено, что при мощностях СД и АД, близких по своей величине, скачкообразное изменение времени динамической устойчивости на границе вырождается в точку. При этом непрерывность кривой в этой точке по-прежнему отсутствует. Учитывая, что такая схема электроснабжения является одной из типовых для нефтеперекачивающих станций, этот факт необходимо учитывать при настройке релейной защиты и автоматики.

Значения уставок РЗИА требуют расчёта для каждой электротехнической системы и не могут быть продублированы на основании факта идентичности схем электроснабжения предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фриман Р.Э., Иванов С.А., Бородавкин. Магистральные трубопроводы. Основные сведения. М.: Недра, 1976. 161 с.
2. Трубопроводный транспорт нефти: учеб. для вузов: в 2 т. / С.М. Вайншток, В.В. Новоселов, А.Д. Прохоров, А.М. Шаммазов и др.; под ред. С. М. Вайнштока. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. Т. 2. 621 с.
3. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 136 с.
4. Егоров А.В., Комков А.Н., Малиновская Г.Н. К вопросу о взаимном влиянии электроприводов в составе электротехнической системы // Территория НЕФТЕГАЗ. 2016. №2.
5. Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя М.: Элекс-КМ, 2005. 408 с.
6. Малафеев А.В., Трemasов М. А. Анализ устойчивости двигателей собственных нужд тепловых электростанций с учетом характеристик приводных механизмов // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С. 6-13. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-6-13.
7. Ершов М.С., Егоров А.В., Трифонов А.А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. М.: ООО «Издательский дом «Недра», 2010. 319 с.
8. Ершов М.С., Егоров А.В., Федоров В.А. Некоторые вопросы повышения устойчивости электроприемников многомашиного комплекса с непрерывным технологическим процессом при возмущениях в системе электроснабжения // Промышленная энергетика. 1992. №7.
9. Ершов М. С, Егоров А. В., Яценко Д. Е. О влиянии параметров энергосистемы на устойчивость узлов электрической нагрузки // Промышленная энергетика. 1997. №5.
10. Tarek I. El-Shennawy, Mahmoud A. El-Gammal, Amr Y. Abou-Ghazala, "Voltage Sag Effects on the Process Continuity of a Refinery with Induction Motors Loads, "The 2009 World Congress on Power Engineering (WCPEE'09), Cairo, Egypt, 5-8 October 2009.
11. Ограничение провалов напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий / Г.П. Корнилов, А.Ю. Коваленко, А.А. Николаев, И.Р. Абдулвелеев, Т.Р. Храмин. // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №2(23). С.44-46. DOI: 10.18503/2311-8318-2014-2(23)-44-46.
12. Gomez J.C., M.M. Morcos, C.A. Reineri and G.N. Campatelli, 2002. Behavior of induction motor due to voltage sags and short interruptions. IEEE Trans. Power Delivery, 17: 434-440. DOI: 10.1109/61.997914.

Поступила в редакцию 01 ноября 2018 г.

SIMULATION OF ELECTRIC DRIVE SELF-START OF HEAD UNITS AT THE OIL PUMPING STATION

Anastasiya A. Zakharova

Bachelor of Science, Master's degree student, Department of Theoretical Power Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia. E-mail: anastasiyazakharovalex@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3538-0248>

Alexander N. Komkov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Theoretical Power Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1010-6971>

The article is concerned with the issues related to the implementation of the group self-starting electric drives of the head pump units at the oil pumping station. Since oil pumping stations are high-risk facilities, this problem is particularly urgent for them because of the stringent requirements for the continuity of the processes of pipe-wire transportation of oil and oil products.

The self-start of a group of electric drives of mixed composition in the ETAP software package for the existing oil pumping station has been studied and simulated. The task of ensuring the self-starting of electric motors of precisely a large unit power is considered in order to study their mutual influence on each other. As a result of conducting multiple model experiments, the values of the voltage of static stability and the time of dynamic stability of the electrical system of the enterprise were determined. On the basis of the data obtained, the boundary of the dynamic stability of the system has been built, the optimal conditions for the implementation of group self-starting have been determined, compliance with which allows uninterrupted operation of oil pumping stations during voltage dips in the external power supply system. Particular attention is paid to assessing the settings and the selectivity of existing devices for relay protection and automation since only with their correct detuning, self-starting can expand the area of stable operation of the electrical system and keep electric drives of main pumping units in operation after power failures.

On the basis of the performed analysis, a variant of protection of the minimum voltage was proposed taking into account all the features of the implementation of self-starting electric drives of mixed composition at the pump station under consideration. The absence of an abrupt change at the time of dynamic stability is established for an electrical system of mixed composition with electric drives of high unit power at comparable powers of asynchronous and synchronous motor loads. The bifurcation point on the border of dynamic stability is preserved.

Keywords: self-start, electrical system of mixed composition, oil pumping station, stability, synchronous electric motor, asynchronous electric motor, undervoltage protection, simulation, automatic transfer of reserve, ETAP software.

REFERENCES

- Freeman R.E., Ivanov S.A., Borodavkin. *Magistralnye truboprovody. Osnovnye svedeniya* [Main pipelines. Basic information]. M.: Nedra, 1976. 161 p. (In Russian)
- Weinstock S.M., Novoselov V.V., Prokhorov A.D., Shammazov A.M., et.al. *Truboprovodnyi transport nefiti* [Pipe-line transport of oil]: textbook for universities: in 2 volumes / Under the editorship of S.M. Weinstock. Moscow: OOO Nedra-Business Center, 2004, vol. 2, 621 p. (In Russian)
- Golodnov Yu.M. *Samozapusk elektrodvigateley* [Self-starting of electric motors], 2nd revised and enlarged edition. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 136 p. (In Russian)
- Egorov A.V., Komkov A.N., Malinovskaya G.N. On the issue of mutual influence of electric drives in the composition of the electro-technical system. *Territory of NEFTEGAZ*, 2016, no. 2. (In Russian)
- Gurevich Yu.E., Kabikov K.V. *Osobennosti elektrosnabzheniya, orientirovannogo na bespereboinoiuiu rabotu promyshlennogo potrebitelia* [Features of power supply focused on the uninterrupted operation of the industrial consumer]. Moscow: Eleks-KM, 2005, 408 p. (In Russian)
- Malafeev A.V., Tremasov M.A. Analysis of the stability of the engines of their own needs of thermal power plants taking into account the characteristics of the driving mechanisms. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes]. 2016, no. 4 (33), pp. 6-13. DOI: 10.18503 / 2311-8318-2016-4 (33) -6-13. (In Russian)
- Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. *Ustoychivost promyshlennykh elektrotekhnicheskikh sistem* [Stability of industrial electrical systems]. M.: Publishing House "Nedra" LLC. 2010. 319 p. (In Russian)
- Ershov M.S., Egorov A.V., Fedorov V.A. Some issues of increasing the stability of electrical receivers of a multi-machine complex with a continuous technological process under disturbances in the power supply system. *Promyshlennaya energetika* [Industrial engineering], 1992, no. 7. (In Russian)
- Ershov M.S., Egorov A.V., Yatsenko D.E. On the influence of power system parameters on the stability of electrical load nodes. *Promyshlennaya energetika* [Industrial engineering]. 1997, no.5. (In Russian)
- Tarek I. El-Shennawy, Mahmoud A. El-Gammal, Amr Y. Abou-Ghazala, "World Congress on Power Engineering (WCPEE '09), Cairo, Egypt, October 5-8, 2009.
- Kornilov GP, Kovalenko, A.Yu., Nikolaev A.A., Abdulveleev I.R., Khramshin, T.R. Restriction of voltage dips in power supply systems of industrial enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2014, no. 2 (23), pp. 44-46. DOI: 10.18503 / 2311-8318-2014-2(23)-44-46. (In Russian)
- Gomez J.C., M.M. Morcos, C.A. Reineri and G.N. Campatelli, 2002. Behavior of the motor induction motor saver and short interruptions. *IEEE Trans. Power Delivery*, 17: 434-440. DOI: 10.1109 / 61.997914.

Захарова А.А., Комков А.Н. Моделирование самозапуска электроприводов головных агрегатов нефтеперекачивающей станции // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 2(43). С. 35-42. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-35-42)

Zakharova A.A., Komkov A.N. Simulation of Electric Drive Self-Start of Head Units at the Oil Pumping Station. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 35-42. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-35-42)

Гасияров В.Р.¹, Логинов Б.М.², Воронин С.С.¹¹ Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск² ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ РАСКАТА В РЕЖИМЕ ПРОФИЛИРОВАННОЙ ПРОКАТКИ СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРО- И ГИДРОПРИВОДА

Отмечена актуальность снижения потерь металла с боковой и торцевой обрезью при производстве проката на толстолистовых станах. Дана оценка влияния соотношения коэффициентов вытяжки при протяжке и разбивке ширины на геометрическую форму раската. Показаны преимущества прокатки с формированием двойного конического профиля на головном и хвостовом участках. Представлена технология ASC, в которой реализована многоточечная стратегия задания толщины по длине раската. Обоснована важность повышения точности автоматического регулирования положения гидравлических нажимных устройств и толщины при реализации этой стратегии. Приведена структура и дана характеристика системы автоматического регулирования толщины (САРТ) стана 5000. Выполнен анализ осциллограмм толщины раската во время прохода с профилированием при существующей настройке САРТ. Зафиксированы отклонения, вызванные запаздыванием сигнала регулирования по отношению к фактическому отклонению толщины при перемещении нажимных устройств. С целью повышения быстродействия САРТ и уменьшения динамической ошибки предложен способ регулирования толщины с предупреждением. Рассмотрена структура двухконтурной САРТ с положительной связью по сигналу задания, обоснована передаточная функция канала предупреждения. Представлена структура имитационной модели взаимосвязанных электротехнических систем реверсивной клетки, обеспечивающей возможность совместного исследования профилированной прокатки и формирования изгиба переднего конца раската в форме «лыжи». Рассмотрены схемы отдельных блоков модели. Выполнен сравнительный анализ временных зависимостей толщины раската при реализации проектного и разработанного алгоритмов регулирования, подтверждено увеличение быстродействия САРТ. Представлены осциллограммы, полученные при реализации разработанного алгоритма в АСУ ТП реверсивной клетки стана 5000. В результате их сравнения с осциллограммами при проектной настройке САРТ доказано повышение точности регулирования толщины. Отмечены технические преимущества внедрения разработанного алгоритма, основным из которых является улучшение качества продукции.

Ключевые слова: толстолистовой прокатный стан, реверсивная клетка, профилированная прокатка, автоматическое регулирование толщины, система, точность, предупреждение, способ, структура, имитационная модель, разработка, моделирование, экспериментальные исследования, внедрение.

ВВЕДЕНИЕ

Наибольшее влияние на расход металла при производстве толстых листов оказывают отходы с боковой и торцевой обрезью, вызванные отклонением формы листа в плане (вид сверху) от прямоугольной. Форма готового листа зависит от соотношения коэффициентов вытяжек: отношений длины раската к длине сляба при протяжке и ширины раската к ширине сляба при разбивке ширины [1]. Когда коэффициент вытяжки при протяжке превышает аналогичный коэффициент при разбивке ширины, форма готового листа характеризуется выпуклостью переднего и заднего концов и вогнутостью боковых кромок (рис. 1, а). При обратном соотношении коэффициентов вытяжки передняя и задняя кромки листа становятся вогнутыми, а боковые грани – выпуклыми (рис. 1, б).

Эффективным способом улучшения формы листа в плане и снижения удельного расхода металла является профилирование широких граней раската горизонтальными вальками. Суть этого способа заключается в том, что в последнем пропуске при протяжке или разбивке ширины производят деформацию раската с переменным обжатием по длине с тем, чтобы скомпенсировать дальнейшее отклонение формы от прямоугольной. В результате формируется профиль с переменной толщиной на головном и хвостовом участках, получивший название «собачья кость» [2].

Для практической реализации профилирования известны несколько технологий: MAS-прокатка,

ЕГО-прокатка, Plan View Control (управление геометрией) [3–5]. Для обеспечения почти полной прямоугольности раската в плане на современных толстолистовых станах применяется автоматический контроль профиля (ASC). Для воздействия на форму головной и хвостовой частей применяется двойной конический профиль толщины, показанный на рис. 1, в. Поскольку неровности края встречаются на головном, хвостовом концах и на кромках листа, функция ASC применяется как при протяжке, так и при разбивке ширины (на повернутом листе). Более подробно технологии профилированной прокатки рассмотрены в работах [6, 7], анализ технологии ASC приведен в публикациях [1, 8].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для задания профиля переменной толщины в технологии ASC разработана многоточечная стратегия, которая поясняется графиками изменения толщины и давления в функции длины раската, представленными на рис. 1, в. Согласно этой стратегии рассчитывается ряд заданных точек, каждая из которых определяется по удаленности от «головы» раската. Для каждой точки моделью настройки АСУ ТП выдаются опорные значения толщины, усилия прокатки, скорости, опережения и других контролируемых либо вычисляемых параметров. Текущее положение «головы» вычисляется в функции суммы скорости прокатки и опережения. Соответствующие опорные значения устанавливаются между заданными точками. При прокатке с автоматическим контролем формы опорные значения толщины и усилия прокатки постоянно обновляются во время прохода в зависимости от длины прокатанной части.

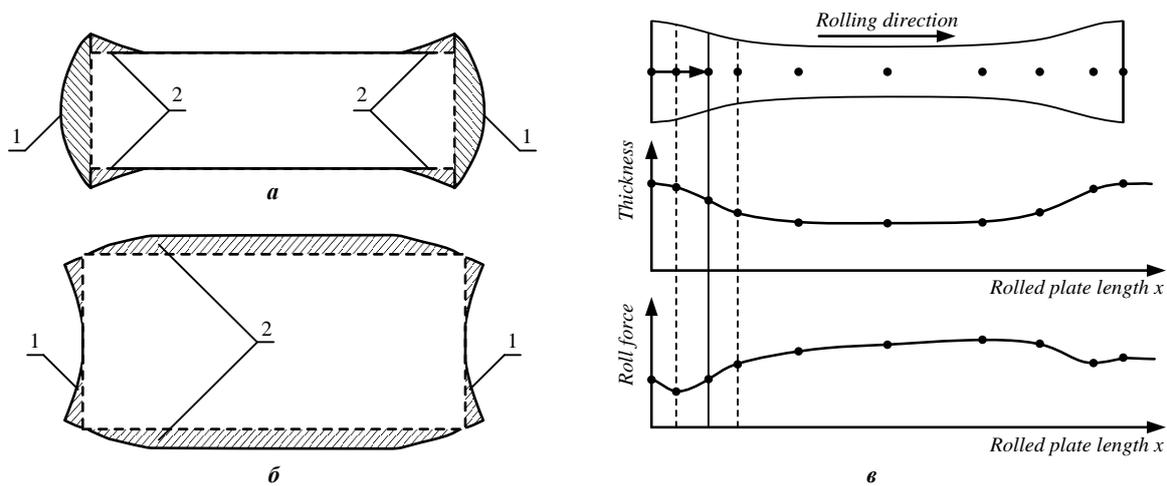


Рис. 1. Форма листа при различных соотношениях коэффициентов вытяжки (а), (б) и графики, поясняющие профиль раската и многоточечную стратегию (в): 1 – торцевая обрезь; 2 – боковая обрезь; rolling direction – направление прокатки; thickness – толщина; rolled plate length x – длина прокатанного листа; roll force – давление на валки

Функции формирования переменного профиля по длине раската обеспечиваются системой автоматического регулирования толщины, управляющей гидравлическими нажимными устройствами (НУ). В представленной публикации этот процесс рассматривается на примере НУ и САРТ толстолистного стана 5000.

Очевидно, что точность обработки профиля раската, задаваемого согласно рис. 1, в, определяется точностью автоматического регулирования положения нажимных устройств и толщины. Анализ настройки и показатели САРТ стана 5000 представлены в [9]. Показано, что в установившемся режиме прокатки они удовлетворительны. Вместе с тем при формировании профиля «кость» возникает отклонение толщины от заданной. Это предопределило необходимость исследования точности регулирования толщины в динамическом режиме формоизменения раската и разработки способа управления НУ в структуре САРТ, обеспечивающего ее повышение.

Поскольку проведение активных экспериментов по регулированию профиля на действующем стане не представляется возможным, в качестве основного метода принято математическое моделирование. Результаты экспериментов анализируются только на этапах исследования быстродействия САРТ и оценки эффективности разработанных решений.

ХАРАКТЕРИСТИКА САРТ СТАНА 5000

Автоматическое регулирование толщины на современных прокатных станах обеспечивается средствами двух взаимосвязанных систем: гидравлического регулирования раствора валков (HGC, Hydraulic Gap Control) и непосредственно автоматического регулирования толщины (AGC, Automatic Gap Control) [10, 11]. Эти системы реализованы в виде двух контуров: внутреннего контура регулирования положения НУ и внешнего контура регулирования толщины. Структуры и настройки этих систем на различных станах представлены в ряде публикаций, в том числе в [12–14].

Схема подключения регуляторов толщины и положения НУ стана 5000 показана на рис. 2. В САРТ реализуется известная зависимость Головина-Симса [15]. На вход регулятора толщины поступают сигналы задания и обратной связи. Текущая (актуальная) толщина рассчитывается по сигналам датчиков положения, распределения зазора по сторонам относительно оси прокатки, растяжения клетки и других воздействий (толщины масляной пленки в подшипниках, теплового расширения вала, износа валков и др. [16, 17]).

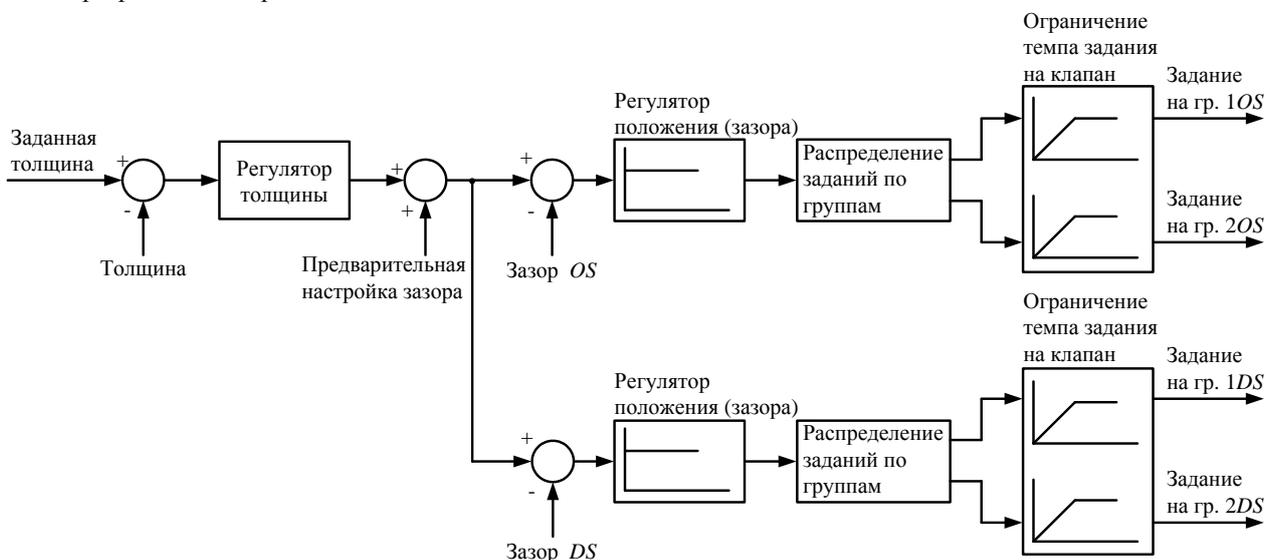


Рис. 2. Упрощенная структура САРТ

Более подробно техническая реализация и настройка систем HGC и AGC стана 5000 рассмотрены в работе [9].

АНАЛИЗ ОСЦИЛЛОГРАММ
ПРИ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ НАСТРОЙКЕ САРТ

На рис. 3 представлены осциллограммы заданной и актуальной толщины (окно 1), моментов главных приводов верхнего (ВГП) и нижнего (НГП) валков (окно 2) и усилия прокатки (окно 3). Характер осциллограмм толщины и усилия прокатки соответствует графикам, приведенным на рис. 1, в. Формирование профиля переменной толщины происходит на переднем конце раската в интервале времени t_1-t_3 непосредственно после захвата металла валками и на заднем конце – в интервале t_4-t_5 . Это происходит за счет уменьшения и увеличения зазора валков соответственно.

В результате анализа представленных зависимостей определены следующие недостатки проектной САРТ:

1. Значительное отклонение актуальной толщины (кривая 2) от заданной (кривая 1) в режиме формирования профиля раската. В интервале t_1-t_3 отклонение Δh_T составляет 2 мм или 0,8% толщины после профилирования (239 мм). Это вызвано задержкой сигнала регулирования при перемещении НУ. Интервал задержки $\Delta t_T \approx 0,2$ с. Данный недостаток обусловлен тем, что при проектной настройке САРТ регулирование осуществляется по отклонению толщины.

Следует отметить что в ходе экспериментальных исследований были зафиксированы отклонения толщины до 2,5% при допустимом пределе $\pm 1\%$.

2. Значительное различие между моментами ВГП (кривая 3) и НГП (кривая 4) как в режиме профилирования, так и в установившемся режиме прокатки. Как показали исследования, это обусловлено рассогласованием

скоростей этих приводов (на рис. 3 не показаны). Изначально рассогласование устанавливается с целью формирования изгиба переднего конца раската вверх в форме «лыжи». По окончании режима лыжеобразования в работу должен вступать регулятор деления нагрузок (РДН), в функции которого входит выравнивание скоростей и, соответственно, нагрузок ВГП и НГП.

Однако при прокатке коротких раскатов из-за несогласованной работы системы лыжеобразования и РДН, последний не успевает включиться в работу, поэтому момент ВГП в несколько раз ниже момента НГП. Такой режим возникает при прокатке коротких раскатов на черновой стадии. Сказанное подтверждают осциллограммы в окне 2, на которых момент НГП достигает уровня ограничения -4500 кН·м, в то время как момент ВГП изменяется в пределах от -2000 кН·м до -3500 кН·м (отрицательные значения моментов означают, что прокатка проходит в режиме реверса – в направлении от отводящего рольганга к подводящему).

Наиболее простым решением первой названной проблемы является повышение быстродействия контура регулирования толщины. Однако этот путь является ограниченным, т.к. при увеличении коэффициента регулятора возникает колебательный процесс, что нежелательно. Поэтому необходим поиск других решений, обеспечивающих уменьшение динамической ошибки регулирования толщины.

Для устранения второго недостатка необходимы согласование режимов системы лыжеобразования и РДН и повышение их быстродействия. Решение этой задачи является предметом отдельных исследований, поэтому здесь не рассматривается. В представленной работе предлагается решение, направленное на повышение точности регулирования толщины за счет увеличения быстродействия без изменения настройки контуров САРТ.

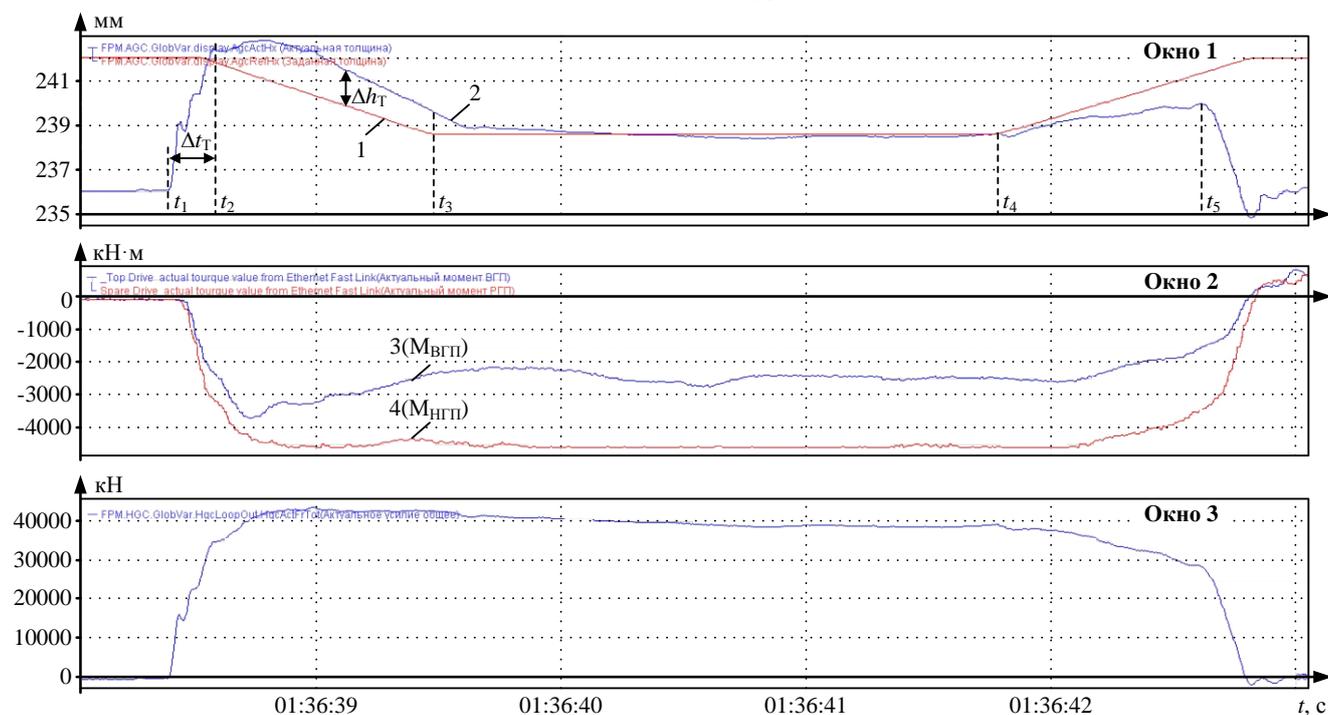


Рис. 3. Осциллограммы параметров прокатки в проходе с профилированием при существующей настройке САРТ: окно 1 – заданная и актуальная толщина; окно 2 – моменты электроприводов; окно 3 – усилие прокатки

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ

Эффективным способом ускорения работы САРТ и, соответственно, уменьшения динамической ошибки регулирования толщины является предупреждение положением НУ [10]. Для этого сигнал задания, формирующий профиль «кость», подается на вход регулятора положения «в обход» регулятора толщины. В этом случае система не будет «ждать» отклонения толщины, а будет воздействовать на положение НУ в функции сигнала ее задания.

В публикациях [18, 19] рассмотрены принципы построения систем автоматического регулирования с предварительным управлением за счет формирования положительного сигнала по управляющему воздействию. В публикации [20] рассмотрены структуры двухконтурной и трехконтурной систем регулирования положения, обосновано включение положительной связи

с пропорциональным регулятором. В работе [10] рассмотрено включение интегрального регулятора, что обеспечивает регулирование не только самого сигнала, но и его производной.

На основании анализа известных решений, с учетом того, что для регулирования межвалкового зазора в режиме профилированной прокатки не требуется высокого быстродействия, обосновано применение положительной связи по задающему сигналу с пропорциональным каналом (регулятором) предупреждения. В этом случае будет обеспечено достаточное быстродействие при минимальном влиянии связи на устойчивость процесса.

Функциональная схема двухконтурной САРТ с внутренним контуром регулирования положения НУ представлена на рис. 4. Дополнительно введенный канал предупреждения выделен контуром.

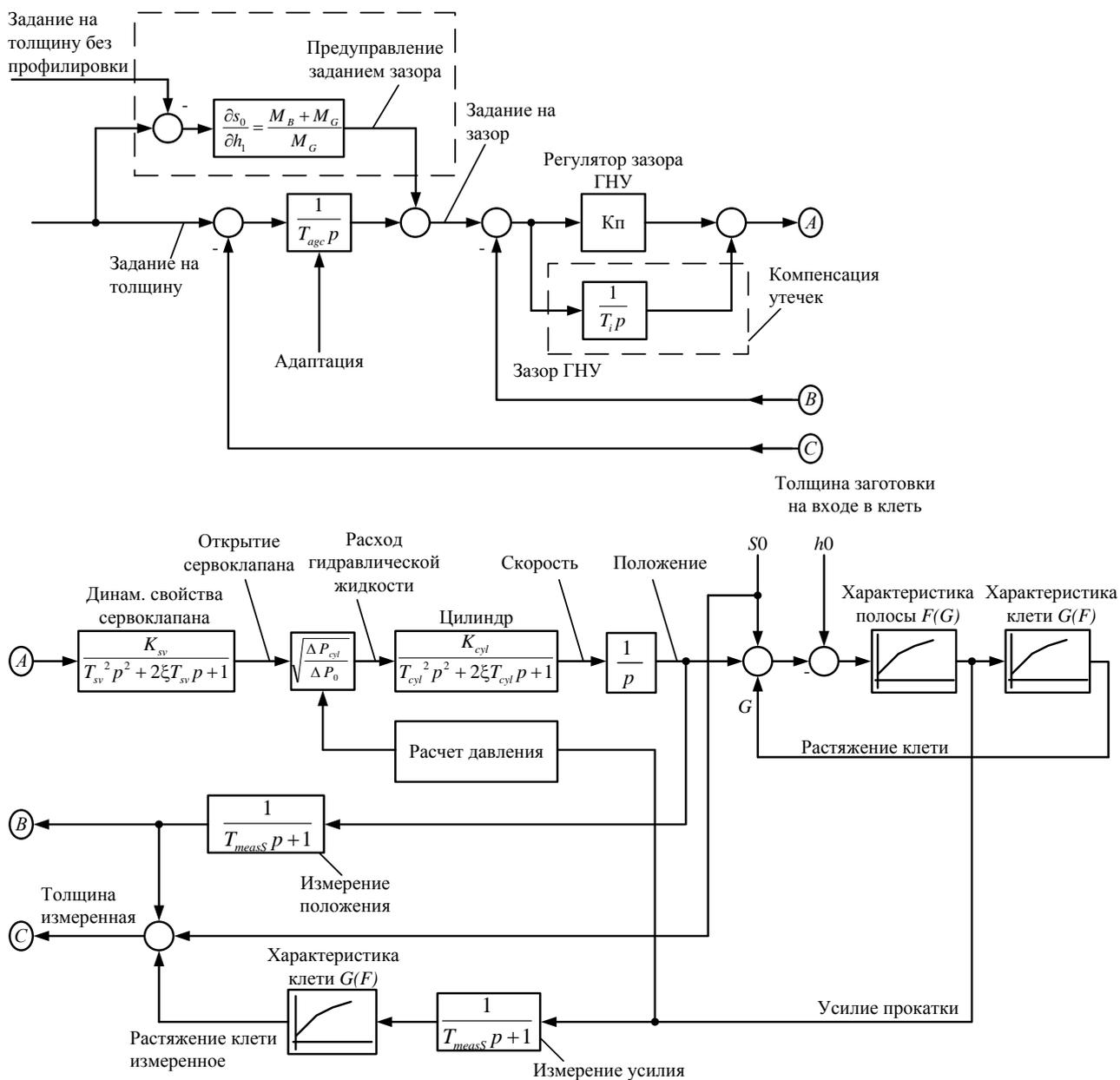


Рис. 4. Структурная схема САРТ с реализацией предупреждения

При выборе коэффициента регулятора положительной связи принято во внимание, что изменение толщины и изменение зазора отличаются друг от друга. Поэтому введен коэффициент, описывающий отношение изменения зазора к изменению толщины, который зависит от модулей жесткости клетки M_G и металла M_B [7]:

$$\frac{\partial s_0}{\partial h_1} = \frac{M_B + M_G}{M_G}.$$

На схеме это учитывается введением блока с соответствующей передаточной функцией. Модуль жесткости клетки принимается по данным калибровки клетки, модуль жесткости полосы определяется моделью прокатки.

С целью оценки эффективности предложенного решения обосновано исследование точности регулирования толщины методом математического моделирования. В связи с этим возникла задача разработки имитационной математической модели. Поскольку в реальном электроприводе имеет место значительное рассогласование моментов ВГП и НГП (см. рис. 2), для обеспечения адекватности процессов в ней должны быть предусмотрены структуры системы управления «лыжей», РДН, а также задания и распределения нагрузок ВГП и НГП.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Структурная схема имитационной модели взаимосвязанных электротехнических систем реверсивной

клетки толстолистового стана представлена на рис. 5. Она содержит блоки, описывающие электроприводы с механической частью, блок управления «лыжей» (задания разницы скоростей), блок РДН (входит в структуру модели распределения моментов), блок моделирования нагрузки и ее распределения по двигателям. Также в представленной схеме содержатся контуры НГС и АГС. При реализации модели они выполнены в виде структуры, представленной на рис. 4, поэтому отдельно не рассматриваются.

Математическая модель электромеханической системы валка (модели ВГП и НГП) представляет собой известную модель двухмассовой системы с упругой связью. Система автоматического регулирования скорости принята двухконтурной, настроенной на симметричный оптимум, внутренний контур регулирования момента настроен на технический оптимум. Такие системы описаны в литературных источниках [21, 22], в том числе в публикациях авторов [23–25], поэтому здесь не рассматриваются.

Структура блока управления «лыжей» представлена на рис. 6, а. Он обеспечивает снижение задания скорости электропривода верхнего валка в соответствии с вычисленным темпом. Скорость электропривода нижнего валка является базовой и зависит только от скорости прокатки. Темп снижения задания регулируется воздействием на задатчик интенсивности 2. По окончании формирования «лыжи» осуществляется переключение входа блока коммутации (селектора) 1 на нулевой сигнал задания.

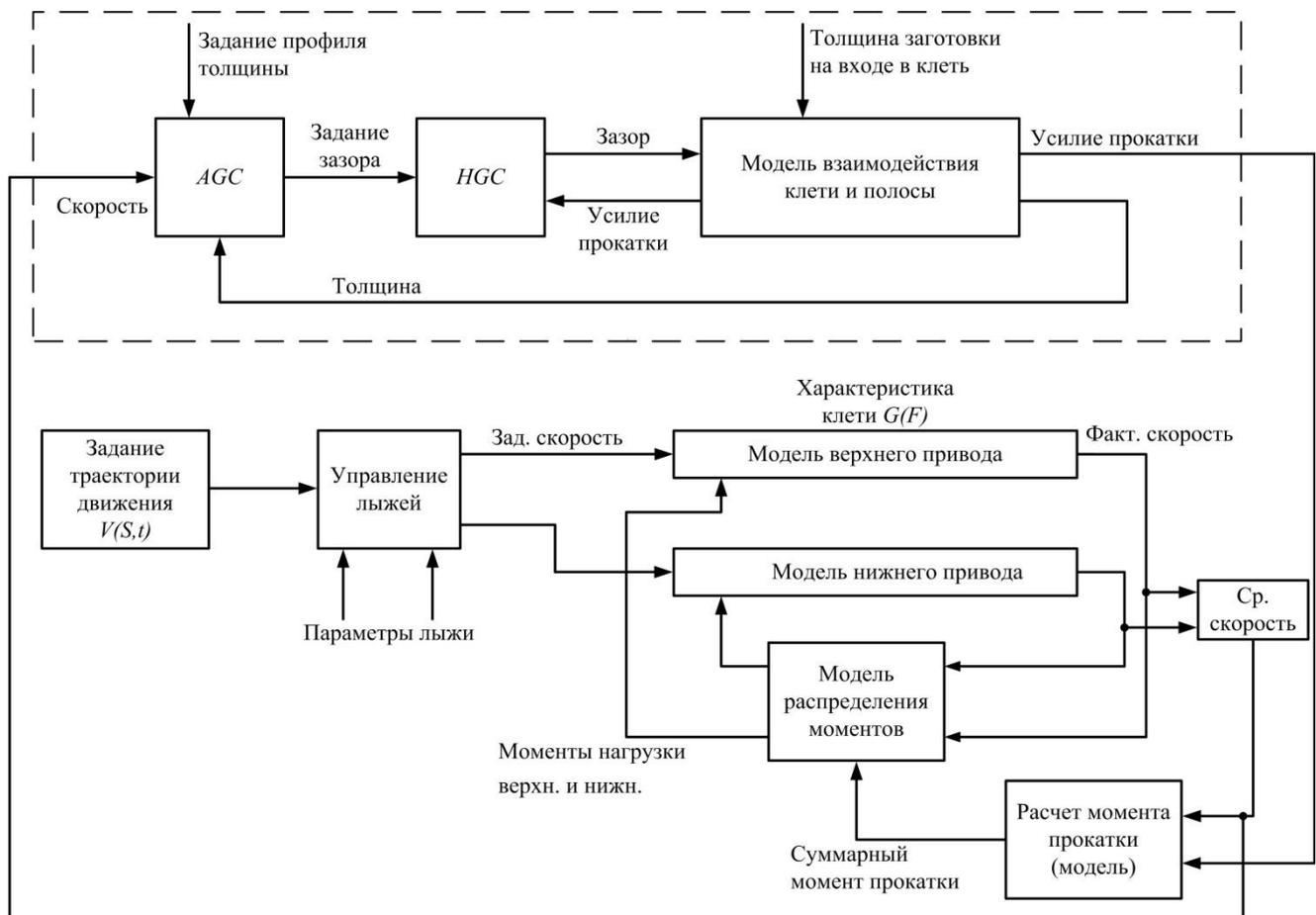


Рис. 5. Структура имитационной модели взаимосвязанных электротехнических систем реверсивной клетки

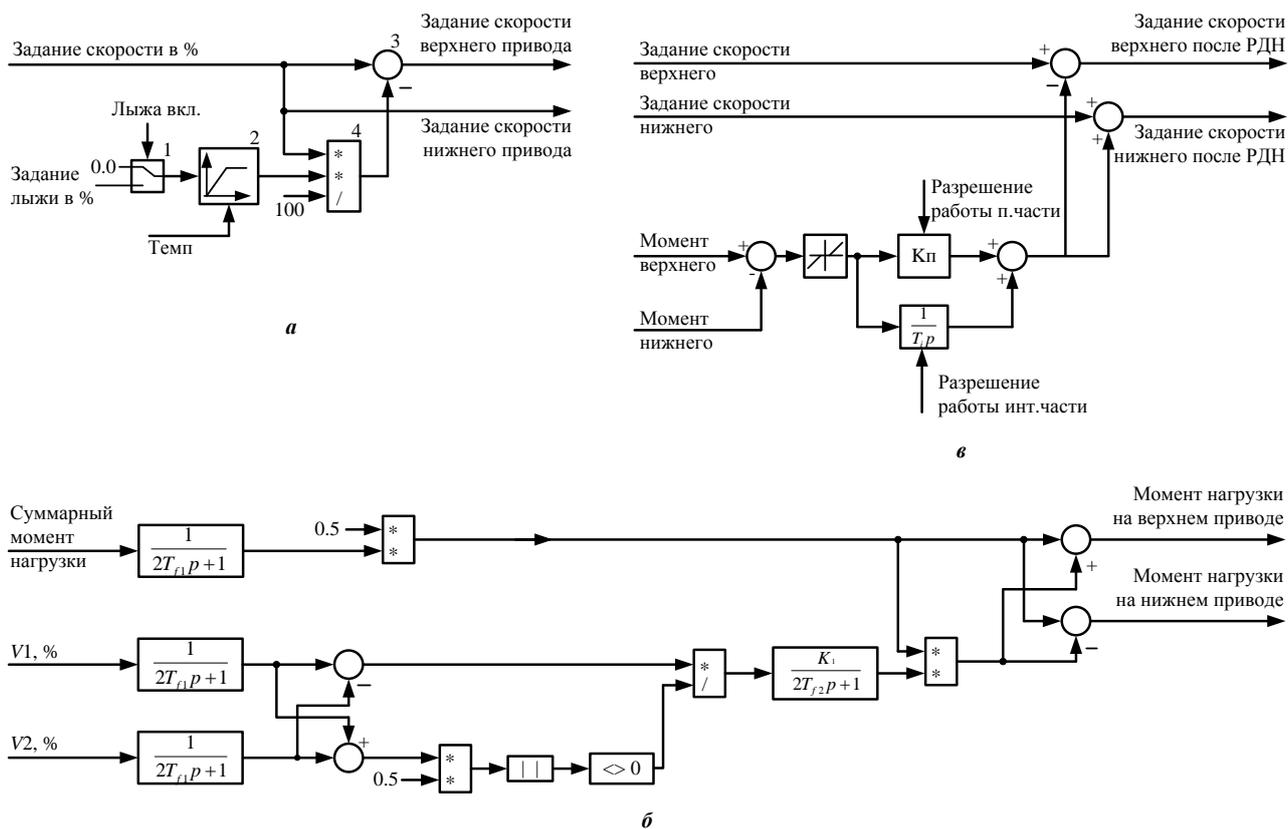


Рис. 6. Схемы моделей блока задания скоростей (а), распределения нагрузок ВГП и НГП (б) и схема РДН (в): 1 – селектор; 2 – задатчик интенсивности; 3 – сумматор; 4 – умножитель

Схема блока имитации распределения нагрузки между электроприводами верхнего и нижнего валков представлена на рис. 6, б. Она описывает изменение моментов в зависимости от разницы линейных скоростей двигателей. Входными сигналами являются суммарный момент нагрузки на оба электропривода и их относительные скорости ($V_1, \%$ и $V_2, \%$). Выходные сигналы – это моменты ВГП и НГП. В данной модели разница моментов формируется пропорциональной рассогласованию скоростей. Для повышения точности моделирования в схему включен фильтр с коэффициентом усиления K_1 и постоянной времени T_2 . Их значения определены по результатам анализа осциллограмм. Более подробно описание аналогичных моделей приведено в публикациях [26, 27].

Схема регулятора деления нагрузок приведена на рис. 6, в. Он имеет пропорциональный и интегральный каналы, которые вступают в работу не одновременно. Если момент электропривода верхнего валка превышает момент электропривода нижнего валка, на входе регулятора формируется «ошибка» с положительным знаком. В этом случае сигнал на выходе РДН также положительный, он воздействует на скорость ВГП в сторону ее уменьшения и на скорость НГП – в сторону увеличения. При обратном соотношении моментов осуществляются регулирующие воздействия с противоположными знаками. В результате формируются разнонаправленные коррекции заданий, что повышает быстрдействие при компенсации рассогласования скоростей. Сигнал на разрешение работы П-части подается в момент окончания формирования «лыжи».

Разработанная имитационная модель, включающая рассмотренные блоки, реализована в среде Matlab Simulink.

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Параметры модели определены по данным электрооборудования и осциллограммам, полученным на стане 5000. Путем сопоставления результатов моделирования с результатами экспериментов подтверждена ее адекватность объекту. Доказана целесообразность использования модели для исследования разработанного способа совершенствования САРТ и разработки алгоритмов деления нагрузок и формирования «лыжи» (здесь не рассматриваются).

В подтверждение сказанному на рис. 7 представлены расчетные временные зависимости скоростей (окно 1), моментов (окно 2) электроприводов верхнего и нижнего валков, а также зависимости заданной и актуальной толщины раската (окно 3). Масштабы по осям ординат указаны в процентах, для перевода в абсолютные величины следует воспользоваться соотношениями: масштаб скоростей – $100\% = 8 \text{ м/с}$; масштаб моментов – $100\% = 1910 \text{ кН·м}$; выход РДН – $100\% = 0,8 \text{ м/с}$. Начальное рассогласование скоростей, необходимое для формирования «лыжи», в обоих случаях установлено равным проектному значению 15%.

В момент времени t_1 происходит захват металла валками. Темп замедления скорости в режиме лыжеобразования (интервал $\Delta t_{л} = t_2 - t_1$) на обоих рисунках составляет 16%/с. В интервале $\Delta t_{пр} = t_3 - t_1$ осуществляется формирование профиля переменной толщины на головном участке раската. Таким образом, режим образования «лыжи» совпадает по времени с режимом профилирования. Однако наложение этих режимов не оказывает заметного влияния на переходные процессы скоростей (кривые 5, 6) и рассогласование моментов двигателей ВГП и НГП (кривые 3, 4).

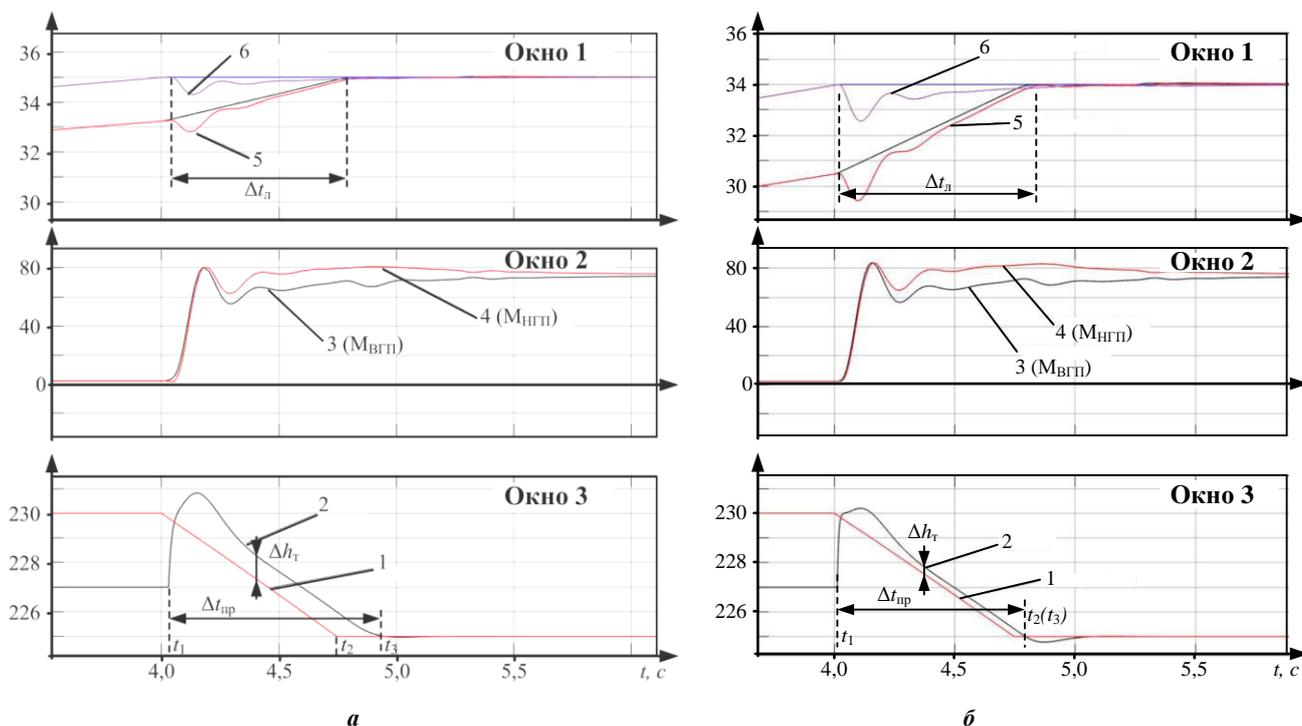


Рис. 7. Результаты моделирования при реализации проектного (а) и разработанного (б) алгоритмов управления: 1, 2 – заданная и фактическая толщина; 3, 4 – моменты верхнего и нижнего вала; 5, 6 – скорости верхнего и нижнего вала

Анализ приведенных зависимостей позволил сделать следующие выводы.

1. На **рис. 7, а** прослеживается отставание реальной толщины раската (кривая 2) от заданной (кривая 1). Это приводит к ошибке регулирования толщины в квазиустановившемся режиме профилирования $\Delta h_T=0,35\%$. Расчетные кривые с достаточной точностью повторяют процессы на осциллограммах, **рис. 3**, что косвенно подтверждает адекватность модели исследуемому объекту. Различие в конкретных значениях параметров в фиксированных точках объясняется различием начальных условий в эксперименте и при моделировании. 2. Отличием анализируемых процессов на **рис. 7, б** является значительное снижение (практически отсутствие) задержки регулирования толщины, в результате ошибка регулирования приближается к нулю ($\Delta h_T \approx 0,05\%$). Это происходит благодаря введению положительной связи по заданию толщины на вход регулятора положения ГНУ (см. **рис. 4**).

3. Установившиеся рассогласования моментов (кривые 3 и 4) в режиме формирования «лыжи» в интервале $\Delta t_{л} = t_2 - t_1$ на обоих рисунках одинаковы и составляют 12,5% ($M_{НГП}=80\%$ при $M_{ВГП}=70\%$). Это объясняется тем, что совершенствование алгоритмов «лыжеобразования» и деления нагрузок не предусмотрено.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают повышение точности и увеличение быстродействия регулирования толщины, что приводит к сокращению протяженности разнотолщинного участка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На завершающем этапе выполнены экспериментальные исследования точности регулирования толщины в режиме профилированной прокатки. Для этого в АСУ ТП стана 5000 внедрен алгоритм, реализующий предложенный способ предупреждения в САРТ. Проведены экспериментальные исследования прокатки раскатов различного сортамента, характерные осциллограммы представлены на **рис. 8**.

В результате их анализа сделаны выводы:

1. На осциллограммах в окне 1 сдвиг между заданием и актуальной толщиной $\Delta t_T \approx 0,1$ с, т.е. по сравнению с **рис. 3** он уменьшился в 2 раза. Это обеспечено за счет формирования сигнала предупреждения. Ошибка регулирования в $\Delta h_T=1$ мм, т.е. снизилась также в 2 раза и не превышает 0,4% установившегося значения.

2. Поскольку задача повышения быстродействия системы лыжеобразования и РДН в представленной работе не решалась, графики моментов ВГП и НГП (окно 2) аналогичны графикам, представленным на **рис. 3**. Рассогласование моментов не изменилось. Как отмечалось выше, устранение данного недостатка представляет собой сложную, самостоятельную задачу.

В целом, результаты экспериментов подтвердили повышение точности регулирования толщины на головном и, как видно из **рис. 3** и **8**, хвостовом участках в режимах профилированной прокатки. Это подтверждает правильность выбора структуры САРТ и оптимальную настройку регулятора предупреждения.

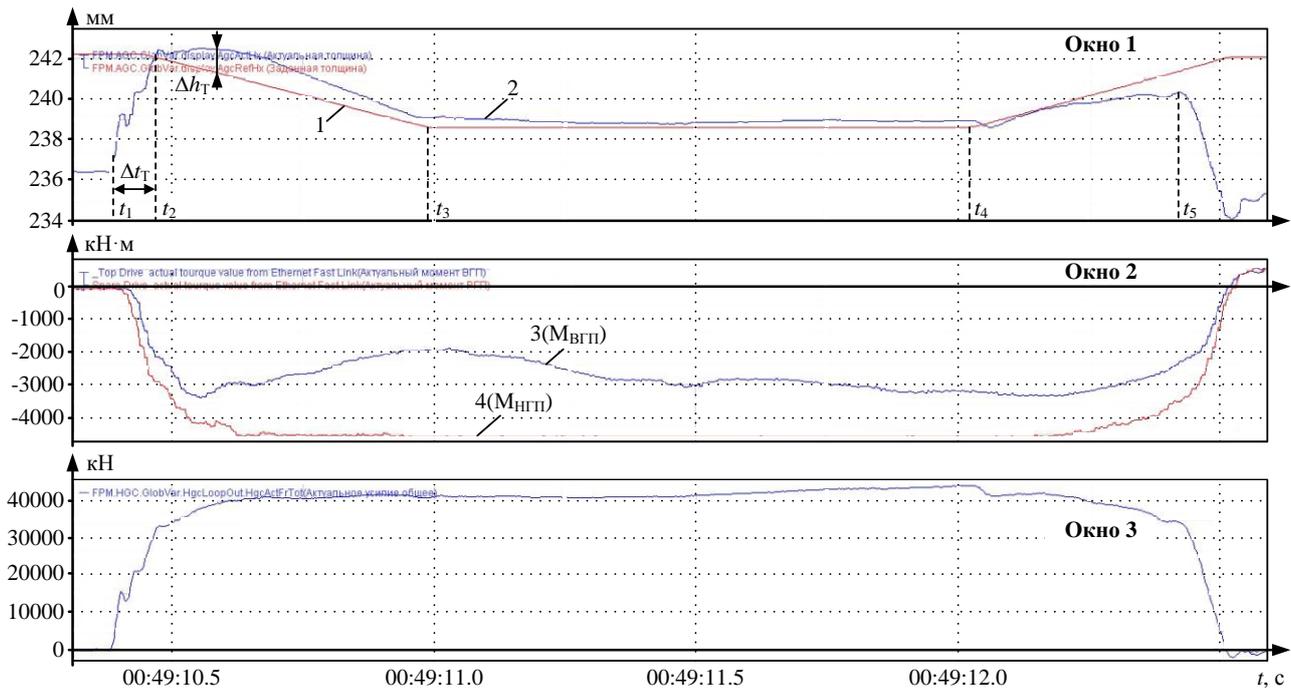


Рис. 8. Осциллограммы параметров прокатки при разработанном алгоритме САРТ (обозначения соответствуют принятым на рис. 3)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По существу, в представленной публикации впервые исследованы режимы совместной работы системы формирования двойного конического профиля «собачья кость» и системы изгиба переднего конца раската в форме «лыжи».

Следует отметить, что на осциллограммах, представленных на рис. 3, отклонения толщины от заданной находятся в пределах допуска $\pm 1\%$. Поэтому необходимости повышать точность регулирования толщины в данном случае нет. Однако, как отмечалось выше, при прокатке «тяжелых» профилей с высокими очагами деформации и большими обжатиями в проходах с профилированием возникают отклонения толщины до 2,5%. В связи со сложностью проведения активного эксперимента на действующем стане зафиксировать режим профилированной прокатки заготовок такого сортамента не удалось. Вместе с тем осциллограммы, представленные на рис. 3 и 8, наглядно демонстрируют возможность совершенствования проектного алгоритма САРТ и эффективность предложенного способа регулирования. Представленные результаты, хотя и носят качественный характер, не ставят под сомнение приведенные рассуждения и сделанные выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически и экспериментально подтверждено, что проектный алгоритм САРТ обеспечивает высокую точность регулирования толщины в установившемся режиме прокатки. Однако при принудительном перемещении НУ в режиме профилирования возникает запаздывание сигнала на выходе регулятора толщины. В результате появляется временной сдвиг фактуальной толщины относительно задания, что подтверждают расчетные зависимости и экспериментальные осциллограммы.

Для устранения данного недостатка разработан способ повышения точности регулирования толщины

раската в режиме профилированной прокатки за счет введения предупредления. Алгоритм, реализующий предупредление, технически исполнен в АСУ ТП реверсивной клетки стана 5000 и находится в опытно-промышленной эксплуатации.

Исследования, проведенные методом математического моделирования, и экспериментальные исследования на стане подтвердили снижение ошибки регулирования толщины при линейном перемещении НУ в 2 раза. С учетом того, что протяженность конического профиля на концах раската составляет от 15 до 30% общей длины, это приводит к существенному снижению разнотолщинности на концах готового листа.

Внедрение предложенного алгоритма САРТ способствует улучшению качества продукции и уменьшению обреза на головном и хвостовом участках проката. Разработанный способ управления рекомендуется для внедрения на толстолистовых прокатных станах, где реализована технология профилированной прокатки.

Работа выполнялась в рамках госзадания Южно-Уральского государственного университета (НИУ) (№ 13.9656.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khrumshin V.R., Khrumshina E.A., Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Voronin S.S. Control Methods and Systems Providing Reduced Consumption Index at Rolled Product Manufacture at Plate Mill. Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRus). 2017. Pp. 1540-1544. DOI: 10.1109/EIconRus.2017.7910865.
2. Hashimoto T. Прокатка листа с формированием промежуточного профиля «собачья кость» // Adv. Mater. and Process, 1989. №2. P. 386.
3. Development of new plane view control technique in plate rolling (NCC-DBR) // Nippon Kokan Technical Report. 1983. No.39. P. 21-30.
4. Heavy plates with special process design to meet extreme customer requirements / Oswald W., Streisselberger A.,

- Thul R., Nehrenberg M.-J., Kirsch J. // METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuous Cast. Conf. and 6 th Int. Roll. Conf., Dusseldorf, June 20-22, 1994: Proc. Vol. 2. Dusseldorf, 1994. P. 42-51.
5. New developments in improving shape control, yield and flexibility of heavy plate mills / Agrusti K., De Vito A., Liquory A.G., Paolicchi M. // METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuous Cast. Conf. and 6 th Int. Roll. Conf., Dusseldorf, June 20-22, 1994: Proc. Vol. 2. Dusseldorf, 1994. P. 86-92.
 6. Nomiya Yuji, Yazawa Takeo, Yasui Hirotosugu. Latest Plate Production Technology of Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation // Nippon Steel & Sumitomo metal technical report. No.110. September 2015. P. 8-16.
 7. Басков С.Н., Карандаев А.С., Осипов О.И. Энергосиловые параметры приводов и разработка систем профилированной прокатки слябов стана 2800 // Приводная техника. 1999, № 1-2. С. 21–24.
 8. Гасияров В.Р. Согласование скоростей электроприводов и гидравлических нажимных устройств при автоматическом контроле профиля раската // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 22-29. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-22-29.
 9. Shubin A.G., Loginov B.M., Khrumshin V.R., Evdokimov S.A., Karandaev A.S. System of Automated Control of Hydraulic Screw-down Mechanisms of Plate Mill Stand. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015. 6 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414858.
 10. Karandaev, A.S. Radionov A.A., Khrumshin V.R., Andryushin I.Yu., Shubin A.G. Automatic Gauge Control System with Combined Control of the Screw-Down Arrangement Position // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk. 2014. Vol. 1. Pp. 88-94. DOI 10.1109/APEIE.2014.7040794.
 11. Prinz K., Steinboeck A., Müller M., Ettl A., Kugi A. Automatic gauge control under laterally asymmetric rolling conditions combined with feedforward, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 3, pp. 2560–2568, 2017. DOI: 10.1109/TIA.2017.2660458.
 12. Identification and optimization for hydraulic roll gap control in strip rolling mill / SUN Jie, CHEN Shu-zong, HAN Huanhuan, CHEN Xing-hua, CHEN Qiu-jie, ZHANG Dian-hua // J. Cent. South Univ. (2015) 22: 2183–2191/ DOI: 10.1007/s11771-015-2742-0.
 13. John P, Nicholas S.S, Marwan A.S. A new strategy for optimal control of continuous tandem cold metal rolling. IEEE Transactions on Industry Application, 2010, 46(2), pp. 703–711.
 14. Modeling and control of plate thickness in hot rolling mills / Roland Heeg, Andreas Kugi, Olivier Fichet, Laurent Irastorza, Christophe Pelletier // IFAC Proceedings Volumes. Vol. 38, Issue 1, 2005, pp. 13-18. DOI: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01681.
 15. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 506 с.
 16. Diego Alvarez, Alberto B. Diez, Faustino Obeso. Slab curvature compensation in hot rolling mill by means of Fuzzy Control, Paper at the III seminar on rolling Mill Rolls, Institute Latinoamericano del Fierro y Acero, Mexico, March, 9, 1988.
 17. Ji Yafeng, Zhang Dianhua, Chen Shuzong, Sun Jie, Li Xu, Di Hongshuang, Algorithm Design and Application of Novel GMAGC based on Mill Stretch Characteristic Curve, Journal of Central South University March 2014, Vol. 21, Issue 3, pp. 942-947.
 18. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. М.: Академия, 2005. 300 с.
 19. Плотников Ю.В., Поляков В.Н. Системы управления электроприводами постоянного тока (преобразователь Sinamics DCM): учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 96 с.
 20. <http://bsystem.ru/Portals/0/store/docs/f1055642-9184-4742-b677-e55c51ca15ce.pdf>.
 21. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. М.: Энергия, 1971. 380 с.
 22. Целиков, А.И. Полухин П.И., Гребеник В.М. Машины и агрегаты металлургических заводов. Машины и агрегаты для производства проката. М.: Металлургия, 1988. т.3. 680 с.
 23. Разработка математической модели взаимосвязанных электротехнических систем клетки толстолистого прокатного стана / С.Н. Басков, В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, В.Р. Храмшин, К.Э. Одинцов // Изв. вузов. Электромеханика. 2017. Т. 60. № 6. С. 55–64.
 24. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Baskov S.N., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Mathematical Modeling of Mechatronics System "Hydraulic Screwdown Mechanism - Electric Drive of Rolling Mill Stand". 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, 361, 012020. DOI:10.1088/1757-899X/361/1/012020.
 25. Гасияров В.Р., Маклакова Е.А. Математическое описание главного электропривода толстолистого стана 5000 горячей прокатки // Russian Internet Journal of Electrical Engineering. 2015. Vol. 2, no. 3, pp. 62–66.
 26. Шохин В.В., Пермьякова О.В., Кисель Е.С. Исследование электромеханической системы прокатной клетки // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №23. С. 40–43.
 27. Reifental U., Nguzen Hong Ha, Bannack A. Beseitigung der Ebenheitsabweichungen im Walzgut bei Umkerwalymaschinen in Twindrive-Ausführung durch eine Winkelgleichlaufregelung der Antiebsstränge Magdeburg, 1996. 44 p.

Поступила в редакцию 11 декабря 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING THE CONTROL ACCURACY OF THE STRIP PLATE DURING SHAPED ROLLING USING ELECTRIC AND HYDRAULIC DRIVES

Vadim R. Gasiyarov

Ph.D. (Engineering), Head of the Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: gasiyarovvr@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9635-4716>.

Boris M. Loginov

Senior Maintenance and Test Engineer, Central Electric Laboratory, PJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works”, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lb18@yandex.ru.

Stanislav S. Voronin

Assistant Professor, the Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

It is important to reduce the amount of metal waste caused by scrap edge and scrap ends in the process of rolling at plate rolling mills. The influence of the correlation of the elongation ratio during drawing and spreading on the geometric shape of the strip plate was estimated. The paper shows the advantages of rolling process forming a double-cone profile at the head and tail sections. The ASC technology was introduced, which makes use of the multipoint strategy of thickness setting along the strip plate length. The importance of improving the accuracy of automatic control of position of screw-down structures and thickness was established when this strategy is used. The paper shows the structure and characteristics of the thickness automatic control system of the plate mill 5000. The analysis of oscillograph records of the strip plate thickness was carried out during the shaping pass for the current settings of the thickness automatic control system. Some deviations were recorded, which were caused by the lag of the regulating signal with respect to the actual deviation of thickness during displacement of the screw-down structures. To improve the response speed of the thickness automatic control system and to reduce the dynamic lag, a method of thickness control with pre-control was offered. The research group considered the double-circuit thickness automatic control system with the feed forward control of the target signal and established the transfer function of the pre-control channel. The paper demonstrated the structure of the simulation model of interrelated electric systems of a reverse rolling stand providing the opportunity of the joint research of shaped rolling and forming of a bend at the head end of the strip plate. The circuits of individual blocks of the model were considered. Comparative analysis of time curves of the strip plate thickness was carried out for the implementation of the design and the developed control algorithms and the increase in the response speed of the thickness automatic control system was proved. The paper demonstrates the oscillograph records obtained during the implementation of the developed algorithm in the automatic process control system of the reverse stand of the plate mill 5000. As a result of their comparison with the oscillograph records of the designed settings of the thickness automatic control system, it was proved that the accuracy of the thickness control improved. The paper notes that the main technological advantage of implementation of the developed algorithm is improving of the final product quality.

Keywords: plate mill, reverse rolling stand, shaped rolling, automatic thickness control, system, accuracy, pre-control, method, structure, simulation model, development, simulation, experimental investigation, implementation.

REFERENCES

1. Khramshin V.R., Khramshina E.A., Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Voronin S.S. Control Methods and Systems Providing Reduced Consumption Index at Rolled Product Manufacture at Plate Mill. Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRus). 2017. pp. 1540-1544. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910865.
2. Hashimoto T. Rolling of strip with the intermediate shape of a dogbone // Adv. Mater. and Process, 1989, no. 2, 386 p.
3. Development of new plane view control technique in plate rolling (NCC-DBR) // Nippon Kokan Technical Report. 1983, no. 39, pp. 21-30.
4. Heavy plates with special process design to meet extreme customer requirements / Oswald W., Streisselberger A., Thul R., Nehrenberg M.-J., Kirsch J. // METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuous Cast. Conf. and 6 th Int. Roll. Conf., Dusseldorf, June 20-22, 1994: Proc. Vol. 2.- Dusseldorf, 1994. pp. 42-51.
5. New developments in improving shape control, uield and flexibility of heavy plate mills / Aqrusti K., De Vito A., Liquory A.G., Paolicchi M. // METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuous Cast. Conf. and 6 th Int. Roll. Conf., Dusseldorf, June 20-22, 1994: Proc. Vol. 2. Dusseldorf, 1994, pp. 86-92.
6. Latest Plate Production Technology of Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation / Yuji Nomiyama, Takeo Yazawa, Hirotugu Yasui // Nippon Steel & Sumitomo metal technical report, no. 110, September 2015, pp. 8-16.
7. Baskov S.N., Karandaev A.S., Osipov O.I. Electric power parameters of electric drives and development of systems of forming rolling of slabs for 2800 rolling mill // *Privodnaya tekhnika* [Electric drive equipment]. 1999, no. 1-2, pp. 21–24. (In Russian)
8. Gasiyarov V.R. Adjustment of speeds of electric drives and hydraulic screw-down structures at automatic control of the strip plate shape. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2018, no. 4(41), pp. 22-29. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-22-29. (In Russian)
9. Shubin A.G., Loginov B.M., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Karandaev A.S. System of Automated Control of Hydraulic Screw-down Mechanisms of Plate Mill Stand. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015, 6 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414858.
10. Karandaev, A.S. Radionov A.A., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Shubin A.G. Automatic Gauge Control System with Combined Control of the Screw-Down Arrangement Position // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk, 2014. Vol. 1. P. 88-94. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040794.
11. Prinz K., Steinboeck A., Müller M., Ettl A., Kugi A. Automatic gauge control under laterally asymmetric rolling conditions combined with feedforward, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 3, pp. 2560–2568, 2017. DOI: 10.1109/TIA.2017.2660458.
12. Identification and optimization for hydraulic roll gap control in strip rolling mill / SUN Jie, CHEN Shu-zong, HAN Huanhuan, CHEN Xing-hua, CHEN Qiu-jie, ZHANG Dian-hua // J. Cent. South Univ. (2015) 22: 2183–2191/ DOI: 10.1007/s11771-015-2742-0.
13. John P, Nicholas S.S, Marwan A.S. A new strategy for optimal control of continuous tandem cold metal rolling. IEEE Transactions on Industry Application, 2010, 46(2), pp. 703–711.
14. Modeling and control of plate thickness in hot rolling mills / Roland Heeg, Andreas Kugi, Olivier Fichet, Laurent Irastorza, Christophe Pelletier // IFAC Proceedings Volumes. Vol. 38, issue 1, 2005, pp. 13-18. DOI: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01681.
15. Salganik V.M., Gun I.G., Karandaev A.S., Radionov A.A. *Tonkoslyabovye liteino-prokatnye agregaty dlya proizvodstva stalnykh polos* [Thin slab casting and rolling plants for steel strip production]. M.: Bauman MSTU, 2003. 506 p. (In Russian)
16. Diego Alvarez , Alberto B. Diez, Faustino Obeso. Slab curvature compensation in hot rolling mill by means o Fuzzy Control, Paper at the III seminar on rolling Mill Rolls , Instituto Latinoamericano del Fierro v Acero, Maxico, March, 9, 1988.
17. Ji Yafeng, Zhang Dianhua, Chen Shuzong, Sun Jie, LI Xu, Di Hongshuang, Algorithm Design and Application of Novel GMAGC based on Mill Stretch Characteristic Curve,

- Journal of Central South University March 2014, Vol. 21, Issue 3, pp. 942-947.
18. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drive control systems]. M.: Academy, 2005. 300 p. (In Russian)
 19. Plotnikov Yu.V., Polyakov V.N. *Sistemy upravleniya elektroprivodami postoyannogo toka* [Control systems of direct current electric drives] (Sinamics DCM converter): textbook. Yekaterinburg: Publishing house of the Ural University, 2017. 96 p. (In Russian)
 20. <http://bsystem.ru/Portals/0/store/docs/f1055642-9184-4742-b677-e55c51ca15ce.pdf>.
 21. Klyuchev V.I. *Ogranichenie dinamicheskikh nagruzok elektroprivoda* [Limitation of dynamic loads of electric drive]. Moscow: Energy, 1971. 380 p. (In Russian)
 22. Tselikov A.I., Polukhin P.I., Grebenik V.M. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. Mashiny i agregaty dlya proizvodstva prokata* [Machines and equipment of metallurgical plants. Machines and equipment for rolling]. Moscow: Metallurgy, 1988. vol. 3. 680 p. (In Russian)
 23. Baskov S.N., Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Khramshin V.R., Odintsov K.E. [Development of mathematical model of interrelated electric systems of a rolling stand of a plate mill]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Universities. Electrical engineering]. 2017, vol. 60, no. 6, pp. 55–64. (In Russian)
 24. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Baskov S.N., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Mathematical Modeling of Mechatronics System "Hydraulic Screwdown Mechanism - Electric Drive of Rolling Mill Stand". 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, 361, 012020. DOI:10.1088/1757-899X/361/1/012020.
 25. Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. Mathematical description of the main electric drive of the hot plate rolling mill 5000. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*. 2015, vol. 2, no. 3, pp. 62–66.
 26. Shokhin V.V., Permyakova O.V., Kisel E.S. Investigation of electrical system of a rolling stand. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2014, no. 23, pp. 40–43. (In Russian)
 27. Reifental U., Nguzen Hong Ha, Bannack A. Beseitigung der Ebenheitsabweichungen im Walzgut bei Umkerwalymaschinen in Twindrive-Ausführung durch eine Winkelgleichlaufregelung der Antiebsstränge Magdeburg, 1996, 44 p.

Гасияров В.Р., Логинов Б.М., Воронин С.С. Повышение точности регулирования толщины раската в режиме профилированной прокатки средствами электро- и гидропривода // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 2(43). С. 43-53. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-43-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-43-53)

Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Voronin S.S. Improving the Control Accuracy of the Strip Plate During Shaped Rolling Using Electric and Hydraulic Drives. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 43-53. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-43-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-43-53)

Метельков В.П., Либерман Я.Л.

УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ РЕЖИМА ПУСКА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

В статье обсуждаются проблемы, связанные с пуском длинного ленточного конвейера, приводимого в движение асинхронным двигателем. Рассматриваются динамические нагрузки в ленте конвейера при пуске, вызывающие проскальзывание конвейерной ленты на тяговом барабане, ведущее к ее преждевременному износу. Актуальность темы связана с высокой стоимостью конвейерной ленты, достигающей 60% от стоимости всего конвейера и более. Целью работы является выяснение возможностей сокращения износа конвейерной ленты, в том числе за счет использования для этого возможностей, предоставляемых системой электропривода. Отмечается возможность снижения вероятности проскальзывания конвейерной ленты за счет увеличения начального натяжения ленты. Однако постоянное большое натяжение также ускоряет износ ленты. Для решения этой проблемы предлагается использование устройств автоматического регулирования натяжения, а также уменьшение динамических нагрузок в ленте путем использования устройств плавного пуска на основе тиристорного преобразователя напряжения, обеспечивающего регулирование амплитуды напряжения на статоре двигателя. Обсуждаются особенности нагрева асинхронного двигателя при пуске с постоянной скоростью вращения магнитного поля. Рассматривается взаимосвязь длительности пуска и нагрева статорной обмотки двигателя с динамическими нагрузками, возникающими в конвейерной ленте в пусковых режимах. Приводятся результаты моделирования, полученные с помощью пакета *Simulink*. Поскольку длительные пусковые режимы асинхронных электроприводов на основе тиристорных преобразователей напряжения могут приводить к перегреву двигателя, особенно при повторных пусках конвейера при полной нагрузке и в условиях жаркого климата, в пусковых режимах целесообразно использовать устройства автоматического регулирования натяжения ленты конвейера, обеспечивая этим уменьшение преждевременного износа ленты при снижении нагрева двигателя конвейера.

Ключевые слова: конвейер, асинхронный двигатель, устройство плавного пуска, динамические нагрузки, моделирование, тяговый фактор, обмотка статора, нагрев.

ВВЕДЕНИЕ

Ленточные конвейеры – один из наиболее распространенных видов транспортирующих машин. Они применяются в производстве стройматериалов и строительстве, металлургии и в горнодобывающей промышленности, в пищевой промышленности и сельском хозяйстве... Предназначаются такие конвейеры для перемещения сыпучих и кусковых материалов и могут иметь различные конструкции. Тем не менее все они состоят из трех основных частей: головной, включающей в себя приводной барабан с механизмом его вращения и электродвигателем, средней, представляющей собой специальную металлоконструкцию с роликоопорами, и хвостовой, включающей в себя натяжной барабан с механизмом его линейного перемещения. Барабаны конвейера охвачены бесконечной (замкнутой) лентой, выполняющей функции несущего (транспортирующего) и тягового органа, причем ее верхняя ветвь является грузовой, а нижняя – холостой. Конвейерные ленты могут выполняться резинотканевыми и резинотросовыми. Первые состоят из 3–8 тканевых прокладок, между которыми находится резина, и используются для перемещения грузов на небольшие расстояния (до 150 м). Вторые представляют собой ряд параллельных тросов, защищенных резиновыми обкладками и используются в магистральных конвейерах (длиной до 2000 м). Ширина первых обычно не превышает 1 м, вторых иногда достигает 2 м.

Работают ленточные конвейеры в различных производственных и климатических условиях: на открытом воздухе и под землей, в отапливаемом и неотапливаемом помещении, при значительных колебаниях температуры окружающей среды, ее влажности и за-

пыленности. Работоспособность конвейеров в указанных условиях во многом определяется коэффициентом сцепления $K_{сц}$ ленты и барабана. Поэтому поверхность последнего в одних случаях выполняется гладкой стальной ($K_{сц}$ достигает 0,35), в других случаях футеруется прорезиненной лентой ($K_{сц}$ достигает 0,4) или даже просто резиной ($K_{сц}$ достигает 0,5). Но коэффициент $K_{сц}$ в процессе эксплуатации конвейера не остается постоянным. Лента вытягивается и изнашивается, поверхность барабана независимо от наличия футеровки также подвергается износу. В результате $K_{сц}$ может снизиться до величины 0,1 и менее, что, в свою очередь, может повлечь за собой проскальзывание ленты по барабану.

Величина $K_{сц}$ весьма существенно зависит от натяжения ленты, поэтому последнюю для гарантирования $K_{сц}=\max$ и предотвращения проскальзывания обычно выбирают с запасом. Однако, в таком случае возможно неоправданное перенапряжение ленты, приводящее к ее преждевременному старению. Как следствие, может потребоваться неплановая замена ленты и дополнительно к этому ремонт барабана. При этом не известно точно, какое начальное натяжение потребует каждый раз при изменении внешних условий (величины нагрузки, увлажнении ленты).

Экономические расчеты показывают, что стоимость ленты составляет в среднем 50...60% стоимости конвейера, а для шахтных конвейеров достигает 67% [1]. Статистические исследования, полученные при эксплуатации лент на предприятиях черной и цветной металлургии, дают следующее распределение видов разрушения ленты: рабочей обкладки – 56%, каркаса – 20%, бортов – 13% [2]. В [3] указывается, что экспериментальными исследованиями установлено, что на износ нижней обкладки, в том числе от пробуксовки,

для протяженных ленточных конвейеров составляет более 50% от всех видов износа. Таким образом, ускоренный износ ленты приводит к очень серьезным экономическим потерям.

Во избежание отмеченной выше проблемы, авторами статьи разработаны три варианта системы автоматического регулирования натяжения конвейерной ленты, обеспечивающие не максимальное, а необходимое и достаточное натяжение [4–6]. Сущность предложений базируется на сравнении угловых скоростей приводного и натяжного барабанов конвейера. Соотношение их скоростей изменяется при появлении проскальзывания ленты. В зависимости от результатов сравнения скоростей выполняется перемещение оси натяжного барабана, создающее требуемое натяжение. При использовании предлагаемых решений нет необходимости постоянно завышать натяжение в процессе работы конвейера, благодаря чему снижается износ ленты.

ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ В ЛЕНТЕ КОНВЕЙЕРА И ПУТИ ИХ УМЕНЬШЕНИЯ

Конвейер представляет собой электромеханическую систему с упругим тяговым органом и распределенными по его длине параметрами: массами перемещаемого груза и тягового органа, усилиями сопротивления движению. Поэтому при пуске ленточных конвейеров большой длины происходит распространение упругих колебаний вдоль ленты. В этом случае динамические усилия суммируются со статическими и могут вызывать нарушение условий отсутствия проскальзывания ленты на барабанах, а также приводить к недопустимому увеличению нагрузок в звеньях механизма [7]. Колебательные явления в ленте приводят к сокращению срока ее службы [8], особенно опасны они при запуске загруженного конвейера [9].

В процессе установившегося движения конвейера предложенные системы для автоматического регулирования натяжения ленты работают вполне удовлетворительно. Если, однако, пуск конвейера производится резко, то в их функционировании не исключены сбои, обусловленные запаздыванием начала вращения натяжного барабана из-за упругости ленты и инерционных нагрузок на нее. По этой причине, а также во избежание порывов ленты конвейеры, даже оснащенные предложенными системами регулирования, как правило, следует запускать достаточно плавно, ограничивая динамические нагрузки. Для решения задачи ограничения таких нагрузок и предотвращения проскальзывания ленты при пуске конвейеров, приводимых в движение асинхронными двигателями (АД), в современной практике используются устройства плавного пуска (УПП) на основе тиристорных преобразователей напряжения (ТПН).

Моделирование показывает, что в разомкнутой системе асинхронного электропривода с УПП из-за волновых процессов при пуске длинных конвейеров не удастся эффективно ограничить динамические нагрузки в конвейерной ленте. В результате амплитуда сил натяжения в конвейерной ленте при использовании УПП в разомкнутой системе электропривода мало отличается от случая прямого пуска из-за того, что не удастся сформировать желаемую форму графика мо-

мента приводного двигателя в переходном процессе [10]. Наиболее эффективно использование УПП в замкнутых системах электропривода, что создает возможность целенаправленного формирования желаемой зависимости момента двигателя от времени. Структуры таких систем для приводов с АД хорошо отработаны в современной теории и практике электропривода, в том числе и для электроприводов, управляемых по амплитуде первой гармоники напряжения [11]. При этом имеется возможность строить системы электропривода с АД на основе ТПН с бездатчиковым формированием обратной связи по скорости, что повышает надежность функционирования системы [12].

На рис. 1 показаны результаты моделирования пуска под нагрузкой конвейера длиной 139 м с грузовым натяжным устройством, со скоростью движения ленты 1,6 м/с и производительностью 600 т/ч, приводимого в движение двигателем 4А225М4 мощностью 55 кВт. Лента моделировалась как звено с распределенными по длине параметрами.

Для оценки величины нагрузок в конвейерной ленте выбрана величина натяжения в зоне набегания грузовой (верхней) ветви ленты на приводной барабан, где наблюдается наибольшая амплитуда сил натяжения. Процессы на рис. 1 построены для начального натяжения ленты $F_{нат0}=16,7$ кН. На рис. 1 показаны графики отношения натяжений набегающей $S_{нб}$ и сбегающей $S_{сб}$ ветвей ленты при пуске в замкнутой по скорости системе с УПП и с темпом задатчика интенсивности, обеспечивающим разгон за 5, 10 и 50 с. Видно, что соотношение натяжений очень существенно зависит от темпа разгона. Отметим, что процессы для времени разгона 5 и 10 с, полученные на модели, не могли бы быть реализованы на практике из-за слишком больших максимумов отношения $S_{нб}/S_{сб}$, при которых будет возникать пробуксовка. Для отсутствия пробуксовки требуется, чтобы выполнялось условие $S_{нб}/S_{сб} < e^{\mu\alpha}$, где μ – коэффициент трения ленты о поверхность барабана; α – угол обхвата лентой барабана, рад. Величину $e^{\mu\alpha}$, определяющую тяговую способность барабана, называют тяговым фактором. Для конструкции конвейера с одним приводным барабаном тяговый фактор имеет величину порядка 3,0 [13].

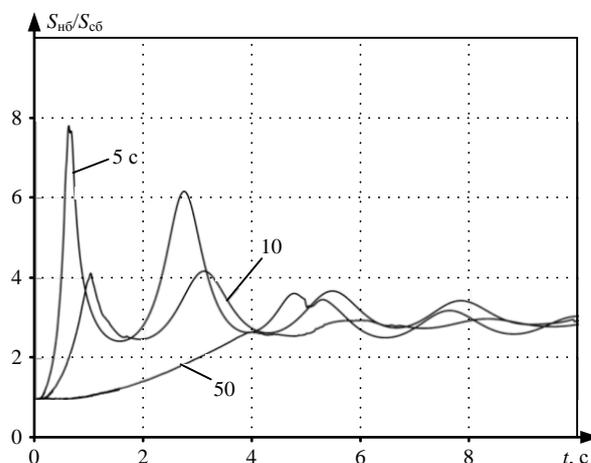


Рис. 1. Графики отношения натяжений набегающей и сбегающей ветвей ленты для продолжительности пуска 5, 10 и 50

Таким образом, для обеспечения требуемой плавности разгона конвейера и эффективного снижения динамических нагрузок в конвейерной ленте необходимо задавать достаточно большое время пуска. Однако при длительном процессе пуска в системе ТПН-АД приходится сталкиваться с быстрым нарастанием температуры обмоток АД, что вызывается большой величиной греющих потерь, выделяющихся при низких скоростях в процессе пуска, происходящего при постоянной скорости вращения магнитного поля АД.

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИВОДНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
КОНВЕЙЕРОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПУСКЕ

Выясним связь между темпом нарастания скорости и нагревом обмоток АД в системе с УПП на основе ТПН. Будем рассматривать нагрев обмотки статора, так как эта обмотка изолированная, что увеличивает подверженность ее последствиям термических перегрузок. Получим выражения для повышения температуры обмотки статора при пуске $\Delta\theta_s$. Оно определяется выделившейся энергией $W_{\Sigma s}$ и ушедшей в охлаждающую обмотку статора среду $W_{s.out}$:

$$\Delta\theta_s = \frac{W_{\Sigma s} - W_{s.out}}{C_s}, \quad (1)$$

$$W_{\Sigma s} = \int_0^{t_n} \Delta P_{\Sigma s} dt, \quad (2)$$

где $\Delta P_{\Sigma s}$ – суммарная мощность потерь в обмотке статора; C_s – теплоемкость обмотки статора.

$$W_{s.out} = \int_0^{t_n} \sum_{k=1}^m (\theta_s - \theta_{0k}) \lambda_{s,0k} dt. \quad (3)$$

В состав энергии $W_{\Sigma s}$, кроме энергии W_s , входят еще джоулевы потери от гармоник тока статора ($W_{\Sigma s} = k_{s.n} W_s$, где $k_{s.n}$ – коэффициент, учитывающий потери в обмотке статора от высших гармоник в случае работы электропривода с тиристорным преобразователем напряжения).

Подъем средней температуры обмотки статора при адиабатическом нагреве запишем как

$$\Delta\theta'_s = W_{\Sigma s} / C_s. \quad (4)$$

Энергию, отдаваемую в окружающую среду, можно представить следующим образом:

$$W_{s.out} = \int_0^{t_n} \lambda_{s.out}(t) [\Delta\theta_s(t) - \Delta\theta_{s.out}(t)] dt. \quad (5)$$

где $\lambda_{s.out}(t)$ – теплоотдача от обмотки статора в окружающую среду; $\Delta\theta_s(t)$ – зависимость от времени превышения средней температуры обмотки статора над начальным значением; $\Delta\theta_{s.out}(t)$ – зависимость от времени превышения средней температуры окружающей среды над начальным значением.

$$\Delta\theta_{s.out} = \frac{\sum_{i=1}^l \Delta\theta_{s.out,i} \lambda_{s.out,i}}{\sum_{i=1}^l \lambda_{s.out,i}}, \quad (6)$$

где $\Delta\theta_{s.out,i}$ – превышение температуры i -го элемента окружающей среды, к которому направлен тепловой поток от ротора; $\lambda_{s.out,i}$ – теплопроводность от ротора к i -му элементу окружающей среды; l – количество элементов, к которым уходит тепловой поток от ротора.

Обозначим

$$\lambda_{s.out}^*(t) = \frac{\lambda_{s.out}(t)}{\lambda_{s.outN}}, \quad (7)$$

где $\lambda_{s.outN}$ – теплоотдача от обмотки статора в окружающую среду при номинальной скорости двигателя.

Если обозначить $\Delta\theta_s(t) - \Delta\theta_{r.out}(t)$ как $k_{\theta s} \Delta\theta_s(t)$, то можно записать выражение (1) с учетом (4), (5) и (7) как

$$\Delta\theta_s = \Delta\theta'_s - \frac{\bar{k}_{\theta s}}{T_{s.outN}} \int_0^{t_n} \lambda_{s.out}^*(t) \Delta\theta_s(t) dt, \quad (8)$$

где $\bar{k}_{\theta s}$ – усредненное за время пуска значение коэффициента $k_{\theta s}$, а $T_{s.outN} = C_s / \lambda_{s.outN}$ – отношение теплоемкости обмотки статора к суммарной теплоотдаче от нее к окружающим элементам и охлаждающему воздуху при номинальной скорости.

Зависимость относительной теплоотдачи $\lambda_{s.out}^*(t)$ можно аппроксимировать выражением

$$\lambda_{s.out}^*(t) = a_{\lambda s} + b_{\lambda s} \frac{\omega^{\beta_s}(t)}{\omega_N^{\beta_s}}, \quad (9)$$

где $a_{\lambda s}$, $b_{\lambda s} \equiv 1 - a_{\lambda s}$ и β_s – константы.

Решение интегрального уравнения, математически идентичного уравнению (8), было получено в [14]. Следуя [14], получим решение уравнения (8) в виде

$$\chi_s = -\frac{k_{\theta s}}{T_{s.outN}}; \quad B_s = \frac{b_{\lambda s}}{n\beta_s + 1} \left(\frac{\omega_{кон}}{\omega_N} \right)^{\beta_s}.$$

Рассмотрим влияние продолжительности пуска привода в системе ТПН-АД на нагрев обмотки статора. Энергию, выделяющуюся в обмотке статора АД при пуске с постоянной скоростью вращения магнитного поля, можно представить следующим образом [15]:

$$W_s = \frac{1}{k_t^2} \cdot \frac{R_s}{R'_{r\xi}} W_r, \quad (11)$$

где k_t – усредненное отношение тока ротора к току статора при пуске; $R'_{r\xi}$ – усредненное значение сопротивления ротора с учетом вытеснения тока.

Используя соотношение (11), можно из выражения (10) получить условие, при котором увеличение продолжительности пуска за счет уменьшения ограничения тока статора (в системе, замкнутой по току статора) или за счет уменьшения темпа задатчика интенсивности (в системе, замкнутой по скорости) будет приводить к снижению нагрева обмотки:

$$W_k > \frac{W_{rc}}{-\chi_s t_n (a_{\lambda s} + B_s)}, \quad (12)$$

где W_{rc} – доля энергии, выделяющейся за время пуска в обмотке ротора, определяемая работой по преодолению момента сопротивления со стороны механизма; W_k – кинетическая энергия, запасаемая в маховых массах привода за время разгона.

Отметим, что соотношение (12) носит очень приближенный характер. Можно получить более точные соотношения для оценки возможности влиять на нагрев обмотки статора посредством управления пуском АД с помощью ТПН. Представим соотношение (4) как

$$\Delta\theta'_s = \frac{W_{s,const} + W_{s,var}}{C_s}, \quad (13)$$

где $W_{s,const}$ – составляющая выделившейся в обмотке статора энергии, не зависящая от времени пуска; $W_{s,var}$ – составляющая, пропорциональная времени пуска.

Обозначим $\bar{p}_{s,var} = W_{s,var}/t_{п}$. Тогда можем представить (10) как

$$\Delta\theta_s = \frac{W_{s,const} + \bar{p}_{s,var} t_{п}}{C_s [1 - \chi_s t_{п} (a_{\lambda_s} + B_s)]}. \quad (14)$$

Для того чтобы при увеличении продолжительности пуска максимум температуры обмотки статора уменьшался, необходимо выполнение условия $d\Delta\theta_s/dt_{п} < 0$. Не представляет трудности убедиться, что это условие достигается при выполнении условия

$$W_{s,const} > \frac{\bar{p}_{s,var}}{-\chi_s (a_{\lambda_s} + B_s)}. \quad (15)$$

Оценим выполнение условия (12) для привода конвейера. Известны выражения для потерь энергии в обмотке статора АД при пуске в системе ТПН-АД с заданным ускорением [16, 17]:

$$W_{\Sigma_s} = \frac{k_{s,п} \Delta P_{sN} M \omega_0 (D_1 - D_2)}{\varepsilon M_N}, \quad (16)$$

где ΔP_{sN} – номинальная мощность потерь в обмотке статора; ε – ускорение; s_N и $s_{кон}$ – номинальное и конечное скольжение; $D_1 = [(1-A)/2s_N](1-s_{кон}^2)$; $D_2 = As_N \ln(s_{кон})$; $A \approx (I_0/I_{sN})^2$ [18].

Выразив момент двигателя как $M = J_{\Sigma пр} \varepsilon + M_c$, а также $\varepsilon = \omega_{кон}/t_{п}$, из (16) получим:

$$W_{s,const} = \frac{k_{s,п} \Delta P_{sN} J_{\Sigma пр} \omega_0 (D_1 - D_2)}{M_N}, \quad (17)$$

$$\bar{p}_{s,var} = \frac{k_{s,п} \Delta P_{sN} M_c \omega_0 (D_1 - D_2)}{\omega_{кон} M_N}. \quad (18)$$

Из (12), а также (17) и (18) вытекает, что при разгоне в системе ТПН-АД с постоянными величинами момента двигателя и момента сопротивления снижение темпа разгона приведет к снижению нагрева обмотки статора только при выполнении условия

$$J_{\Sigma пр} > \frac{M_c}{-\chi_s (a_{\lambda_s} + B_s) \omega_{кон}}. \quad (19)$$

При параметрах упомянутого выше привода конвейера условие (19) выполнялось бы только, если бы величина $J_{\Sigma пр}$ превышала $580 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, в то время как она составляет лишь $2,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ при полной загрузке ленты. Следовательно, при таком соотношении параметров привода, а оно весьма типично для конвейерных электроприводов, при уменьшении темпа разгона нагрев обмотки статора будет только возрастать, что и подтверждается моделированием. Также отметим, что при пуске после аварийного останова с короткой паузой максимальная температура обмотки может оказаться существенно выше, чем при пуске из холодного состояния. Это хорошо видно на **рис. 2**, где показано изменение температуры элементов двигателя после перезапуска из нагретого состояния при температуре окружающей среды 25°C и начальном натяжении ленты $F_{нат0} = 16,7 \text{ кН}$. Здесь обозначены температуры: 1 и 2 – лобовых и пазовых частей обмотки статора; 3 – усредненная температура ротора; 4 – стали статора; 5 – станины. Здесь важно учитывать, что превышение температуры изоляции обмотки двигателя над допустимым значением температуры для данного класса нагревостойкости приводит к удвоению скорости термического старения изоляции на каждые $8...10^\circ\text{C}$ превышения. Отметим, что в двигателе 4A225M4 используется изоляция с классом нагревостойкости F, для которой по ГОСТ допустимая температура составляет 155°C .

Таким образом хорошо видно, что попытка снизить динамические нагрузки в ленте и вероятность пробуксовки за счет снижения темпа разгона приводит к увеличению нагрева двигателя. Эта закономерность отражена на **рис. 3**, где представлены результаты моделирования механических процессов конвейерной ленты и термодинамических процессов в приводном двигателе 4A225M4 при разных величинах темпа разгона (каждая точка на этом рисунке соответствует определенному темпу разгона, для которого показаны значения максимума $S_{нг}/S_{сб}$ и максимума температуры лобовых частей обмотки статора ($\theta_{\text{лоб, макс}}$) при однократном пуске из холодного состояния при $\theta_0 = 40^\circ\text{C}$). Здесь обозначено: \square – $F_{нат0} = 15,0 \text{ кН}$; \circ – $F_{нат0} = 16,5 \text{ кН}$; Δ – $F_{нат0} = 18,0 \text{ кН}$, пунктиром показаны тренды, штрихпунктирные линии указывают на пересечение трендом уровня тягового фактора $e^{\mu\alpha} = 3,0$. На **рис. 3** видно, что стремление снизить соотношение натяжений $S_{нг}/S_{сб}$ при пуске за счет снижения темпа разгона до приемлемого по условиям пробуксовки значения может приводить к очень сильному нагреву обмотки статора.

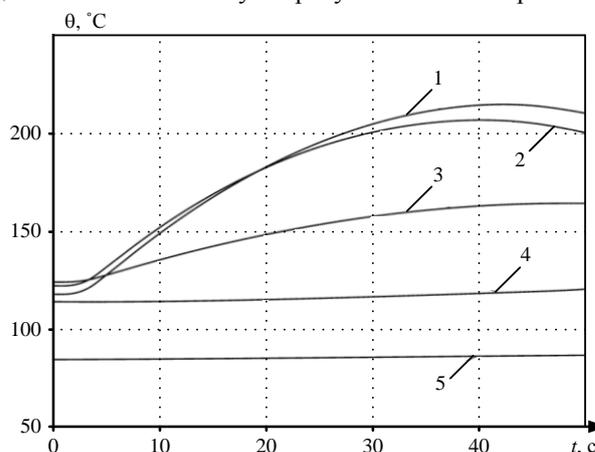


Рис. 2. Температура элементов двигателя при перезапуске

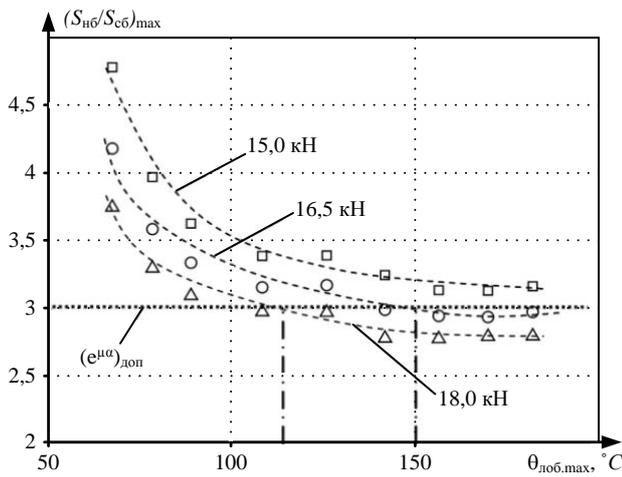


Рис. 3. Максимумы $S_{н0}/S_{сб}$ и $\theta_{л0б,маx}$ при различном темпе разгона конвейера

Как следует из рис. 3, снизить нагрев обмотки статора при использовании УПП на основе ТПН можно за счет сокращения времени запуска. Однако для предотвращения пробуксовки при этом потребуются снизить максимум отношения $S_{н0}/S_{сб}$ в процессе разгона. С этой целью возможно использование упомянутых выше технических решений, обеспечивающих автоматическую коррекцию величины натяжения ленты, что позволяет использовать более быстрый разгон, снижая тем самым нагрев двигателя к концу пуска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналитическим путем, а также с использованием компьютерного моделирования для асинхронных электроприводов конвейеров показано следующее:

- для ограничения динамических нагрузок в пусковых режимах конвейеров и ограничения проскальзывания ленты требуется использовать замкнутые системы электропривода, обеспечивающие возможность организации плавного пуска;
- длительные пусковые режимы асинхронных электроприводов на основе ТПН могут приводить к перегреву двигателя, особенно при повторных пусках конвейера при полной нагрузке и в условиях жаркого климата;
- с целью обеспечения возможности ускорения пусковых процессов конвейера при отсутствии проскальзывания и преждевременного износа ленты, а также снижения нагрева двигателя конвейера в пусковых режимах целесообразно использовать устройства автоматического регулирования натяжения ленты конвейера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика выбора параметров резиноканевых конвейерных лент для карьеров и дробильных фабрик предприятий чёрной металлургии при помощи ЭВМ. Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1982. 28 с.

2. Полуниин В.Т., Гуленко Г.Н. Эксплуатация мощных конвейеров. М.: Недра, 1986. 344 с.

3. Кожубаев Ю.Н. Снижение интенсивности изнашивания транспортных лент протяженных конвейеров средствами электропривода с нечетким регулятором: автореф. дис... к.т.н. 05.09.03. СПб., 23 с.

4. Пат. на полезную модель № 96565 Российская Федерация, МПК В65G 23/44 (2006.01). Ленточный конвейер / Я.Л. Либерман, В.П. Метельков. № 2009147425/22, заявл. 21.12.2009; опубл. 10.08.2010, бюл. № 22.

5. Пат. на полезную модель № 96564 Российская Федерация, МПК В65G 15/28 (2006.01). Ленточный конвейер / Я.Л. Либерман, В.П. Метельков. № 2009147427/22, заявл. 21.12.2009; опубл. 10.08.2010, бюл. № 22.

6. Пат. на полезную модель № 97721 Российская Федерация, МПК В65G 23/44 (2006.01). Конвейер / Я.Л. Либерман, В.П. Метельков. № 2009147433/11, заявл. 21.12.2009; опубл. 20.09.2010, бюл. № 26.

7. Галкин В.И. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В.И. Галкин, В.Г. Дмитриев, В.П. Дьяченко, И.В. Запенин, Е.Е. Шешко. М.: Горная книга, Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2011. 545 с.

8. Дмитриев В.Г., Галкин В.И. Исследование динамических нагрузок на роlikоопорах загрузочных и линейных секций ленточных конвейеров при транспортировании крупных кусков // Изв. вузов. Горный журнал. 1975. № 1. С. 108–112.

9. Турпищева М.С., Дульгер Н.В., Пенский В.К. Проблемы надежности ленточных конвейеров портовых зерновых терминалов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология, 2015. №1. С. 109–112.

10. Зюзев А.М., Метельков В.П. Исследование пусковых режимов электропривода конвейеров // Электротехника. 2009. № 9. С. 41–45.

11. Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. М.: Энергоатомиздат, 1988. 224 с.

12. Зюзев А.М., Нестеров К.Е. Методы косвенной оценки скорости двигателей в системах ТПН-АД // Электротехника. 2009. № 9. С. 45–49.

13. Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. М.: Машиностроение, 1987. 336 с.

14. Зюзев А.М., Метельков В.П. Аналитический метод оценки нагрева обмотки ротора высоковольтных асинхронных двигателей в пусковых режимах // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 1 (34). С. 60–67.

15. Асинхронные двигатели общего назначения / Е.П. Бойко, Ю.В. Гаинцев, Ю.М. Ковалев и др.; под ред. В.М. Петрова, А.Э. Кравчика. М.: Энергоатомиздат, 1980. 488 с.

16. Браславский И.Я., Ишматов, З.Ш. Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 256 с.

17. Браславский И.Я., Зюзев А.М. Опыт внедрения тиристорных электроприводов с фазовым управлением // Автоматизированный электропривод. Вып. 3. Свердловск: ЦНТИ, 1981. 47 с.

18. Браславский И.Я. О снижении энергопотребления асинхронных электроприводов с тиристорными преобразователями напряжения // Электричество. 1988. № 11. С. 58–60.

Поступила в редакцию 06 марта 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CHOOSING THE BELT CONVEYOR START MODE

Vladimir P. Metelkov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Plants, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru

Yakov L. Liberman

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Machines and Tools, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ya.l.liberman@urfu.ru

The paper is concerned with the problems associated with starting a long conveyor driven by an induction motor. We consider the dynamic loads in the conveyor belt during start-up, which cause slippage of the conveyor belt on the traction drum leading to its premature deterioration. The relevance of the topic is associated with the high cost of the conveyor belt reaching 60% of the cost of the entire conveyor and more. The aim of the work is to ascertain the possibilities of reducing the wear of the conveyor belt, for example, through the use of the possibilities provided by the system of the electric drive. The possibility of reducing the probability of the conveyor belt slippage by increasing the initial belt tension is noted. However, constant high tension also accelerates belt deterioration. To solve this problem, the use of automatic tension control devices is proposed, as well as the reduction of dynamic loads in the belt by using soft starters based on a thyristor voltage converter, which regulates the amplitude of voltage on the motor stator. The features of an asynchronous motor heating when starting with a constant speed of rotation of the magnetic field are discussed. The interrelation between the start-up duration and the motor stator winding heating with the dynamic loads occurring in the conveyor belt in start-up modes is considered. Modeling results obtained using the *Simulink* package are presented. Since long start-up modes of asynchronous electric drives based on thyristor voltage converters can lead to motor overheating, especially when the conveyor is restarted under full load and in hot climates, it is advisable to use automatic conveyor belt tension control devices during start-up modes thereby reducing premature belt deterioration together with a decrease in the conveyor motor heating.

Keywords: conveyor, induction motor, soft-starter, dynamic loads, modeling, traction factor, stator winding, heating.

REFERENCES

1. *Metodika vybora parametrov rezinotkanevykh konveyernykh lent dlya karyerov i drobilnykh fabrik predpriyatiy chornoy metallurgii pri pomoshchi EVM* [Methods of selection of parameters of rubber-fabric conveyor belts for quarries and crushing factories of ferrous metallurgy enterprises using a computer]. Sverdlovsk: IGD MCHM USSR, 1982. 28 p. (In Russian)
2. Polunin V.T., Gulenko G.N. *Ekspluatatsiya moshchnykh konveyerov* [Exploitation of powerful conveyors]. Moscow: Nedra, 1986. 344 p. (In Russian)
3. Kozhubayev YU.N. *Snizheniye intensivnosti iznashivaniya transportnykh lent protyazhennykh konveyerov sredstvami elektroprivoda s nechetkim regulyatorom* [Reducing the wear rate of conveyor belts of long conveyors by means of an electric drive with a fuzzy regulator. Abstract of Ph.D. diss.]. St. Petersburg, 2016. 23 p.
4. Liberman Ya.L., Metelkov V.P. *Lentochnyy konveyer* [Belt conveyor]. Patent RF, no. 96565, 2010. Bull. no. 22.
5. Liberman Ya.L., Metelkov V.P. *Lentochnyy konveyer* [Belt conveyor]. Patent RF, no. 96564, 2010. Bull. no. 22.
6. Liberman Ya.L., Metelkov V.P. *Konveyer* [Conveyor]. Patent RF, no. 97721, 2010. Bull. no. 26.
7. Galkin V.I., Dmitriyev V.G., Dyachenko V.P., Zapenin I.V., Sheshko Ye.Ye. *Sovremennaya teoriya lentochnykh konveyerov gornyykh predpriyatiy* [Modern theory of belt conveyors of mining enterprises]. Moscow: Gornaya kniga Publ, 2011, 545 p. (In Russian)
8. Dmitriyev V.G., Galkin V.I. Investigation of dynamic loads on roller support of loading and linear sections of belt conveyors during transportation of large pieces. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. [University news. Mountain Journal], 1975, no 1, pp. 108–112. (in Russian)
9. Turpishcheva M.S., Dulger N.V., Penskiy V.K. Issues of reliability of belt conveyors of port grain terminals. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Astrakhan State Technical University]. Series: Marine Engineering and Technology, 2015, no. 1, pp. 109–112. (in Russian)
10. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. [Study of Start-Up Modes of Conveyor Drives]. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2009, no. 9, pp. 41–45. (in Russian)
11. Braslavskiy I.Ya. *Asinkhronnyy poluprovodnikovyy elektroprivod s parametricheskim upravleniyem* [Asynchronous semiconductor electric drive with parametric control]. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 224 p. (in Russian)
12. Zyuzev A.M., Nesterov K.Ye. Methods for indirect estimation of motor speed in TVC-IM systems. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2009, no. 9, pp. 45–49. (in Russian)
13. Shakhmeyster L.G., Dmitriyev V.G. *Teoriya i raschet lentochnykh konveyerov* [Theory and calculation of belt conveyors]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1987. 336 p. (In Russian)
14. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Analytical Method for Evaluation of High-Voltage Induction Motor Rotor Winding Heating at Start-Up Mode. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 1 (34), pp. 60–67. (In Russian)
15. Boyko Ye.P., Gaintsev Yu.V., Kovalev Yu.M., et al. *Asinkhronnyye dvigateli obshchego naznacheniya* [Asynchronous motors of general purpose], under the editorship of V.M. Petrov, A.E. Kravchik. Moscow: Energoatomizdat, 1980. 488 p. (In Russian)
16. Braslavskiy I.Ya., Ishmatov, Z.Sh. Polyakov V.N. *Energosberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod* [Energy saving asynchronous electric drive]. Moscow: Publishing Center “Academy”, 2004. 256 p. (In Russian)
17. Braslavskiy I.Ya., Zyuzev A.M. *Opyt vnedreniya tiristornykh elektroprivodov s fazovym upravleniyem* [Experience in the implementation of thyristor drives with phase control]. Automated electric drive. Issue 3. Sverdlovsk: CNTI, 1981. 47 p. (In Russian)
18. Braslavskiy I.Ya. [Reducing the energy consumption of asynchronous electric drives with thyristor voltage converters]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1988, no. 11, pp. 58–60. (In Russian)

Метельков В.П., Либерман Я.Л. К вопросу о выборе режима пуска ленточного конвейера // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2(43). С. 54–59. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-54-59)

Metelkov V.P., Liberman Ya.L. Choosing the Belt Conveyor Start Mode. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 54–59. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-54-59)

Дубовик М.Е., Соловьев В.А.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СО СТОРОНЫ РОТОРА

В приводах высокой мощности, а именно свыше 100 кВт как правило, в случае использования в электроприводе асинхронных двигателей приходится ориентироваться на питание двигателя напряжением свыше 1000 В. Это обусловлено снижением массогабаритных показателей двигателя. Но при построении частотно-регулируемого электропривода необходимо использовать преобразователь частоты (ПЧ) высокого напряжения, что, в свою очередь, ведет к существенному удорожанию электропривода. Найти компромиссное решение можно путем использования машины двойного питания (МДП), канал частотного регулирования которого необходимо перенести в цепь ротора. Использование МДП позволит существенно уменьшить капитальные затраты и расширить управляющие функции над электроприводом.

В статье представлено математическое описание МДП. Особенностью данного описания является выбор системы координат. На его основе, с учетом характеристик МДП, построена динамическая модель машины. Исследованы динамические характеристики МДП при подаче управляющего сигнала со стороны ротора с переменной частотой. Управляющие сигналы представлены в виде идеальных гармонических функций. Построенная модель может быть использована для исследования динамических и статических режимов электропривода на основе МДП, например позволит исследовать пуск машины в различных режимах. Получена зависимость амплитуды напряжения ротора от его частоты. Данная эмпирическая зависимость показывает возможный диапазон изменения амплитуды напряжения на роторе при сохранении синхронного режима МДП на заданной скорости. Исследовано поведение машины в статическом режиме при изменении нагрузочного момента. Приведена имитационная модель, построенная в среде Matlab.

Ключевые слова: модель машины двойного питания, зависимость амплитуды напряжения ротора от частоты, динамический режим, устойчивость машины двойного питания.

ВВЕДЕНИЕ

Наличие двух силовых каналов управления МДП расширяет ее функциональные возможности. В последние годы при проектировании систем управления МДП ориентируются на частотное управление. Использование МДП в электроприводах посвящено большое количество публикаций [1-5]. Также работы по исследованию асинхронизированных машин представлены в работах иностранных авторов [6-9].

Одновременное использование обоих каналов регулирования целесообразно для реализации ряда специальных законов управления или для высокоточных приводов с большим диапазоном регулирования скорости. Но такое решение ведет к существенному усложнению системы управления электроприводом и росту его массогабаритных показателей.

В тех случаях, когда к системе регулируемого электропривода не предъявляются особые требования, то реализация его на базе МДП может быть построена при использовании одного канала регулирования. Определенный интерес представляет рассмотрение системы электропривода на основе МДП, в которой функция регулирования возлагается на канал управления со стороны ротора, а на канал регулирования статорной цепи возлагается возбуждение машины.

МДП представляет собой систему, состоящую из электрической машины, возбудителя и регулятора возбуждения. Структура МДП показана на **рис. 1**. Здесь возбудитель ПЧ питается от той же сети, что и статор двигателя, – через трансформатор Т.

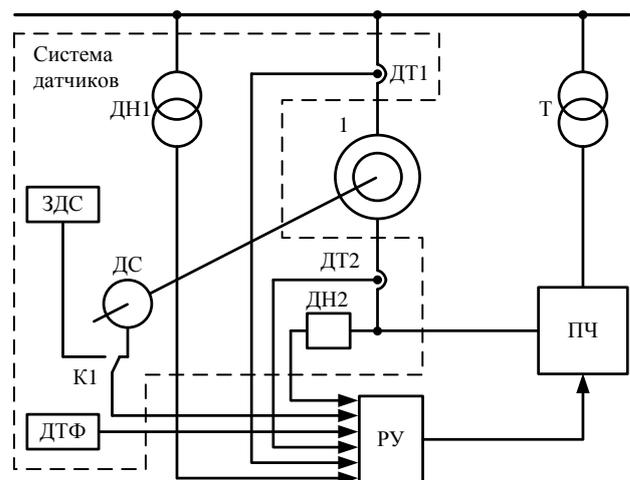


Рис. 1. Функциональная схема электропривода на базе МДП

Автоматический регулятор РУ служит для формирования требуемой функции управления машины, которая усиливается возбудителем ПЧ. Очевидно, что число выходных сигналов РУ будет равно числу фаз обмотки ротора. Для формирования функции регулирования в РУ, используется комплекс датчиков, который включает в себя следующие датчики: ДС – датчик тригонометрических функций угла поворота ротора, являющийся также датчиком скорости; ЗДС – задатчик независимой частоты (скорости); ДТФ – датчик тригонометрических функций угла изображающего вектора напряжения системы; ДТ1 и ДТ2 – датчики токов статора и ротора соответственно; ДН1 и ДН2 – датчики напряжений статора и ротора.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МДП

Рассмотрим математическое описание машины двойного питания при частотном управлении со стороны ротора. При анализе динамических характеристик МДП систему координат, как правило, ориентируют по основному потокосцеплению. Это обусловлено тем, что управление МДП осуществляется как со стороны статора, так и со стороны ротора [9, 10].

Поскольку регулирование МДП осуществляется по каналу ротора, целесообразнее привязать систему координат x, y к валу двигателя. Таким образом, управляющие проекции вектора напряжения ротора u_{2x} и u_{2y} не будут содержать в себе переменную – скорость вращения ротора ω . Такой подход позволяет реализовать математическую модель, учитывающую непосредственно только сигнал управления по цепи ротора.

Будем полагать, что скорость вращения вала двигателя определяется разностью частот напряжения статора и ротора [4]:

$$\omega = \omega_1 - \omega_2, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вращения ротора; ω_1 – угловая скорость вращения вектора напряжения статора; ω_2 – угловая скорость вращения вектора напряжения ротора.

Данная зависимость предполагает, что МДП находится в двигательном режиме, векторы напряжений, магнитных потоков статора и ротора сонаправлены и вращаются в ту же сторону, что и сам ротор МДП [4].

Если проекции векторов напряжений ротора не зависят от скорости, то скорость вращения должна быть учтена при синтезе блоков подачи управляющих сигналов. В нашем случае управляющими сигналами являются векторы напряжений статора \vec{u}_1 с питающей частотой f_1 и ротора \vec{u}_2 с питающей частотой f_2 .

При таком выборе системы координат x, y проекции вектора напряжения статора и ротора будут описываться следующими выражениями:

$$u_{1x} = U_1 \cos [(\omega_1 - \omega)t + \varphi_{10}]; \quad (2)$$

$$u_{1y} = U_1 \sin [(\omega_1 - \omega)t + \varphi_{10}];$$

$$u_{2x} = U_2 \cos [\omega_2 t + \varphi_{20}]; \quad (3)$$

$$u_{2y} = U_2 \sin [\omega_2 t + \varphi_{20}],$$

где U_1, U_2 – амплитуды напряжений статора и ротора соответственно; $\varphi_{10}, \varphi_{20}$ – начальные углы сдвига фазового напряжения статора и ротора соответственно; ω_1, ω_2 – частоты напряжений статора и ротора соответственно.

Математическое описание МДП в векторно-операторном виде:

$$\begin{cases} \vec{u}_1 = R_1 \vec{i}_1 + p \vec{\Psi}_1 + j p_n \omega \vec{\Psi}_1; \\ \vec{u}_2 = R_2' \vec{i}_2 + p \vec{\Psi}_2; \\ \vec{\Psi}_1 = L_1 \vec{i}_1 + L_m \vec{i}_2; \\ \vec{\Psi}_2 = L_m \vec{i}_1 + L_2' \vec{i}_2; \\ J_\Sigma p \omega = M_\vartheta - M_c; \\ M_\vartheta = \frac{m p_n}{2} \text{Im}(\vec{i}_1 \vec{\Psi}_1^*), \end{cases} \quad (4)$$

где \vec{i}_1, \vec{i}_2 – векторы токов статора и ротора соответственно; $\vec{\Psi}_1, \vec{\Psi}_2$ – векторы потокосцеплений статора и ротора соответственно; R_1, R_2' – активное сопротивление фазы ста-

тора и приведенное активное сопротивление фазы ротора соответственно; L_1, L_2' – индуктивность фазы статора и приведенная индуктивность фазы ротора соответственно; L_m – взаимная индуктивность статора и ротора; J_Σ – суммарный момент инерции привода; M_ϑ, M_c – электромагнитный момент МДП и момент нагрузки; m – число фаз статора; p_n – число пар полюсов статора.

Проекции векторов напряжений, потокосцеплений и токов в системе координат x, y (4):

$$\begin{cases} \vec{u}_1 = u_{1x} + j u_{1y}; \quad \vec{i}_1 = i_{1x} + j i_{1y}; \\ \vec{u}_2 = u_{2x} + j u_{2y}; \quad \vec{i}_2 = i_{2x} + j i_{2y}; \\ \vec{\Psi}_1 = \Psi_{1x} + j \Psi_{1y}; \\ \vec{\Psi}_2 = \Psi_{2x} + j \Psi_{2y}; \\ \vec{\Psi}_1^* = \Psi_{1x} - j \Psi_{1y}. \end{cases} \quad (5)$$

Введем следующие обозначения переходных индуктивностей статора и ротора:

$$L_1' = \sigma L_1; \quad L_2'' = \sigma L_2', \quad (6)$$

где σ – коэффициент рассеяния.

Коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора, а также коэффициент рассеяния:

$$k_1 = \frac{L_m}{L_1}; \quad k_2 = \frac{L_m}{L_2'}; \quad (7)$$

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2'} \right) = (1 - k_1 k_2).$$

Подставляя выражения проекций (5) в систему (4) и выразив проекции потокосцеплений, токов, а также учитывая выражения (6) и (7), получим систему уравнений для построения динамической модели МДП (8).

$$\begin{cases} \Psi_{1x} = \frac{1}{p} (u_{1x} - R_1 i_{1x} + p_n \omega \Psi_{1y}); \\ \Psi_{1y} = \frac{1}{p} (u_{1y} - R_1 i_{1y} - p_n \omega \Psi_{1x}); \\ \Psi_{2x} = \frac{1}{p} (u_{2x} - R_2' i_{2x}); \\ \Psi_{2y} = \frac{1}{p} (u_{2y} - R_2' i_{2y}); \\ i_{1x} = \frac{1}{L_1'} \Psi_{1x} - \frac{k_2}{L_1'} \Psi_{2x}; \\ i_{2x} = -\frac{k_1}{L_2'} \Psi_{1x} + \frac{1}{L_2'} \Psi_{2x}; \\ i_{1y} = \frac{1}{L_1'} \Psi_{1y} - \frac{k_2}{L_1'} \Psi_{2y}; \\ i_{2y} = -\frac{k_1}{L_2''} \Psi_{1y} + \frac{1}{L_2''} \Psi_{2y}; \\ M_\vartheta = \frac{m p_n}{2} (\Psi_{1x} i_{1y} - \Psi_{1y} i_{1x}); \\ \omega = \frac{1}{J_\Sigma p} (M_\vartheta - M_c). \end{cases} \quad (8)$$

Данная форма системы уравнений (форма Коши) позволит построить структурную схему (рис. 2) на одних интеграторах и пропорциональных звеньях и избавит от реально-дифференцирующих звеньев.

Система уравнений математической модели МДП (8) отличается от системы уравнений асинхронной машины наличием напряжения u_2 в уравнении электрического баланса роторной цепи.

На основании структурной схемы разработана имитационная модель в среде Matlab. При её составлении, учитывается то, что все скорости и частоты измеряются в одних единицах.

Исследование динамических характеристик двигателя показало, что для обеспечения синхронного режима на валу двигателя, при изменении частоты питающего напряжения ротора должна изменяться амплитуда напряжения статора по закону $U_1 = k(f_1 - p_n \omega)$. Это связано с влиянием полного сопротивления статора, и для устранения этого явления необходимо использовать компенсирующие обратные связи.

При моделировании была получена зависимость амплитуды напряжения ротора от частоты напряжения ротора (рис. 3). Моделирование показало, что МДП в зависимости от соотношений амплитуд напряжения статора и ротора при изменении частоты напряжения ротора может работать в трех различных областях. В промежуточной области наблюдается устойчивый режим работы машины двойного питания, с выходом на требуемую скорость вращения, с учетом соотношения скорости и частот (1). В верхней и нижней области наблюдается неустойчивый режим работы МДП. Это обусловлено тем, что при амплитудах напряжения ротора, выходящих за диапазон ($U_2 > U_{1max}$ или $U_2 < U_{2min}$), напряжение ротора подавляет напряжение статора и наоборот, в результате чего двигатель выходит из синхронизма. Из полученной зависимости следует, что размах изменения амплитуды U_2 при сохранении синхронного режима работы при разных частотах неодинаков.

Точки зависимости были получены в результате моделирования имитационной модели МДП. Изменяя амплитуду напряжения ротора, при заданной амплитуде напряжения статора были определены критические значения амплитуд, при которых МДП входила в неустойчивый режим работы. Пунктирная линия соответствует точкам, значения которых рассчитаны как среднее арифметическое максимального и минимального значения амплитуд при заданной частоте.

При соблюдении необходимых соотношений амплитуд напряжений статора и ротора, наблюдается устойчивый синхронный режим работы МДП, что отражено на графиках переходных процессов при одновременной подаче напряжений в цепи статора и ротора (рис. 4).

Кроме того, моделирование режима одновременной подачи сигналов управления на статорную и роторную цепи (см. рис. 4) подтвердило соблюдение закономерности частоты вращения ротора согласно выражения (1).

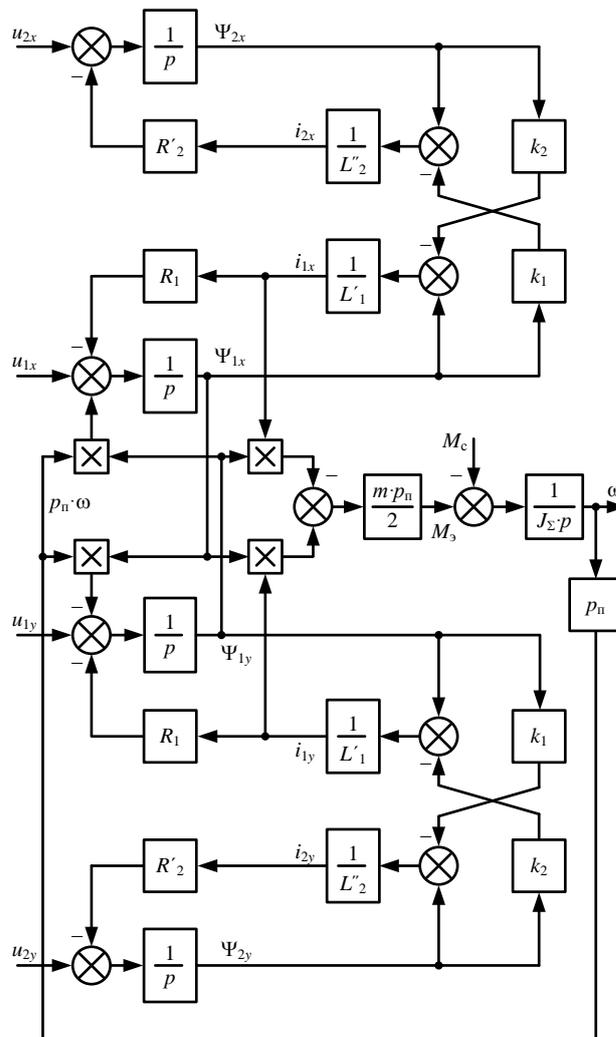


Рис. 2. Динамическая модель машины двойного питания

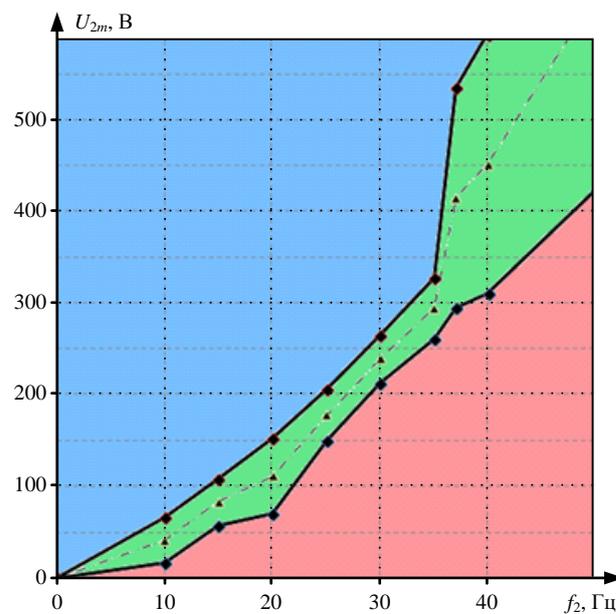


Рис. 3. Зависимость амплитуды напряжения ротора от его частоты

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

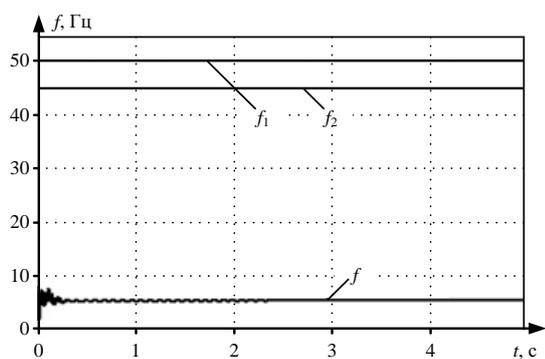


Рис. 4. Графики скоростей и частот машины двойного питания при прямом пуске: f_1 – частота напряжения статора; f_2 – частота напряжения ротора; f – частота вращения ротора (сноска на f)

При ударном приложении нагрузки к валу двигателя МДП ведет себя по-разному во всем диапазоне изменения частоты. Практически во всем диапазоне частот при незначительной величине (10–15)% M_n возмущающего момента (рис. 5) выпадение МДП из синхронизма не происходит. Увеличение величины момента нагрузки может привести к выпадению из синхронизма, причем согласно результатам моделирования (рис. 6) величина возмущающего момента, при которой происходит выпадение МДП из синхронизма, растет при возрастании частоты напряжения на роторе.

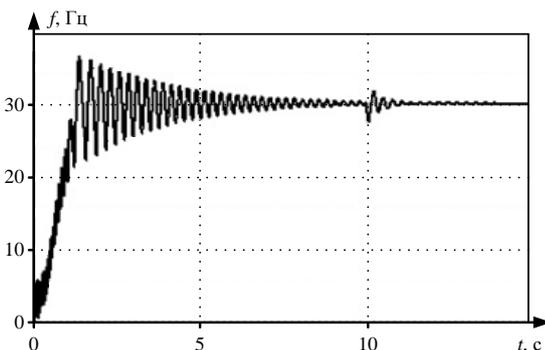


Рис. 5. Переходный процесс частоты вращения ротора МДП при подаче статического момента $M_c = 800$ Н·м в момент времени $t = 10$ с

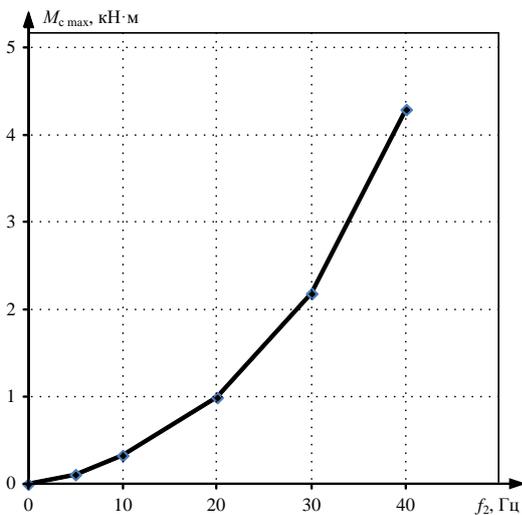


Рис. 6. Зависимость максимального момента $M_{c\max}$ нагрузки от частоты напряжения ротора f_2

Таким образом, результаты моделирования указывают на то, что необходимо более подробно рассмотреть связь между амплитудой задающего напряжения и его частотой при регулировании скорости. При этом важно отметить, что данный вопрос касается обоих каналов регулирования (по статору и по ротору). Эмпирические зависимости, полученные методом выбора средних значений, указывают на квадратичную зависимость, однако данная зависимость может носить гораздо более сложный характер.

Выпадение из синхронизма машины двойного питания указывает на то, что при разработке системы управления необходимо вводить компенсирующие обратные связи по управляющему сигналу как со стороны статора, так и со стороны ротора. Возможно построение с обратной связью только по одному каналу.

Исходя из вышесказанного, явления, протекаемые в МДП, математически описываются более сложными зависимостями, чем в асинхронных машинах. Однако применение МДП раскрывает больший спектр регулировочных свойств, что может привести к улучшению таких показателей, как универсальность, стоимость и энергоэффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тутаев Г.М. Широкорегулируемый энергоэффективный электропривод переменного тока на базе асинхронизированного вентильного двигателя: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Тутаев Геннадий Михайлович. Нижний Новгород, 2017. 44 с.
2. Ляпин А.С. Модельное исследование машины двойного питания с токовым управлением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. № 4. С. 731-737.
3. Ляпин А.С. Получение и анализ статических характеристик машины двойного питания при питании роторных обмоток от источника напряжения // Известия вузов. Электромеханика. 2014. №1. С. 30-34.
4. Пересада С.М., Благодир В.О. Векторное управление машиной двойного питания со свойствами робастности к параметрическим и координатным возмущениям // Электромеханические энергосберегающие системы. 2016. №1. С. 10-17.
5. Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г. Использование регулируемой асинхронной машины двойного питания в синхронном режиме // Электричество. 2017. №10. С. 60-68.
6. Ганджа С.А. Применение асинхронизированных синхронных генераторов для автономных и сетевых ветроэнергетических установок // Международный научный журнал Альтернативная электроэнергетика и экология. 2010. № 1. С. 25-28.
7. Glaoui H., Harrouz A. Sliding mode control of the dfig used in wind energy system // Електротехніка і електромеханіка. 2018. №3. С. 61-67.
8. Дорошенко, А.Л. Режимы работы и алгоритмы управления электромеханическими системами с машиной двойного питания и разными типами преобразователей частоты / А.Л. Дорошенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2014. №2. С. 57-59.
9. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: Энергоатомиздат, 1984. 192 с. : ил.
10. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемая машина переменного тока. М.: Наука, 1969. 140 с.

Поступила в редакцию 13 марта 2019 г.

DYNAMIC MODEL OF A DUAL POWER MACHINE CONTROLLED FROM THE ROTOR SIDE

Mikhail E. Dubovik

Post-graduate student, the department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: mihail.dubovik@bk.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7092-1409>.

Vyacheslav A. Solovyev

D.Sc. (Engineering), Professor, the department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: epapu@knastu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7930-0601>

In the high power mode, the power of which exceeds 100 kW, as a rule, when energy is used in asynchronous motors it requires voltage up to 1000 V. This is due to a decrease in the weight and dimensions of the motor. But when developing a frequency-controlled electric drive, it is necessary to use a high-voltage frequency converter (FC), which leads to a significant increase in the cost of electrical wiring. A compromise solution can be found by using a dual power supply machine (MIS), a frequency control channel that needs to be transferred to the rotor circuit [1]. The use of TIR will significantly reduce capital costs and expand control functions over the drive.

The article presents a mathematical description of a dual power machine. The main feature of this description is the choice of coordinate system. On the basis of it and taking into account its characteristics, a dynamic model of the machine has been built. The research group investigated the dynamic characteristics of the machine when applying a control signal from the rotor with a variable frequency. Control signals are presented in the form of ideal harmonic functions. In the further study, the constructed model will make it possible to investigate the launch of the machine in various modes. The dependence of the amplitude of the rotor voltage on its frequency is obtained. This dependence shows the possible range of variation of the voltage amplitude on the rotor while maintaining the synchronous MOS mode at a given speed. Simulation is made in electrical degrees. All angular velocities (rad / s) are expressed in frequencies (Hz). The behavior of the machine in a static mode was investigated when the load torque changes. A simulation model built in the Matlab environment is given.

Keywords: dual power machine, amplitude of the rotor voltage vector, dynamic mode, dual power machine stability.

REFERENCES

1. Tutaev G.M. *Shiroko-reguliruemiy energoeffektivnyy elektroprivod peremennogo toka na baze asinkhronizirovannogo ventilnogo dvigatelya* [Widely-regulated energy-efficient AC electric drive based on an asynchronized ac converter-fed engine]: abstract of a Ph.D. thesis. Sciences: 05.09.03 / Tutaev Gennadiy Mihaylovich.
2. Nizhny Novgorod, 2017, 44 p. (In Russian)
2. Lyapin A.S. A Model Study of a Dual-Power Machine with Current Control. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mehaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2016, no. 4, pp. 731-737. (In Russian)
3. Lyapin A.S. Obtaining and analysis of static characteristic double power machines when powered by a voltage source. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. [News of universities. Electromechanics]. 2014. no. 1. pp. 30-34. (In Russian)
4. Peresada S.M., Blagodir V.O. Vector control of a dual power machine with robustness properties for parametric and coordinate perturbations. *Elektromekhanicheskie energosberegayushchie sistemy* [Electromechanical energy-saving systems]. 2016, no. 1, pp. 10-17. (In Russian)
5. Mustafaev R.I., Hasanova L.G. Use of an adjustable asynchronous dual-power machine in synchronous mode. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2017, no. 10, pp. 60-68. (In Russian)
6. Gandzha S.A. Application of asynchronized synchronous generators for autonomous and network wind power plants. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal alternativnaya elektroenergetika i ekologiya* [International Scientific Journal of Alternative Electricity and Ecology]. 2010, no. 1, pp. 25-28. (In Russian)
7. Glaoui H., Harrouz A. Used in wind energy systems. *Electrical engineering and electromechanics*. 2018, no. 3, pp. 61-67.
8. Doroshenko A.L. Modes of operation and control algorithms for electromechanical systems with a dual-power machine and various types of frequency converters. *Vicinnik Vinnytsia Polytechnic Institute*. 2014, no. 2, pp. 57-59.
9. Shakaryan Yu.G. *Asinkhronizirovannyye sinhronnyye mashiny* [Asynchronized synchronous machines]. M.: Energoatomizdat, 1984. 192 p. (In Russian)
10. Botvinnik M.M., Shakaryan Yu.G. *Upravlyayemaya mashina peremennogo toka* [Controlled AC machine]. M.: Science, 1969. 140 p. (In Russian)

Дубовик М.Е., Соловьев В.А. Динамическая модель машины двойного питания при управлении со стороны ротора // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2(43). С. 60-64. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-60-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-60-64)

Dubovik M.E., Solovyev V.A. Dynamic Model of a Dual Power Machine Controlled from the Rotor Side. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekxy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 60-64. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-60-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-60-64)

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 620.179

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-65-69](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-65-69)

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

Уфимский государственный авиационный технический университет

ДИАГНОСТИКА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Изделия из композиционных материалов нашли широкое применение благодаря своим прочностным и жесткостным характеристикам, а также коррозионной стойкости. Однако в процессе эксплуатации в композиционных материалах накапливаются микроповреждения, которые со временем могут привести к потере работоспособности конструкции. Различные дефекты появляются и при изготовлении композиционных материалов. Поскольку разрушение композиционных материалов изучено менее подробно, чем металлов, их использование в изделиях с повышенными требованиями к надежности сопряжено с некоторой долей риска. Для удовлетворения высоких требований по надежности необходимо применять современные методы неразрушающего контроля, позволяющие выявить имеющиеся внутренние дефекты, локализовать их положение и определить линейные геометрические размеры. Большинству традиционно применяющихся методов неразрушающего контроля присущи определенные недостатки, не позволяющие зачастую получить качественную и наиболее полную информацию об имеющихся дефектах. Композиционные материалы также находят все более широкое применение в электрических машинах, что позволяет повысить их удельные характеристики. В электрических машинах наиболее нагруженными узлами являются вал, бандажная оболочка ротора, зубцы статора, а также подшипниковые узлы. Поэтому использование композиционных материалов в данных узлах требует создания диагностических комплексов для определения остаточного ресурса и предотвращения аварийных ситуаций. В данной работе представлены методы неразрушающего контроля изделий из композитных материалов. Описаны известные методы контроля технического состояния узлов электрических машин, состоящих из композитных материалов. В статье также представлен разработанный метод вихретокового контроля для бандажных оболочек роторов из углеродного волокна.

Ключевые слова: диагностика, композитные материалы, неразрушающий контроль, вихретоковый метод, электрические машины.

ВВЕДЕНИЕ

Изделия из композиционных материалов (КМ) нашли широкое применение благодаря своим прочностным и жесткостным характеристикам, а также коррозионной стойкости. Однако в процессе эксплуатации в КМ накапливаются микроповреждения, которые со временем могут привести к потере работоспособности конструкции. Различные дефекты появляются и при изготовлении КМ. Поскольку разрушение КМ изучено менее подробно, чем металлов, их использование в изделиях с повышенными требованиями к надежности сопряжено с некоторой долей риска [1].

Для решения данных проблем необходимо проводить диагностику дефектов как отдельных изделий, так и сборных конструкций. При этом проводится диагностика внутренних дефектов (расслоение, пустоты, посторонние включения, трещины), контроль сборочных конструкций (клеевых и формовых соединений), а также определение остаточного ресурса теплофизическими, эндоскопическими, вибрационными и другими методами контроля.

Кроме того, целесообразным является создание общей базы данных, в которой будет содержаться информация об известных дефектах, причинах и особенностях аварий, условиях эксплуатации и материалах. Это позволит сформировать статистический фонд, который в перспективе поможет предотвращать наиболее распространенные проблемы.

При этом широкое распространение получила программа FARGR [2], используемая для получения кривых деформирования КМ вплоть до разрушения. Данный подход является привлекательной альтернативой трудоемким исследованиям нелинейных задач методами конечных элементов.

Структура КМ следующая: неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов, включая армирующие элементы (волокна), определяющие необходимые механические характеристики материала, и матрицу (связующее), обеспечивающую совместную работу армирующих элементов.

КМ находят широкое применение в электрических машинах, что позволяет повысить их удельные характеристики. В работе [3] представлен обзор применения КМ в узлах ЭМ где определены области применения КМ в ЭМ, приведены их достоинства и недостатки и показаны конкретные примеры реализации. Исходя из перспективности применения КМ в ЭМ, в работе [4] приведена оценка ЭМ методами конечных элементов, узлы которой полностью состоят из КМ.

В ЭМ наиболее нагруженными узлами являются вал, бандажная оболочка ротора, зубцы статора, а также подшипниковые узлы. Поэтому использование КМ в данных узлах требует создания диагностических комплексов для определения остаточного ресурса и предотвращения аварийных ситуаций. Диагностика статоров из магнитомягких композитных материалов и валов из углеродного волокна описывается в работах [5-7].

Для удовлетворения высоких требований по надежности необходимо применять современные методы неразрушающего контроля (НК), позволяющие выявить имеющиеся внутренние дефекты, локализовать их положение и определить линейные геометрические размеры. В настоящее время для контроля КМ применяют следующие методы: оптический, акустический (импедансный и велосиметрический), тепловой, радиоволновой и радиационный [8-11].

Большинству традиционно применяющихся методов НК присущи определенные недостатки, не позволяющие зачастую получить качественную и наиболее полную информацию об имеющихся дефектах. Цель данной статьи – представить способ неразрушающего контроля КМ в ЭМ.

ВИХРЕТОКОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ БАНДАЖНОЙ
ОБОЛОЧКИ РОТОРА ЭМ

Объектом исследования в данной работе является высокооборотная ЭМ для микротурбинных установок, основные параметры для построения компьютерной модели представлены в табл. 1.

Объектом исследования в данной работе является высокооборотная ЭМ для микротурбинных установок, основные параметры для построения компьютерной модели представлены в табл. 1.

Бандажные оболочки роторов, применяемые в высокоскоростных ЭМ с постоянными магнитами, являются наиболее ответственными узлами, так как повреждение бандажной оболочки ротора может привести к разрушению электрической машины, без возможности восстановления. В то же время толщина бандажной оболочки должна быть как можно меньше для обеспечения высоких энергетических характеристик ЭМ. С появлением бандажных оболочек из углеродного волокна стало возможным снижение их толщины за счет более высокой прочности по сравнению с металлами. В связи с вышеперечисленным контроль технического состояния бандажной оболочки ротора из КМ является важной задачей при эксплуатации ЭМ. Наиболее перспективным методом для этого является вихретоковый метод контроля, основанный на установлении корреляционных связей между параметрами диагностики (электрическими характеристиками материала) и свойствами КМ [13, 14].

Основной инструмент исследований – вихревые токи. На рис. 1 представлена схема вихретокового контроля бандажной оболочки ротора из углеродного волокна.

Таблица 1

Основные параметры высокооборотной ЭМ

Параметр	Значение
Выходная мощность, кВт	100
Выходное линейное напряжение, В	400
Частота вращения, об/мин	60000
Внешний диаметр корпуса, мм	177
Материал корпуса	Алюминий
Внешний диаметр статора, мм	137
Внутренний диаметр статора, мм	70
Число пазов статора	24
Активная длина статора, мм	165
Материал магнитопровода статора	Сталь 2411
Число витков в фазе	8
Число слоев обмотки статора	1
Число жил в проводнике	20
Диаметр жилы, мм	0,8
Материал проводников	медь
Внешний диаметр ротора, мм	60
Активная длина ротора, мм	180
Материал магнитопровода ротора	30ХГСА
Число полюсов ротора	4
Высота постоянных магнитов, мм	9
Материал постоянных магнитов	SmCo
Толщина бандажной оболочки ротора, мм	4
Материал бандажной оболочки ротора	Углеродное волокно CFRP 231 [12]

На рис. 1: постоянные магниты 1, ротор 2, бандаж из углеродного волокна 3, магнитопровод статора 4, обмотка статора 5, вихретоковые преобразователи 6, источник переменного напряжения 7, блок фильтрации и усиления 8, аналого-цифровой преобразователь 9, компьютер 10.

При определенном угловом положении ротора в бандажной оболочке ротора из углеродного волокна от источника питания переменного напряжения высокой частоты посредством вихретокового преобразователя возбуждают вихревой ток. При этом вихретоковые преобразователи при различных режимах совмещают работу источника переменного поля и датчика изменения магнитного поля, и выполняют в виде дополнительных катушек, расположенных на кромках зубцов статора ЭМ. За счет этого в бандажной оболочке ротора из углеродного волокна под действием «скин-эффекта» на поверхностном и подповерхностном слое на глубине в несколько миллиметров наводятся вихревые токи. Вихревые токи в бандажной оболочке ротора из углеродного волокна создают переменное магнитное поле. Далее снимают переменное напряжение высокой частоты, и вихретоковые преобразователи работают в качестве датчиков изменения магнитного поля. В бандажной оболочке ротора из углеродного волокна, не содержащем дефектов в виде обрыва углеродных волокон, вихревые токи генерируют противодействующее переменное магнитное поле, которое наводит в вихретоковом преобразователе, работающем в качестве датчика изменения магнитного поля, высокочастотную электродвижущую силу, которую фильтруют и усиливают по одной частоте в блоке фильтрации и усиления, далее оцифровывают в блоке аналого-цифрового преобразователя и передают в статистическую базу данных на компьютере. При возникновении дефекта, наведенные в бандаже вихревые токи меняют свои величины, значит, и наведенная данным полем амплитуда высокочастотной электродвижущей силы также изменится. Далее сравнивают амплитуды сигналов высокочастотной электродвижущей силы исправного и дефектного бандажа и определяют величину дефекта. Своевременное обнаружение дефекта на его ранних стадиях позволяет повысить надежность при эксплуатации электрической машины.

Для определения работоспособности описанного метода вихретокового контроля было проведено исследование методами конечных элементов. На рис. 2 представлен вид компьютерной модели ЭМ с вихретоковыми преобразователями.

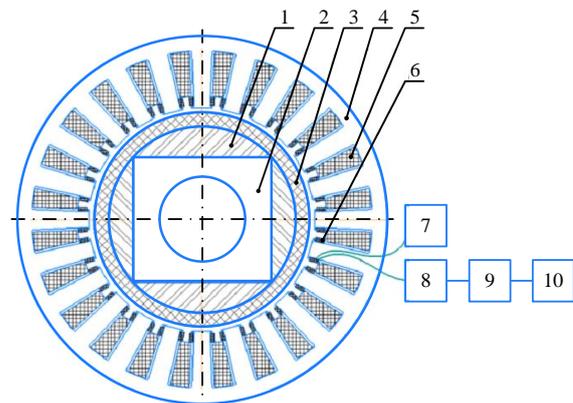


Рис. 1. Схема вихретокового контроля

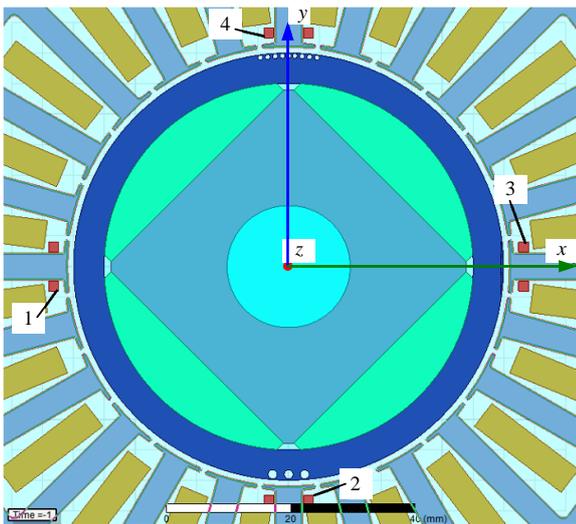


Рис. 2. Вид компьютерной модели ЭМ с вихретоковыми преобразователями

В табл. 2 представлены результаты расчета для конструкции ЭМ без вихретоковых датчиков и конструкции с вихретоковыми датчиками.

Как видно из табл. 2, установка дополнительных датчиков в пазы статора ведет к повышению массы ЭМ на 3,6% и снижению КПД на 0,12% ввиду увеличения высоты зубцов статора.

На рис. 2 номерами 1-4 обозначены вихретоковые преобразователи, при этом под вихретоковым преобразователем 1 бандажная оболочка была без дефектов, а под преобразователями 2-4 были помещены дефекты в виде пустот различной величины, имитирующих обрывы углеродных волокон. Частота напряжения в вихретоковых преобразователях составляла 4000 Гц.

На рис. 3 представлены кривые напряжений, наведенные под действием вихревых токов в вихретоковых преобразователях.

На рис. 3 кривые под номерами 1-4 соответствуют номерам вихретоковых преобразователей представленных на рис. 2.

Из рис. 3 видно, что дефекты в бандажной оболочке под вихретоковыми преобразователями 2-4 наводят напряжение на 0,2...0,4% выше чем под исправным участком 1.

На рис. 4 представлено распределение плотности вихревых токов в бандажной оболочке ротора ЭМ.

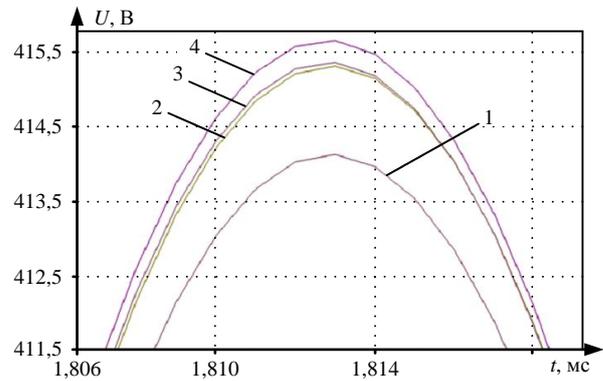


Рис. 3. Кривые напряжений, наведенные под действием вихревых токов

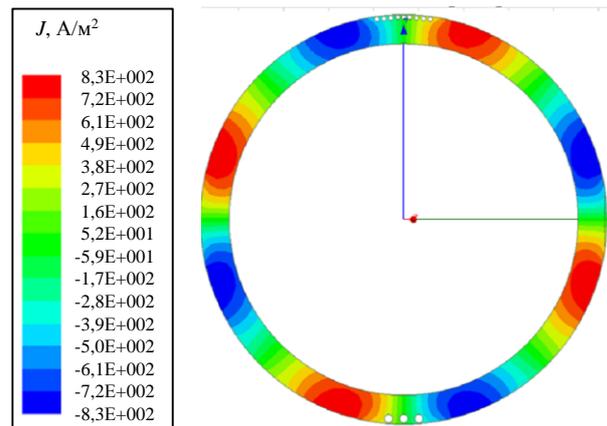


Рис. 4. Распределение вихревых токов в бандажной оболочке ротора ЭМ

Как видно из рис. 4, ввиду низких значений плотностей вихревых токов, влиянием температуры углеволоконного бандажа на результаты измерения вихретоковых датчиков можно пренебречь.

Данный метод может найти применение в контроле технического состояния углеродных бандажных оболочек роторов ЭМ без необходимости полной разборки самой ЭМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, расширение области применения КМ требует создания диагностической базы для своевременного определения дефектов. Представленный метод вихретокового контроля бандажной оболочки из углеродного волокна обеспечивает диагностирование величины дефектов бандажных оболочек из углеродного волокна, а также повышение надежности при эксплуатации электрических машин.

Работа выполнена при поддержке гранта МК-508.2019.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басов Ф.А. Контроль деформированного состояния и диагностика поврежденных композиционных материалов с помощью чувствительных элементов на базе углеродных нитей: дис. ... канд. тех. наук. 05.11.13 / Басов Федор Александрович. Москва, 2006.
2. S. Sapozhnikov, A. Shabley. Numerical evaluation of the microdamage kinetics of cross-ply GFRPS based on stochastic micro-meso modeling ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials, Athens, Greece, 24-28th June 2018, pp. 24-28.

Таблица 2
Основные параметры высокооборотной ЭМ

Параметр	ЭМ без датчиков	ЭМ с датчиками
Коэффициент заполнения паза, %	55	63
Полные потери, Вт	3780,7	3823,7
КПД, %	96,22	96,1
Масса магнитопровода статора, кг	7,05	7,1
Масса обмотки статора, кг	5,3	6,1
Масса ротора (вал, подшипники, спинка ротора, постоянные магниты, бандаж ротора), кг	5,68	5,68
Масса корпуса, кг	5,3	5,3
Полная масса, кг	23,33	24,18
Удельная масса, кг/кВт	0,23	0,24

3. К вопросу применения композитных материалов в электрических машинах (обзор) / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, И.Ф. Саяхов // Новое в российской электроэнергетике. 2018. № 9. С. 17-32.
4. Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф., Нургалиева Р.А. Оценка эффективности полностью композитных электрических машин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 4. С. 32-39.
5. T.P. Hong, P. Gonon and O. Lesaint. Water absorption in a glass-mica-epoxy composite, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, no. 1, pp. 11-16, February 2009.
6. L. Ferraris, E. Poskovic and F. Franchini Defects detection in laminated and soft magnetic composites devices with a novel thermographic method, 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Tinos, 2017, pp. 585-590.
7. Ломазов В. А. Математическая модель тепловой диагностики композитного материала, армированного однонаправленным семейством волокон // Математическое моделирование. 1990. Т. 2. № 7. С. 110–115.
8. Современные методы диагностики объектов из композиционных материалов / А.А. Белов, Ю.Д. Иванов, А.А. Шестаков, С.Г. Царева, Н.С. Черницов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. №1. С. 56-59.
9. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
10. Воробьев В.В., Маркин В.Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композиционных конструкций. – Новосибирск: Наука, 2006. 190 с.
11. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из ПМК / Б.В. Бойцов, С.Л. Васильев, А.Г. Громашев, С.А. Юргенсон // Труды МАИ. 2011. Вып. №49. С. 1-11.
12. Funck R., (2015). Composite materials in high efficient sleeve applications of electric machines. Circomp GmbH. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.circomp.de/downloads/circomp-paper-sleeve-applications.pdf>, дата обращения 04.12.18.
13. Саввинова М.Е. Электропроводящие полимерные композиционные материалы электротехнического назначения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. №4. С. 44-49.
14. Голев И. М., Иванова О. М., Бакин К. И. Исследование электрических свойств композитного углеродного материала // Молодой ученый. 2015. №2. С. 5-10.

Поступила в редакцию 28 марта 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DIAGNOSTICS OF COMPOSITE MATERIALS IN ELECTRICAL MACHINES

Flur R. Ismagilov

D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-9815>.

Viacheslav E. Vavilov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-6974>.

Ildus F. Sayakhov

Engineer, a post-graduate student, the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: isayakhov92@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8545-9862>

Products made of composite materials are widely used due to their strength and stiffness characteristics as well as corrosion resistance. However, in the course of operation, microdamages accumulate in composite materials, which, over time can lead to a loss of design performance. Various defects appear in the manufacture of composite materials. Since the destruction of composite materials is studied in less detail than metals, their use in products with increased requirements for reliability is associated with some degree of risk. To meet the high demands on reliability, it is necessary to apply modern methods of non-destructive testing, which allow identifying existing internal defects, localizing their position and determining linear geometric dimensions. Most of the traditionally used methods of non-destructive testing have certain disadvantages, which often make it impossible to obtain high-quality and most complete information about the defects. Composite materials are also becoming more widely used in electrical machines, which allows them to increase their specific characteristics. In electrical machines, the most loaded units are the shaft, the rotor banding, the stator teeth and bearing units. Therefore, the use of composite materials in these sites requires the creation of diagnostic systems to determine the residual resource and prevent accidents. This paper presents methods for non-destructive testing of products made of composite materials. The main advantages and disadvantages of each method are given. The article also presents the developed method of eddy current testing for the carbon fiber rotor banding.

Keywords: diagnostics, composite materials, non-destructive testing, eddy current method, electrical machines.

REFERENCES

1. Basov F.A. *Kontrol deformirovannogo sostoyaniya i diagnostika povrezhdeniy kompozitsionnykh materialov s pomoshchyu chuvstvitelnykh elementov na baze uglerodnykh nitay*. Kand. Diss. [Control of the deformed state and diagnosis of damage to composite materials with the help of sensitive elements based on carbon filaments. Ph.D. Diss.], Moscow, 2006.
2. Sapozhnikov S., Shabley A. Numerical evaluation of the microdamage kinetics of cross-ply GFRPS based on stochastic micro-meso modeling ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials, Athens, Greece, 24-28th June 2018. pp. 24-28.
3. Ismagilov F.R., Vavilov V.Ye., Sayakhov I.F. The use of composite materials in electric machines (review). *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike* [New in the Russian electric power industry], 2018, no. 9, pp. 17-32. (In Russian).
4. Ismagilov F.R., Vavilov V.Ye., Sayakhov I.F., Nurgaliyeva R.A. Evaluation of the effectiveness of fully composite electrical machines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2018, vol. 61. no. 4, pp. 32-39. (In Russian).
5. Hong T.P., Gonon P. and Lesaint O. Water absorption in a glass-mica-epoxy composite [II: field distribution and diag-

- nostic in a stator bar geometry], IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, no. 1, pp. 11-16, February 2009.
6. Ferraris L., Poskovic E. and Franchini F. Defects detection in laminated and soft magnetic composites devices with a novel thermographic method, 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Tinos, 2017, pp. 585-590.
 7. Lomazov V. A. Mathematical model of heat diagnostics of a composite material reinforced by one-directed fibre family. *Matematicheskoe modelirovaniye* [Mathematical modeling], 1990, vol. 2, no. 7, pp. 110–115. (In Russian).
 8. Belov A.A., Ivanov YU.D., Shestakov A.A., Tsareva S.G., Chernitsov N.S. Modern methods of diagnosing objects made of composite materials. *Aktualnyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk* [Actual problems of the humanities and natural sciences], 2015, no. 1, pp. 56-59. (In Russian).
 9. Klyuyev V.V. *Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika. Spravochnik* [Nondestructive testing and diagnostics. Reference book]. Moscow: Mashinostroenie, 2003. 656 p. (In Russian).
 10. Vorobyev V.V., Markin V.B. *Kontrol kachestva izgotovleniya i tekhnologiya remonta kompozitsionnykh konstruksiy* [Quality control of manufacturing and repair technology of composite structures]. Novosibirsk: Nauka, 2006. 190 p. (In Russian).
 11. Boytsov B.V., Vasilyev S.L., Gromashev A.G., Yurgenson S.A. Nondestructive testing methods used for structures made of PMK. *Trudy MAI* [Proceedings of the MAI], 2011, no. 49. pp. 1-11. (In Russian).
 12. Funck R., (2015). Composite materials in high efficient sleeve applications of electric machines. Circomp GmbH. Access mode: <http://www.circomp.de/downloads/circomp-paper-sleeve-applications.pdf>, date of application 04.12.18.
 13. Savvinova M.E. Electrically conductive polymer composite materials for electrical use, *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of universities. North Caucasus region. Technical Sciences], 2015, no. 4. pp. 44-49. (In Russian).
 14. Golev I.M., Ivanova O.M., Bakin K.I. Study of the electrical properties of composite carbon material. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2015, no. 2, pp. 5-10. (In Russian).

Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф. Диагностика композитных материалов в электрических машинах // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 2(43). С. 65-69. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-65-69](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-65-69)

Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Sayakhov I.F. Diagnostics of Composite Materials in Electrical Machines. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 65-69. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-65-69](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-65-69)

Брякин И.В.¹, Бочкарев И.В.²

¹ Институт автоматики и информационных технологий Национальной Академии Наук Кыргызской Республики

² Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ИНДУКЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ И ТРУБОПРОВОДОВ

Проведен анализ принципов построения трассоискателей. Получено, что наибольшее применение получили индукционные трассовые методы, основанные на измерениях вторичных электромагнитных полей, которые создаются токами, наведенными в кабеле независимыми излучающими системами с помощью сторонних источников питания. Для реализации этих методов используются излучающие системы различных типов – рамочные или вибраторные антенны. При построении трассоискателей особое значение имеет взаимное расположение приемной и передающей катушек. Рассмотрены варианты взаимного расположения катушек. Получено, что при построении трассопоискового оборудования широкое применение имеют два базовых метода контроля: метод реакции параметров электромагнитного поля на внутренний или поверхностный импеданс среды при распространении электромагнитного поля соответственно в земле или над ее поверхностью, а также метод реакции входного импеданса приемной рамки на электромагнитные свойства зондируемой среды. Исходя из особенностей этих двух методов, предложен новый гибридный метод индукционного зондирования, который фактически объединяет эти два метода. При реализации этого гибридного метода индукционный зонд (ИЗ), который является индукционным преобразователем магнитного поля в электрический сигнал, содержит приемную ферритовую антенну (ФА) и рамочную антенну (РА), причем РА совмещает функции передающей и приемной антенн. Предложен вариант конструктивного исполнения ИЗ с компланарным размещением ФА относительно РА, который обеспечивает полную геометрическую компенсацию первичного поля.

При работе ИЗ информация регистрируется по одному информационному каналу от РА (текущее значение амплитуды возбуждающего тока) и по двум информационным каналам от ФА (текущие значения амплитуд напряжений соответственно активной и реактивной составляющих выходного сигнала ФА). Реализация такой информационной избыточности существенно повышает информативность, эффективность и достоверность предложенного гибридного метода

Ключевые слова: трассоискатель, индукционные трассовые методы зондирования, индукционный зонд, рамочные и ферромагнитные антенны, ферромагнитный сердечник, переизлученное поле, удельная электрическая проводимость и магнитная проницаемость объекта поиска, глубина залегания.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для поиска и определения местоположения и глубины залегания подземных кабельных линий, трубопроводов и других скрытых коммуникаций и металлосодержащих объектов, а также для обработки полученной измерительной информации широко применяют различные методы и устройства [1-6]. Их использование помогает избежать повреждений коммуникаций, повышает эффективность и безопасность работы на объектах, позволяет оценить их состояние, составить схему расположения и т.п. Поэтому работы, направленные на улучшение качества трассоискателей, являются весьма актуальными и имеют высокую практическую значимость.

АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ТРАССОИСКАТЕЛЕЙ

Работа трассоискателя основана на явлении электромагнитной индукции. Электрический сигнал, проходящий по металлическому объекту (кабелю или трубопроводу), создает электромагнитное поле, которое регистрирует трассоискатель. При этом посредством обнаружения магнитного поля констатируют наличие кабельной линии, а посредством измерения параметров этого поля определяют местоположение кабельной линии, глубину ее залегания и место повреждения.

Трассопоисковый комплект в общем случае состо-

ит из двух блоков – передающего и приемного. Передающий блок содержит генератор, являющийся передатчиком сигналов, а приемный блок содержит индукционный приемник в виде специальной катушки (гетеродинного локатора-приемника) и блока обработки сигнала приемника. Катушка улавливает электромагнитные волны в заданных диапазонах частот, а полученные сигналы обрабатываются микропроцессором. Для приема сигналов служат антенны, одна или несколько, различной конструкции и пространственной ориентации, которые могут иметь возможность поворачиваться.

Все искомые подземные коммуникации перед началом работ можно разделить на два вида – обесточенные и находящиеся под напряжением. В зависимости от этого различают два способа поиска кабеля – пассивный и активный (**рис. 1**).

Если кабель находится под напряжением, то можно контролировать электромагнитное поле, создаваемое током, проходящим через кабель. Такой поиск называется **пассивным**. Основным недостатком пассивного метода поиска является его невысокая точность, поскольку при высокой плотности кабельных коммуникаций посторонние магнитные поля создадут помехи и сделают поиск нужной кабельной трассы невозможным.

Для поиска обесточенных коммуникаций в комплект входит специальный генератор, который подает на кабель переменный ток определенной частоты.

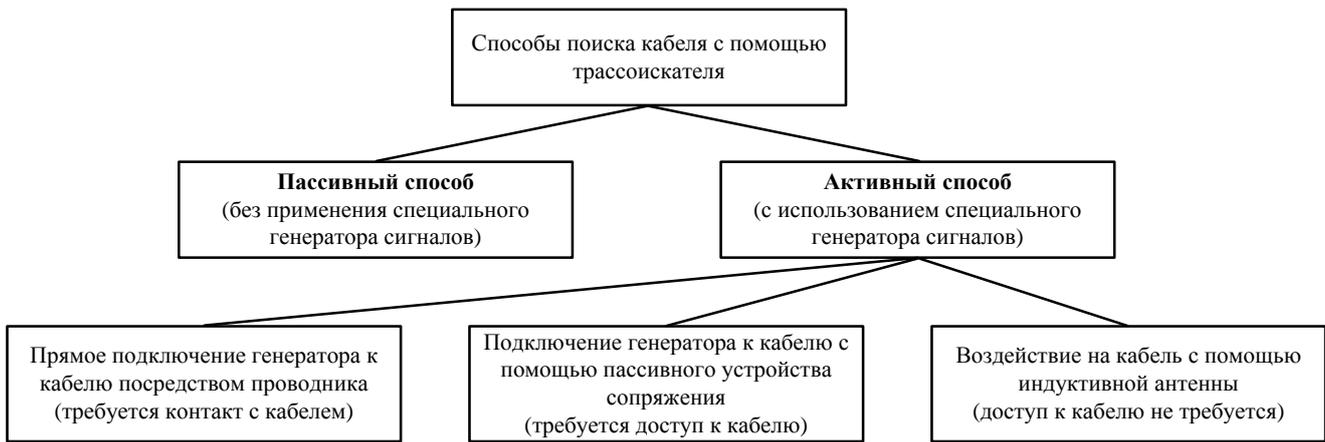


Рис. 1. Способы поиска кабеля с помощью трассоискателя

В этом случае целесообразно использовать более высокую частоту, не кратную 50 Гц, или изменять ее с заданной периодичностью для облегчения идентификации сигналов. Это упрощает и повышает достоверность поиска нужного кабеля. Поиск с использованием генератора называется **активным**. При таком поиске генератор или подключается напрямую к кабелю через проводник, или используют беспроводные методы создания наводки в кабеле с помощью индуктивной антенны, представляющей собой катушку, к которой непосредственно подключен генератор. В этом случае антенна располагается на поверхности непосредственно над кабелем и прямой электрический контакт кабеля и антенны не требуется.

Проведенный анализ показал, что среди всех известных трассовых методов поиска наибольшее применение получили индукционные методы, основанные на измерениях вторичных электромагнитных полей, которые создаются токами, наведенными в кабеле независимыми излучающими системами с помощью сторонних источников питания. Для реализации этих методов используются излучающие системы или магнитного типа (рамочные антенны), или электрического типа (вибраторные антенны). Излучающая система магнитного типа представляет собой катушку с ферромагнитным сердечником или без него, а излучающая система электрического типа выполняется в виде электрического диполя и конструктивно состоит из двух разнесенных электродов и соединительного кабеля. Обе эти излучающие системы создают в окружающей среде первичное переменное электромагнитное поле, которое наводит в электропроводящих элементах кабеля ЭДС, которая, в свою очередь, является источником тока в этих элементах. Приемная система может содержать измерительные преобразователи для регистрации параметров индукции магнитного поля или параметров напряженности электрического поля.

Выбор того или иного вида излучающей системы, а также типа и ориентации измерительных осей преобразователей обуславливается той задачей, которая ставится при обнаружении и обследовании кабеля.

Эффективность применения аппаратуры для обнаружения и регистрации подземных кабельных линий в значительной мере зависит от конструкции и параметров используемого зонда, который является индукционным преобразователем магнитного поля в элек-

трический сигнал. Общие требования к индукционным зондам (ИЗ) установлены в [7]. Основными из них являются: селективность, т.е. избирательность обнаружения подповерхностных объектов поиска на фоне посторонних металлических предметов; помехоустойчивость, т.е. способность сохранять свои характеристики в условиях воздействия различных внешних факторов; высокая чувствительность, разрешающая способность и надежность работы; безопасность эксплуатации по отношению к человеку; технологичность изготовления и невысокая потребляемая мощность.

При построении трассоискателей особое внимание уделяется взаимному расположению приемной и передающей рамок ИЗ. В зависимости от разнеса и взаимного расположения этих рамок различают совмещенные и разделенные системы. Совмещенные системы отличаются малым разнесом ($L \approx a$) и фиксированным расположением рамок при их ориентации по минимуму первичного поля (рис. 2). Для разделенных систем ($L \gg a$) характерен большой разнос и переменное расположение возбуждающей и приемной рамок. В этом случае приемная рамка ориентируется в различных направлениях.

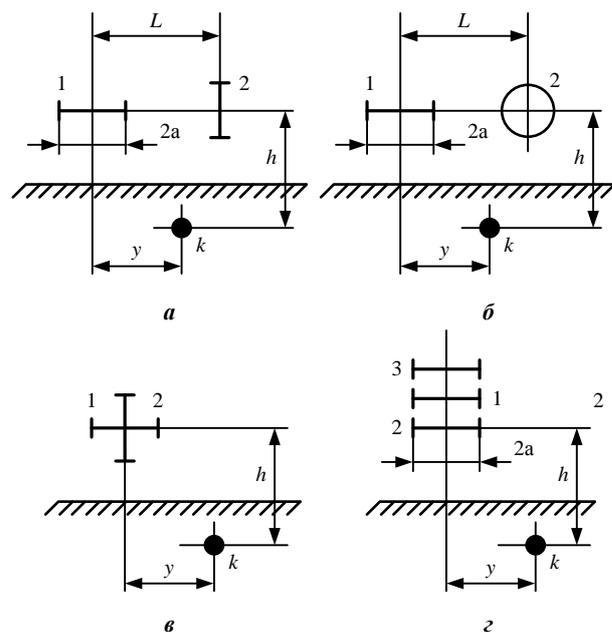


Рис. 2. Варианты взаимного расположения рамок ИЗ

Следует отметить, что к совмещенным системам предъявляются особо жесткие требования по компенсации первичного поля. Поэтому приемная и передающая рамки должны быть расположены так, чтобы при отсутствии электропроводящих предметов поле излучающей (генераторной) рамки не наводило сигнал в приемной рамке. Данному условию наилучшим образом соответствуют три основных варианта взаимного расположения рамок ИЗ [8] с непрерывным излучением гармонического сигнала зондирования, при которых не происходит наведение тока в приемной рамке: 1 – рамки с перпендикулярными осями (рис. 2, а и в); 2 – рамки со скрещивающимися осями (рис. 2, б); 3 – системы из нескольких рамок (количество больше двух), расположенных компланарно и соответствующим образом включенных электрически (рис. 2, г). Например, на рис. 2, г изображена дифференциальная трехрамочная система, состоящая из компланарно расположенных одной излучающей 1 и двух идентичных приемных рамок 2 и 3. В этом случае приемные рамки 2 и 3 предполагают встречное включение. Поэтому в отсутствие электропроводящих предметов их суммарная ЭДС равна нулю.

Возможны также дифференциальные трехрамочные варианты, состоящие из ортогонально расположенных излучающей рамки 1 и системы из двух взаимно компланарно ориентированных идентичных приемных рамок 2 и 3 (рис. 3, а и б), имеющих встречное включение.

Кроме того, известно, что применение компланарно совмещенных рамок (приемный модуль) позволяет уменьшить габариты поисковой системы в целом. В этом случае приемный модуль можно выполнить в плоском корпусе с малой толщиной, который позволяет приблизить его на минимальное расстояние к поверхности земли. Рамки можно наложить друг на друга, чтобы суммарное электромагнитное поле через плоскость приемной рамки равнялось нулю. Основные варианты взаимного расположения компланарно совмещенных рамок приведены на рис. 4.

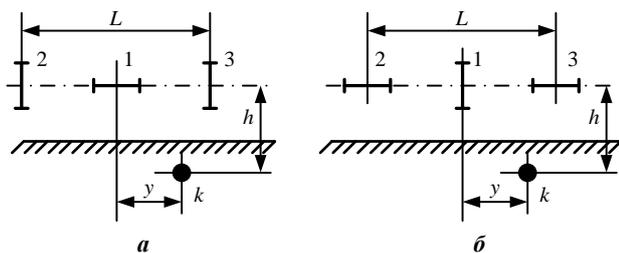


Рис. 3. Варианты дифференциальных трехрамочных систем

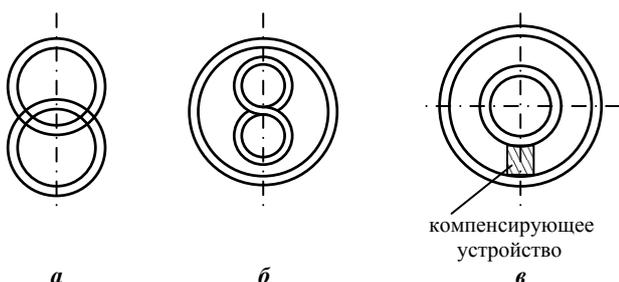


Рис. 4. Варианты компланарно совмещенных рамок ИЗ

В схеме на рис. 4, а взаимное расположение рамок выбрано таким, чтобы суммарный поток вектора магнитной индукции через поверхность, ограниченную приемной рамкой, равнялся нулю. В схеме на рис. 4, б приемная рамка сформирована в виде «восьмерки», так что суммарная ЭДС, наводимая на половине ее витков, расположенных в одном секторе «восьмерки», компенсирует аналогичную суммарную ЭДС, наводимую в другом секторе «восьмерки». Известны также разнообразные конструкции датчиков с компланарно совмещенными и аксиально-симметричными рамками (рис. 4, в). В этом случае приемная рамка расположена внутри излучающей рамки. Наводимая в приемной рамке ЭДС компенсируется специальным трансформаторным устройством, отбирающим часть сигнала излучающей рамки.

Существующие ограничения, определяющие область рационального применения рассмотренных модификаций ИЗ, связаны со следующими факторами: 1 – особенностями самих ИЗ; 2 – особенностями решаемых поисковых задач (обнаружение, детальная локализация объектов в плане и по глубине); 3 – особенностями самих объектов поиска (городские подземные коммуникации, междугородные кабельные магистрали и трубопроводы).

Поэтому исследования, направленные на разработку зондирующих установок (ЗУ), функционирование которых основано на новых физических принципах и оригинальных схемотехнических решениях, обеспечивающих в своей совокупности повышение эффективности поиска и определения пространственного местоположения подземных кабельных линий, трубопроводов и других скрытых коммуникаций, несомненно, являются востребованными.

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ИНДУКЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотренные типы ИЗ ориентированы на реализацию метода реакции параметров электромагнитного поля на внутренний или поверхностный импеданс среды при распространении электромагнитного поля соответственно в земле или над ее поверхностью. Известны также однорамочные ИЗ параметрического типа, посредством которых осуществляется метод реакции входного импеданса приемной рамки ИЗ на электромагнитные свойства зондируемой среды [9].

Исходя из особенностей этих двух методов, можно предложить вариант нового индукционного трассового метода поиска подземных кабельных линий, который фактически объединяет эти два метода и по своей сути является гибридным методом индукционного зондирования.

Традиционно используемые конструкции ИЗ в основном ориентированы на применение приемных рамочных антенн (РА), которые по ряду своих показателей существенно уступают ферромагнитным антеннам (ФА), являющимися фактически «усилителями» магнитного потока. Применение в приемной антенне ИЗ ферромагнитного сердечника позволит уменьшить в ней количество витков ее обмотки, обеспечит увеличение чувствительности измерений и улучшение отношения сигнал/шум. В связи с этим становится очевидным, что при разработке индукционных трассоискателей приемную антенну ИЗ целесообразно выполнять на базе ФА.

Таким образом, предлагаемый вариант ИЗ, реализующий гибридный метод индукционного зондирования, предполагает наличие как приемной ФА, так и РА, совмещающей функции передающей и приемной антенн. Посредством ФА реализуется метод реакции параметров электромагнитного поля на внутренний или поверхностный импеданс среды, а с помощью РА осуществляется метод реакции входного импеданса приемной рамки на электромагнитные свойства зондируемой среды, причем ФА конструктивно представляет собой односекционную магнитную антенну, расположенную компланарно внутри горизонтальной РА.

Вариант конструкции ИЗ на базе ФА и РА в общем виде представлен на **рис. 5**.

ИЗ состоит из плоской многовитковой РА 1, размещенной на кольцевом диэлектрическом каркасе 2, и ФА, образованной совокупностью трех элементов: электрической обмотки в виде многослойной соленоиды 3 и диэлектрического каркаса 4, образующих приемную электрическую катушку; ферритового цилиндрического сердечника 5. ФА закреплена внутри каркаса 2 в его плоскости в специальных диэлектрических втулках на диэлектрическом кольцевом кардановом подвесе 6, который позволяет ориентировать ось чувствительности ФА в требуемой плоскости. В свою очередь, кардановый подвес 6 базируется на цилиндрических штифтах 7 и 8, симметрично расположенных на внутренней поверхности кольцевого диэлектрического каркаса 2. Такое конструктивное решение обеспечивает взаимное ортогональное расположение генераторной рамки 1 и приемной электрической катушки ФА. При такой пространственной ориентации генераторной рамки и приемной катушки ФА будет выполняться условие начального равенства нулю коэффициента их взаимоиндукции.

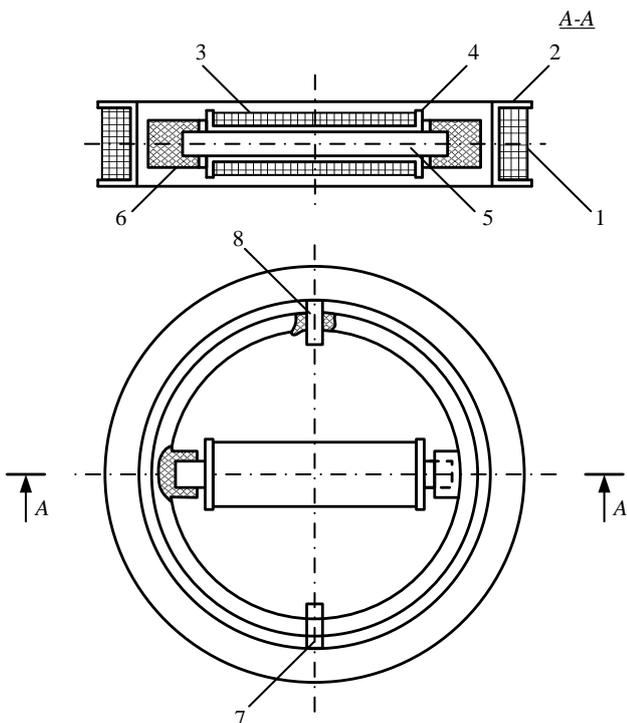


Рис. 5. Вариант конструкции индукционного зонда на базе ФА и РА

Высота карданового подвеса обеспечивается одного порядка с высотой кольцевого диэлектрического каркаса 2, что позволяет выставлять и фиксировать необходимый угол наклона чувствительной оси ФА по отношению к плоскости РА, обеспечивающий требуемый уровень геометрической компенсации первичного поля. Взаимное расположение приемной катушки ФА и РА в горизонтальной плоскости выставляется в два приема: сначала грубо, путем фиксации приемной катушки ФА в определенном месте сердечника 5, а затем плавно, посредством специального регулировочного микровинтового устройства (на **рис. 5** не показан).

Рассмотрим вариант схмотехнической реализации зондирующей установки (ЗУ) с ИЗ нового типа, структурная блок-схема которой представлена на **рис. 6**: 1 – ИЗ; $R_{\text{ИШ}}$ – измерительный токовый шунт; 5 – измерительный усилитель; 6' и 6'' – буферные усилители; 7 – генератор синусоидального напряжения звуковых частот; 8 – формирователь квадратурных опорных напряжений; 9' и 9'' – синхронные детекторы (СД); 10' и 10'' – блоки АЦП; 11 – регистрирующее устройство; 12 – измеритель тока в РА; 13 – блок АЦП.

В состав ИЗ 1 входят РА 2, приемная катушка 3 и ферритовый сердечник 4. Элементы 3 и 4 ИЗ функционально образуют ФА. РА 2 по отношению к приемной катушке 3 ФА имеет ортогональное расположение, что обеспечивает необходимый уровень геометрической компенсации первичного поля для ФА.

Особенности функционирования ЗУ. От генератора синусоидального напряжения 7 сигнал рабочей частоты подается на РА 2. За счет этого в окружающем пространстве создается первичное переменное магнитное поле. Взаимное пространственное расположение приемной катушки ФА относительно генераторной рамки обеспечивает геометрическую компенсацию этого первичного поля. Следовательно, в отсутствие объекта поиска (ОП) во вмещающей среде, ЭДС на выходе измерительного усилителя 5 будет отсутствовать.

Первичное поле намагничивает ОП во вмещающей среде, за счет чего в ОП начинает протекать индуцированный ток, который создает вторичное (перезлученное) магнитное поле с измененной поляризацией. Вторичное поле воздействует на приемную катушку 3 ФА и наводит в ней ЭДС, в результате чего на выходе измерительного усилителя 5 появляется соответствующее напряжение.

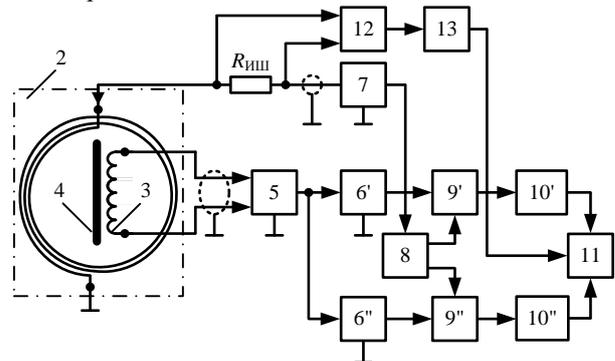


Рис. 6. Структурная блок-схема схмотехнической реализации зондирующей установки

Выходное напряжение имеет две составляющие: реактивную, которая в основном пропорциональна магнитной восприимчивости ОП, и активную, которая зависит от удельной электропроводности ОП. Это напряжение через буферные усилители 6' и 6'' поступает на информационные входы соответствующих синхронных детекторов 9' и 9''. При этом опорные напряжения для этих синхронных детекторов формируют из рабочего синусоидального напряжения, которое с генератора 7 подается на вход формирователя 8 опорных напряжений (синфазного или квадратурного). Выходы формирователя 8 соединены с опорными входами синхронных детекторов 9' и 9'', выходы которых через соответствующие блоки АЦП 10' и 10'' соединены с информационными входами регистрирующего устройства 11, которое фактически является информационно-вычислительным микропроцессорным модулем.

Отметим, что наведенные в ОП вихревые токи создают вторичное переменное электромагнитное поле, направление которого по закону Ленца противоположно возбуждающему полю. Напряженность результирующего магнитного поля будет равна разности напряженностей возбуждающего и вторичного магнитных полей.

Таким образом, электромагнитное поле вихревых токов, при неизменном напряжении питания РА, будет приводить к увеличению ее полного сопротивления и, как следствие, к уменьшению силы тока, протекающего в РА. Следовательно, полное сопротивление РА 2 будет зависеть от величины и характера распределения вихревых токов в ПО во вмещающей среде. В этом случае информативным параметром является амплитуда тока возбуждения РА.

С измерительного токового шунта $R_{иш}$ снимается электрический сигнал, пропорциональный току возбуждения РА 2, и регистрируется измерителем тока 12, который осуществляет как селективную фильтрацию и усиления этого сигнала на частоте возбуждения РА, так и его амплитудное детектирование. С выхода измерителя тока 12 преобразованный сигнал через блок АЦП 13 поступает на соответствующий информационный вход регистрирующего устройства 11.

Вводимая в регистрирующее устройство 11 с информационных входов цифровая информация подвергается соответствующей алгоритмической обработке, по результатам которой и определяются требуемые параметры ОП во вмещающей среде.

Фактически при реализации гибридного метода индукционного зондирования информация регистрируется по одному информационному каналу от РА (текущее значение амплитуды возбуждающего тока) и по двум информационным каналам от ФА (текущие значения амплитуд напряжений соответственно активной и реактивной составляющих выходного сигнала ФА). Реализация такой информационной избыточности в гибридном методе индукционного зондирования существенно повышает его эффективность и достоверность.

Для более полного представления существа предлагаемого гибридного метода индукционного зондирования рассмотрим отдельные физические процессы, лежащие в его основе.

Рассмотрим особенности функционирования двух информационных каналов ФА.

Как указывалось ранее, конструктивно ФА представляет собой катушку индуктивности с сердечником из ферромагнитного материала, подключенную к входному малошумящему измерительному усилителю. Ферромагнитный сердечник, концентрируя в себе магнитные силовые линии, в итоге увеличивает магнитный поток, сцепленный с витками катушки индуктивности. По закону Фарадея напряжение $U_{ФА}$ на выходе катушки индуктивности для внешнего переизлученного магнитного поля с амплитудой H_0 , меняющейся по гармоническому закону с циклической частотой ω и являющейся функцией физических параметров σ и μ , определяется следующим соотношением [10]:

$$\dot{U}_{ФА} = i\omega\mu_{эфф}\mu_0NH_0(\sigma, \mu)S, \quad (1)$$

где i – мнимая единица; $\mu_{эфф}$ – эффективная магнитная проницаемость сердечника; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума; N – количество витков в катушке индуктивности; l – длина сердечника; $S = \pi d^2/4$ – площадь сечения сердечника; d – диаметр сердечника; $H_0 = F(\sigma, \mu)$ – амплитуда напряженности магнитного поля, σ и μ – величины соответственно удельной электрической проводимости и магнитной проницаемости ОП.

На рис. 7 представлена импедансная схема подключения ФА к входному измерительному усилителю. На рис. 7 обозначено: L и R – соответственно индуктивность и активное сопротивление приемной катушки индуктивности; $C = C_{ФА} + C_{ВХ}$ – суммарная емкость цепей ФА и входа измерительного усилителя; $C_{ФА}$ – распределенная межвитковая емкость приемной катушки индуктивности в сумме с другими паразитными емкостями датчика (емкость катушка–сердечник, катушка–экран и т.д.), $C_{ВХ}$ и $R_{ВХ}$ – входные емкость и сопротивление измерительного усилителя.

В соответствии с рис. 7 для сигнала непосредственно на входе усилителя можем записать следующее выражение:

$$\dot{U}_{ВХ} = \frac{\dot{Z}_{ВХ}}{(\dot{Z}_L + Z_R + \dot{Z}_{ВХ})} \dot{U}_{ФА} = \dot{P}(\omega) \dot{U}_{ФА}, \quad (2)$$

где $\dot{P}(\omega)$ – комплексный частотно-зависимый коэффициент передачи; $\dot{Z}_L = i\omega L$ и $\dot{Z}_C = 1/i\omega C$ – соответственно индуктивное и емкостное сопротивления катушки индуктивности; $Z_R = R$ – активное сопротивление катушки индуктивности; $\dot{Z}_{ВХ} = \dot{Z}_C R_{ВХ} / (\dot{Z}_C + R_{ВХ})$ – входной импеданс измерительного усилителя.

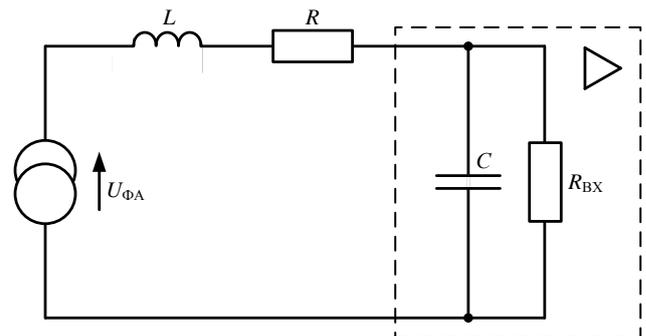


Рис. 7. Импедансная схема подключения ФА

Окончательное выражение с учетом (1) и (2) для амплитуды полезного сигнала Φ_A , приведенного ко входу усилителя, можно представить в следующем виде:

$$\dot{U}_{\text{ВХ}} = \dot{P}(\omega) i \omega \mu_{\text{эфф}} \mu_0 N H_0(\sigma, \mu) S. \quad (3)$$

Из анализа выражения (3) следует, что электрический сигнал с выхода измерительного усилителя имеет реактивную составляющую, пропорциональную в основном магнитной восприимчивости ОП, и активную составляющую, зависящую от его удельной электропроводности, соответственно,

$$U_{\text{КФА}} = k_{\text{ИУ}} k_{\text{К}} |\dot{U}_{\text{ВХ}}| \sin \varphi; \quad (4)$$

$$U_{\text{СФА}} = k_{\text{ИУ}} k_{\text{С}} |\dot{U}_{\text{ВХ}}| \cos \varphi, \quad (5)$$

где φ и ω – соответственно фаза и циклическая частота тока возбуждения РА; $k_{\text{К}}$ и $k_{\text{С}}$ – коэффициенты статических функций преобразования соответствующих СД.

На выходе измерительного усилителя 5 электрический сигнал будет представлять собой смесь информационного и шумового сигналов:

$$\dot{U}_{\Sigma_{\text{ФА}}} = \dot{U}_{\text{ФА}} + \dot{U}_{\text{Ш}}, \quad (6)$$

где $\dot{U}_{\text{Ш}}$ – электрический сигнал, обусловленный наличием «белого шума» и случайных помех.

Статистическую функцию преобразования (СФП) практически любого измерительного преобразователя (ИП) можно представить в виде [11]:

$$y = a_1 + a_2 x + \dots + a_n x^{n-1}, \quad (7)$$

где y – выходная величина; a_1, \dots, a_n – параметры ИП.

Сама процедура синхронного детектирования составляющих суммарного сигнала (6) позволяет значительно увеличить отношение сигнала-помеха (в десятки раз) и тем самым снизить влияние интенсивных шумов и случайных помех на результат измерения до минимума. Результаты преобразования блоками АЦП 10' и 10'' составляющих суммарного измерительного сигнала на выходах СД 9' и 9'' можно представить соответственно как

$$\begin{cases} U_{\text{КФА}} = a_1 \sigma + b_1 \mu; \\ U_{\text{СФА}} = a_2 \sigma + b_2 \mu, \end{cases} \quad (8)$$

где a_1, b_1 и a_2, b_2 – коэффициенты СФП, соответственно квадратурного и синфазного измерительных каналов ФА, определяемые на стадии начальной калибровки ЗУ путем воздействия на ФА определенного набора образцовых физических величин.

Значения вышеуказанных коэффициентов, полученных таким способом, заносятся в регистрирующее устройство 11 и используются им в дальнейшем для реализации необходимых вычислительных процедур.

В силу асимметричных свойств квадратурных измерительных каналов ФА составленные уравнения измерений (8) являются линейно-независимыми алгебраическими уравнениями (принцип инвариантно-

сти) [12], что делает данную систему уравнений корректно составленной и разрешимой относительно искомых параметров σ и μ .

Далее рассмотрим особенности работы информационного канала РА.

Известно, что поле в верхнем полупространстве будет представляться суммой первоначального поля РА и поля вихревых токов (переизлученное поле) вмещающей среды, определяемого в основном ОП. В связи с этим изменение конфигурации величины электромагнитного поля, связанного с ОП, влечет за собой изменение такого электрического параметра РА, как ее импеданса:

$$\dot{Z}_{\Sigma} = \dot{Z}_0 + \dot{Z}_{\text{ВН}}, \quad (9)$$

где \dot{Z}_0 – начальный импеданс РА; $\dot{Z}_{\text{ВН}}$ – вносимый импеданс.

ЭДС, наводимая в РА электромагнитным полем вихревых токов проводящего полупространства, может быть представлена как ЭДС, наводимая РА, являющейся зеркальным изображением излучающей РА с комплексным током:

$$\dot{I}[F_1(\beta, \alpha) + iF_2(\beta, \alpha)], \quad (10)$$

где $F_1(\beta, \alpha)$ и $F_2(\beta, \alpha)$ – функции реакции, определяемые специальным табличным способом по обобщенным параметрам β и α .

В соответствии с (10) полное выражение для расчета вносимого импеданса можно представить в виде [13]:

$$\dot{Z}_{\text{ВН}} = -\frac{6 \cdot 10^{-7} \omega w^2 R}{\beta^2} e^{-\frac{3}{2}\alpha} \left(3 - \sqrt{9 + j4\beta^2}\right)^2, \quad (11)$$

где $\alpha = 2h/R$ и $\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_0}$ – обобщенные параметры для неферромагнитного ОП; R – радиус РА; w – число витков РА; σ – удельная электрическая проводимость ОП; ω – циклическая частота тока возбуждения РА; h – глубина залегания ОП во вмещающей среде.

По закону Ома для комплексного значения тока возбуждения РА справедливо записать:

$$\dot{I}_{\text{РА}} = -\frac{\dot{U}_{\text{В}}}{\dot{Z}_{\Sigma}}. \quad (12)$$

Тогда, согласно (12) сигнал с измерительного шунта можно представить в виде комплексной величины:

$$\dot{U}_{\text{ИШ}} = -\frac{\dot{U}_{\text{В}}}{\dot{Z}_{\Sigma}} R_{\text{ИШ}}. \quad (13)$$

По аналогии с уравнениями измерения (8) для измерительного канала РА можем записать соответствующее уравнение вида

$$U_{\text{ИШ}} = a_3 \sigma + b_3 h, \quad (14)$$

где a_3, b_3 – коэффициенты СФП измерительного канала РА.

Обобщая, составим систему уравнений измерительного процесса реализуемого ЗУ:

$$\begin{cases} U_{\text{КФЛ}} = a_1\sigma + b_1\mu; \\ U_{\text{СФЛ}} = a_2\sigma + b_2\mu; \\ U_{\text{ИШ}} = a_3\sigma + b_3h. \end{cases} \quad (15)$$

Уравнение (14), входящее в систему алгебраических уравнений (15), в силу своей физической сущности является линейно независимым по отношению к уравнениям (8). Поэтому система уравнений (15) в целом также является корректно составленной и разрешимой относительно искомых параметров ОП:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{b_1}{a_2b_1 - a_1b_2} U_{\text{СФЛ}} - \frac{b_2}{a_2b_1 - a_1b_2} U_{\text{КФЛ}}; \\ \mu &= \frac{a_2}{a_2b_1 - a_1b_2} U_{\text{КФЛ}} - \frac{a_1}{a_2b_1 - a_1b_2} U_{\text{СФЛ}}; \\ h &= \frac{(a_2b_1 - a_1b_2)U_{\text{ИШ}} - a_3b_1U_{\text{СФЛ}} + a_3b_2U_{\text{КФЛ}}}{b_3(a_2b_1 - a_1b_2)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Полученные выражения (16) фактически являются вычислительными алгоритмами для определения параметров ОП, которые непосредственно реализуются регистрирующим устройством 11 (см. рис. 6).

Таким образом, предложенный гибридный метод индукционного зондирования, реализующий принцип структурной избыточности, успешно решает задачу повышения эффективности процессов подповерхностного зондирования в целом. Он позволяет выполнить трассировку кабельной линии, определить место ее повреждения (по параметрам σ и μ), а также легко определить один из главных параметров подповерхностного зондирования – глубину залегания h ОП во вмещающей среде.

Испытания макетного образца ЗУ. В качестве ОП были выбраны четырехжильные силовые кабели АВВГ и ВВГ конечной длины (до 5 м), имеющие соответственно алюминиевые и медные жилы, изоляцию и внешнюю оболочку из ПВХ. ОП прокладывались в земле на глубинах от 0,5 до 2 м.

Каждый из указанных типов кабелей был представлен определенной конструкцией и соответствующими тремя вариантами сечений жил (основных и нулевых): 1) АВВГ/ВВГ – 3×95+1×50; 2) АВВГ/ВВГ – 3×70+1×35; 3) АВВГ/ВВГ – 3×50+1×25.

Первичная и вторичная обработка аналоговых сигналов осуществлялась посредством специального электронного модуля, функциональные узлы которого были выполнены на базе прецизионных операционных усилителей, а аналогово-цифровое преобразование сигналов и последующий ввод их численных значений (в цифровом виде) в регистрирующее устройство реализовывалось на базе стандартной системы сбора данных E502 производства «ЛКард» [6]. Данная система сбора данных фактически представляет собой универсальный 16-битный модуль ввода/вывода до 32-х аналоговых и 17-ти цифровых сигналов в персональный 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.

В качестве переносного регистратора использовался ноутбук, программное обеспечение которого было ориентировано на реализацию измерительного алгоритма и соответствующую визуализацию результатов поисковой процедуры.

Экспериментальные исследования функциональных возможностей ЗУ, реализующей гибридный метод индукционного зондирования, проводился, как указывалось ранее на различных образцах ОП и на определенных глубинах их залегания во вмещающей среде, представляющей собой песчано-глинистую породу. Максимальная погрешность определения глубины залегания ОП в среднем составила 10÷15% на 2 м. При этом четко идентифицировался материал образца ОП и безошибочно определялась трасса его пролегания. На глубинах не более 0,5 м для третьего варианта сечений жил кабеля была выявлена возможность определения дефекта в виде обрыва одной из основных жил.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили в целом работоспособность варианта схемотехнической реализации ЗУ и эффективность самого гибридного метода индукционного зондирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты:

1. Проведен анализ принципов построения трассоискателей.
2. Предложен вариант компоновки антенных модулей ЗУ, обеспечивающий повышение эффективности методов индукционного зондирования за счет реализации структурной избыточности.
3. Предложен новый гибридный метод индукционного зондирования для обнаружения скрытых металлодержающих объектов, например, подземных кабельных линий, трубопроводов и т.п.
4. Разработан вычислительный алгоритм, лежащий в основе предлагаемого гибридного метода индукционного зондирования.
5. Проведены испытания макетного образца ЗУ, которые подтвердили эффективность разработанного гибридного метода индукционного зондирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков Г.Н. Обнаружение скрытых объектов. М.: Арбат-Информ, 2004. 138 с.
2. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Индукционная установка для дистанционного обнаружения подземных кабельных линий // Материалы IX Международной научно-технической конференции «Энергетика: Управление, качество и эффективность использования энергоресурсов». Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. С. 310–315.
3. Щербаков Г.Н. Параметрическая локация – новый метод обнаружения скрытых объектов // Специальная техника. 2000. №4. С. 52–58.
4. Никитин О.Р., Кучин С.И. Обнаружение скрытых объектов электромагнитно-акустическим методом // Методы и устройства передачи и обработки информации: межвузовский сборник научных трудов. СПб: Гидрометеоиздат, 2006. Вып. 7. С. 35–38.
5. Юров А.А. Технические средства диагностирования силовых кабельных линий 6-10 кВ с определением места повреждения методом колебательного разряда: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Новочеркасск, 2010. 179 с.
6. Верзунов С.Н., Бочкарев И.В. Разработка программного компонента трассоискателя на базе устройства сбора

- данных Л КАРД E502 // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2(39). С. 42–48.
7. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1975. 256 с.
 8. Брякин И.В. Методы и средства подповерхностного зондирования // Проблемы автоматики и управления. 2006. С. 116–126.
 9. Брякин И.В. Индукционная установка для дистанционного зондирования // Проблемы автоматики и управления. 2013. №1 (24). С. 93–103.
 10. Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля. М.: Издательский дом «Спектр», 2010. 256 с.
 11. Брякин И.В. Метод адаптивной редукиции // Проблемы автоматики и управления. 2014. №1(26). С. 134–143.
 12. Брюханов В.А. Методы повышения точности измерений в промышленности. М.: Издательство стандартов, 1991. 345 с.
 13. Захаров М.М. Датчики электропроводности. М.: Наука, 1979. 156 с.

Поступила в редакцию 17 апреля 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

HYBRID INDUCTION SENSING METHOD FOR DETECTION OF UNDERGROUND CABLE LINES AND PIPELINES

Ivan V. Bryakin

D.Sc. (Engineering), Professor, Senior Researcher, Head of the laboratory of information and measuring systems, Institute of Automation and Information Technology, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: bivas2006@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

Igor V. Bochkarev

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

The analysis of the principles of searchers construction was carried out. It was found that induction route methods based on measurements of secondary electromagnetic fields, which are created by currents induced in a cable by independent radiating systems using third-party power sources, have received the greatest use. For the implementation of these methods, radiating systems of various types are used, such as frame or vibrator antennas. When building locators, the mutual distribution of the receiving and transmitting coils is of particular importance. The research group considered options for the mutual arrangement of the coils. It was found that when building a track finding equipment, two basic methods of control are widely used: the response method of the electromagnetic field parameters to the internal or surface impedance of the medium when the electromagnetic field propagates in or above the ground, respectively, and the input impedance response method of the receiving frame on the electromagnetic properties of the medium being probed. Based on the features of these two methods, a new hybrid method of induction sounding was proposed, which actually combines these two methods. When implementing this hybrid method, an induction probe (IP), which is an induction transducer of a magnetic field into an electrical signal, contains a receiving ferrite antenna (FA) and a loop antenna (LA), and LA combines the functions of transmitting and receiving antennas. A design variant of an IP with coplanar placement of FA relative to LA, which provides full geometric compensation of the primary field, is proposed.

When IP operates, information is recorded on one information channel from LA (the current value of the amplitude of the exciting current) and on two information channels from the FA (current values of the amplitudes of the voltages of the active and reactive components of the output signal of the FA, respectively). The implementation of such information redundancy significantly increases the information content, efficiency and reliability of the proposed hybrid method.

Keywords: locator, induction route sensing methods, induction probe, framework and ferromagnetic antennas, ferromagnetic core, reradiated field, specific electrical

conductivity and magnetic permeability of the object of search, depth.

REFERENCES

1. Shcherbakov G.N. *Obnaruzhenie skrytykh obyektov* [Detection of hidden objects]. М.: Arbat-Inform, 2004. 138 p. (In Russian)
2. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. *Induction installation for remote detection of underground cable lines // Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Energetika: Upravlenie, kachestvo i effektivnost ispolzovaniya energoresursov"* [Materials of the IX International Scientific-Technical Conference "Energy: Management, Quality and Energy Efficiency"]. Blagoveshchensk: Amur State University Press, 2019, pp. 310–315. (In Russian)
3. Shcherbakov G.N. Parametric location – a new method for detecting hidden objects. *Spetsialnaya tekhnika* [Special equipment], 2000, no. 4, pp. 52–58. (In Russian)
4. Nikitin O.R., Kuchin S.I. Detection of hidden objects by the electromagnetic-acoustic method // *Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Methods and devices for information transmission and processing: an inter-educational collection of scientific works]. S. Peterburg: Gidrometeoizdat, 2006, vol. 7, pp. 35–38. (In Russian)
5. Yurov A.A. *Tekhnicheskie sredstva diagnostirovaniya silovykh kabelnykh liniy 6-10 kV s opredeleniem mesta povrezhdeniya metodom kolebatelnogo razryada*. Kand.Diss. [Technical means of diagnosing power cable lines 6-10 kV with determining the location of damage by the oscillatory discharge method: Ph.D. Diss.: 05.14.02]. Novocherkassk, 2010. 179 p.
6. Verzunov S.N., Bochkarev I.V. Development of a software component of the tracker based on the L CARD E502 data acquisition device. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2018, no. 2(39), pp. 42–48.
7. Vanyan L. *Osnovy elektromagnitnykh zondirovaniy* [Fundamentals of electromagnetic soundings]. Moscow: Nedra, 1975. 256 p. (In Russian)
8. Bryakin I.V. Methods and tools for subsurface sensing.

- Problemy avtomatiki i kontrolya* [Problems of automatics and control], 2006, pp. 116–126. (In Russian)
9. Bryakin I.V. Induction installation for remote sensing. *Problemy avtomatiki i kontrolya* [Problems of automation and control], 2013, №1 (24). pp. 93–103. (In Russian)
 10. Gerasimov V.G., Klyuev V.V., Shaternikov V.E. *Metody i pribory elektromagnitnogo kontrolya* [Electromagnetic control methods and devices]. Moscow: Spektr Publishing House, 2010. 256 p. (In Russian)
 11. Bryakin I.V. Adaptive Reduction Method. *Problemy avtomatiki i kontrolya* [Problems of Automation and Control], 2014, no. 1 (26), pp. 134–143. (In Russian)
 12. Bryukhanov V. A. *Metody povysheniya tochnosti izmereniy v promyshlennosti* [Methods of increasing the accuracy of measurements in industry]. Moscow: Publishing house of standards, 1991. 345 p. (In Russian)
 13. Zakharov M.M. *Datchiki elektroprovodnosti* [Conductivity sensors]. M.: Science. 1979, 156 p. (In Russian)
-

Брякин И.В., Бочкарев И.В. Гибридный метод индукционного зондирования для обнаружения подземных кабельных линий и трубопроводов // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2(43). С. 70-78. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-70-78](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-70-78)

Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Hybrid Induction Sensing Method for Detection of Underground Cable Lines and Pipelines. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 70-78. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-70-78](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-70-78)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Агапитов Евгений Борисович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра теплотехнических и энергетических систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: jek_agapitov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5643-4225>

Андреев Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: andreev.asc@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0735-6723>

Баранкова Инна Ильинична – д-р техн. наук, доцент, заведующая кафедрой, кафедра информатики и информационной безопасности, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Inna_Barankova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6077-6164>

Беляев Сергей Викторович – главный специалист, департамент внутреннего аудита, ОАО «МРСК Урала», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: belyaev-sv@mrsk-ural.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0011-4369>

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

Брякин Иван Васильевич – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, лаборатория информационно-измерительных систем, Институт автоматки и информационных технологий, Национальная Академия Наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: bivas2006@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

Вавилов Вячеслав Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электромеханики, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-6974>

Варганова Александра Владимировна – канд. техн. наук, доцент, кафедра 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>

Воронин Станислав Сергеевич – старший преподаватель, кафедра мехатроники и автоматизации, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия.

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

Гасияров Вадим Рашитович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой, кафедра мехатроники и автоматизации, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: gasiyarovvr@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9635-4716>

Дубовик Михаил Евгеньевич – аспирант, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: mihail.dubovik@bk.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7092-1409>

Захарова Анастасия Александровна – магистрант, кафедра теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. E-mail: anastasiyazakharovaalex@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3538-0248>

Исмагилов Флюр Рашитович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра электромеханики, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-9815>

Комков Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1010-6971>

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

Либерман Яков Львович – канд. техн. наук, доцент, кафедра станков и инструмента, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: yakov_liberman@list.ru

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

Логунова Оксана Сергеевна – д-р техн. наук, профессор, директор института, институт строительства, архитектуры и искусства, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Logunova66@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

Малафеев Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: malapheev_av@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1471-9764>

Метельков Владимир Павлович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru

Омельченко Евгений Яковлевич – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: momentum2@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0547-485X>

Панарина Мария Сергеевна – студент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

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

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

Саяхов Ильдус Финатович – инженер, кафедра электромеханики, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия. E-mail: isayakhov92@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8545-9862>

Соколов Александр Павлович – студент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9397-8291>

Соловьев Вячеслав Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: eparu@knastu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7930-0601>

Хатюшина Татьяна Владимировна – студент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, 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>

Чусавитина Галина Николаевна – канд. пед. наук, профессор, заведующая кафедрой, кафедра бизнес информатики и информационных технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: gn.chusavitina@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2468-7519>

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.

С 26.03.2019 журнал входит в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям:

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки);

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки);

05.09.10 – Электротехнология (технические науки);

05.09.12 – Силовая электроника (технические науки);

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки);

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки);

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки);

05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ (технические науки);

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы (технические науки)

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика (технические науки).

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.

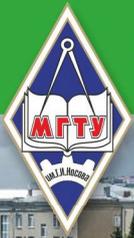
Статьи, направленные в адрес журнала, проходят обязательное научное рецензирование и редактирование. Несоответствие материалов требованиям к статьям может служить поводом для отказа в публикации.

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, оформленная в соответствии с приведенными ниже требованиями;
- анкета (в электронном виде);
- экспертное заключение о возможности опубликования;
- лицензионный договор, подписанный одним автором от коллектива в двух экземплярах;
- согласие на обработку персональных данных на каждого автора.



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



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

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

Образовательный центр включает в себя компьютерный класс на 12 ПК и 24 посадочных места (разработка программно-технических комплексов с базовым программным обеспечением), мульти-медийный класс на 18 посадочных мест (проведение презентаций, докладов и теоретических занятий), 4 лабораторных стенда, моделирующих работу интегрированной распределенной АСУ участка, цеха.



Перечень направлений подготовки в рамках НОЦ для бакалавров и магистрантов:

- 27.03.04 и 27.04.04 «Управление в технических системах»;
- 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профили «Электропривод и автоматика» и «Электроснабжение»);
- 15.03.06 и 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» (профиль «Мехатронные системы в автоматизированном производстве»).

Совместно разработанные программы «Шнейдер Электрик– МГТУ им. Г.И.Носова»:

- системы управления электроприводами на базе преобразователей частоты ATV32, ATV71 и ATV93 и библиотеки SoMove;
- примеры архитектур локальной автоматизации. Особенности конфигурирования контроллера Modicon M251и разработка приложений SoMachin;
- интеграция оборудования распределения электроэнергии и АСУТП в единую систему управления. Организация сетей CANOpen и Ethernet. Современные подходы к построению программно-технических комплексов.