

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 62 Номер 8 2019



• МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Толстолистовой прокат с изменяющимися механическими свойствами по толщине

Исследование процесса получения трехслойных стальных биметаллических полос на установке непрерывного литья и деформации. Сообщение 1

• ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Разработка и исследование гидропривода листовых ножниц

• МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Структура и свойства слоя, наплавленного на сталь ХАРДОКС 450 борсодержащей проволокой

• ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Термодинамическое моделирование изотерм растворимости кислорода в жидком металле системы Fe–Mg–Al–O



IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

Vol. 62 No. 8 2019

Web: fermet.misis.ru

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 8, 2019

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 62

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Главный редактор: ЛЕОНТЬЕВ Л.И.
(Российская Академия Наук, г. Москва)

Заместитель главного редактора: ПРОТОПОПОВ Е.В.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Заместитель ответственного секретаря: БАЩЕНКО Л.П.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Члены редакционной коллегии:

АЛЕХИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)

АСТАХОВ М.В. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

АППИХИНИ Т.В. (САО «Иркутск» ЦНИИ-«Иркутск», г. Иркутск)

БАЙСАЛОВ С.С. (Сибирский индустриальный институт им. Ж.А.Байкова, г. Кемерово, Республика Казахстан)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ А.А. (Институт уральского сталелитейного производства, г. Челябинск)

БЕЛОВ В.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

БЕЛОВ А.М. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БОГАТЫРЬ С.М. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БРИСОВИЧ К.В. (Институт уральского сталелитейного производства, г. Челябинск)

БРИСОВИЧ К.В. (Институт уральского сталелитейного производства, г. Челябинск)

БРИСОВИЧ К.В. (Институт уральского сталелитейного производства, г. Челябинск)

БРИСОВИЧ К.В. (Институт уральского сталелитейного производства, г. Челябинск)

БРИСОВИЧ К.В. (Институт уральского сталелитейного производства, г. Челябинск)

БРИСОВИЧ К.В. (Институт уральского сталелитейного производства, г. Челябинск)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БОЛОТОВИЧ В.М. (Российский государственный университет, г. Тула)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

БЕЛОВ В.П. (Всероссийский научно-исследовательский институт «МНЦ»-С, г. Москва)

Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати
Сибирским государственным индустриальным университетом

Адреса редакции:

119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Тел.: (495) 638-44-11, (495) 236-14-27
E-mail: factnet.misis@mail.ru, factnet@misis.ru
www.factnet.misis.ru

654007, Новокузнецк, 7,
Каменской обл., ул. Кирова, д. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: (3843) 74-86-28
E-mail: redjizna@sibsu.ru

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» по решению ВАК входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» индексируется в международную базу данных Scopus.

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-35456

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Главный редактор: ЛЕОНТЬЕВ Л.И.
(Российская Академия Наук, г. Москва)

Заместитель главного редактора: ПРОТОПОПОВ Е.В.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Заместитель ответственного секретаря: БАЩЕНКО Л.П.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Члены редакционной коллегии:

АЛЕШИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)
АСТАХОВ М.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветмет-обработка», г. Москва)
БАЙСАНОВ С.О. (Химико-металлургический институт им. Ж.Абдыша, г. Караганда, Республика Казахстан)
БЕЛОВ В.Д. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
БРОДОВ А.А., редактор раздела «Экономическая эффективность металлургического производства» (ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина», г. Москва)
ВОЛЫНКИНА Е.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ГЛЕЗЕР А.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГОРБАТЮК С.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГРИГОРОВИЧ К.В., редактор раздела «Металлургические технологии» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
ГРОМОВ В.Е. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ДМИТРИЕВ А.Н. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ДУБ А.В. (ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)
ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридрих-Александр, Германия)
ЗИНИГРАД М. (Институт Арсиз, Израиль)

ЗОЛОТУХИН В.И. (Тулский государственный университет, г. Тула)
КОЛМАКОВ А.Г. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОЛОКОЛЫЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)
КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОСЫРЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)
КУРТАНОВА Ю.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЛАЗУТКИН С.С. (ГК «МетПром», г. Москва)
ЛИНН Х. (ООО «Линн Хай Терм», Германия)
ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)
МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ОСТРОВСКИЙ О.И. (Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия)
ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С., редактор раздела «Ресурсосбережение в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «Инновации в металлургическом производстве и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)

РАШЕВ Ц.В., редактор раздела «Статьи особого назначения» (Академия наук Болгарии, Болгария)
РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)
СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва)
СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «Экология и рациональное природопользование» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СМИРНОВ Л.А. (ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)
СОЛОДОВ С.В., редактор раздела «Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университетов Цингу, г. Шеньян, Китай)
ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «Материаловедение» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ШПАЙДЦЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Пфайер, Швейцария)
ЮРЬЕВ А.Б. (АО «ЕВРАЗ ЭСМК», г. Новокузнецк)
ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати
Сибирским государственным индустриальным университетом

Адреса редакции:

119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Тел.: (495) 638-44-11, (499) 236-14-27
E-mail: festmet.misis@mail.ru, festous@misis.ru
www.festmet.misis.ru

654007, Новокузнецк, 7,
Камеровский обл., ул. Кирова, д. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: (3843) 74-86-28
E-mail: redizvest@sisiu.ru

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» по решению ВАК входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» индексируется в международной базе данных Scopus.

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций ПИ № 477-35456

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Максимов А.Б., Шевченко И.П., Ерохина И.С. Толстолистовой прокат с изменяющимися механическими свойствами по толщине 587
- Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Исследование процесса получения трехслойных стальных биметаллических полос на установке непрерывного литья и деформации. Сообщение 1 594
- Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю., Исмагилов Р.Р. Теоретический анализ формирования шероховатости автомобильного листа при прессировке в вальках обработанных дробью 600
- Козырев Н.А., Михно А.Р., Крюков Р.Е., Калининский А.Н., Башенко Л.П. Влияние введения добавок во флюсы, изготовленные из ковшевого электросталеплавильного шлака 606

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Романов Д.А., Клопотов А.А., Рубанникова Ю.А. Структура и свойства слоя, наплавленного на сталь ХАРДОКС 450 боросодержащей проволокой 613
- Фадин В.В., Колубаев А.В., Алеутдинова М.И. Об износостойкости стальсодержащих композитов в экстремальных условиях трения 621
- Габелая Д.И., Кабаков З.К., Машенко М.А. Расчет изменения удельных объемов сплавов системы Fe–C в зависимости от содержания углерода и температуры 627

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

- Пилипенко С.С., Потапенков А.П. Разработка и исследование гидропривода листовых ножниц 632

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Михайлов Г.Г., Самойлова О.В., Макровец Л.А., Смирнов Л.А. Термодинамическое моделирование изотерм растворимости кислорода в жидком металле системы Fe–Mg–Al–O 639

НАУКА ПРОИЗВОДСТВУ

- Варламов В.В., Кипервассер М.В., Герасимук А.В. Моделирование перегрузок механизма подъема мостовых кранов металлургических предприятий 646

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

- Кулаков С.М., Мусатова А.И., Кадьков В.Н. Многовариантное оценивание длительности изготовления партий стальной проволоки на основе ситуационно-нормативных моделей. Сообщение 2 652
- Леониду Андреевичу Смирнову – 85 лет 660
- Борису Александровичу Сиваку – 70 лет 661

CONTENTS

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- A.B. Maksimov, I.P. Shevchenko, I.S. Erokhina Sheet metal with variable mechanical properties over its thickness 587
- O.S. Lelkhov, A.V. Mikhalev, M.M. Shevelev Production of three-layer steel bimetallic strips in the unit of continuous casting and deformation. Report 1 594
- N.N. Ogarkov, E.Yu. Zvyagina, R.R. Ismagilov Theoretical analysis of formation of automobile sheet roughness during temper rolling in shot-blasted rolls 600
- N.A. Kozyrev, A.R. Mikhno, R.E. Kryukov, A.N. Kalinogorskii, L.P. Bashchenko Effect of additives introduction to fluxes manufactured from ladle electric steel slag 606

MATERIAL SCIENCE

- Yu.F. Ivanov, V.E. Gromov, D.A. Romanov, A.A. Klopotov, Yu.A. Rubannikova Structure and properties of layer, surfaced on HARDOX 450 steel by boron containing wire 613
- V.V. Fadin, A.V. Kolubaev, M.I. Aleutdinova On wear resistance of steel-containing composites under extreme friction conditions 621
- D.I. Gabelaya, Z.K. Kabakov, M.A. Mashchenko Calculation of changes in specific volumes of Fe–C system alloys depending on carbon content and temperatures 627

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

- S.S. Pilipenko, A.P. Potapenko Development and research of hydraulic drive of sheet shears 632

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

- G.G. Mikhailov, O.V. Samoilova, L.A. Makrovets, L.A. Smirnov Thermodynamic modeling of isotherms of oxygen solubility in liquid metal of Fe–Mg–Al–O system 639

SCIENCE APPLICATION

- V.V. Varlamov, M.V. Kipervasser, A.V. Gerasimuk Modeling of overloads of raising mechanism in metallurgical overhead cranes 646

ECONOMIC EFFICIENCY OF METALLURGICAL PRODUCTION

- S.M. Kulakov, A.I. Musatova, V.N. Kadykov Multivariate estimation of production duration of steel wire batches on the basis of situational-regulatory models. Message 2 652
- To the 85th Anniversary of Leonid Andreevich Smirnov 660
- To the 70th Anniversary of Boris Aleksandrovich Sivak 661

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕГРУЗОК МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА МОСТОВЫХ КРАНОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*Варламов В.В.¹, д.ф.-м.н., профессор кафедры прикладной математики
и информатики (vadin.varlamov@mail.ru)*

*Кипервассер М.В.¹, к.т.н., доцент кафедры электротехники, электропривода
и промышленной электроники (kipervasser2012@ya.ru)*

Герасимук А.В.², ведущий специалист отдела электроснабжения (heavymetdl7200@gmail.com)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² АО «Сибирский Тяжпромэлектропроект»
(654000, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, 5)

Аннотация. Рассмотрены электрохимические процессы, протекающие при подъеме груза мостовым краном. Основная идея работы заключается в идентификации аварийного режима (перегрузки крана) методом, основанным на контроле тока статора электродвигателя подъема. Для получения диаграмм тока статора электродвигателя разработана математическая модель мостового крана (трехмассовой схемы), которая включает в себя уравнения, описывающие упругие свойства балок крана и его каната. Для описания приводного асинхронного электродвигателя принята система (α, β) -координат, неподвижных относительно статора электродвигателя. Цикл подъема груза рассматривается как последовательность трех этапов: выбор «слабины» каната; натяжение каната; отрыв и подъем груза. Для каждого этапа составлены системы дифференциальных уравнений, описывающие движение масс элементов мостового крана и поведение электрических параметров электродвигателя. Определены начальные и граничные условия для каждого из этапов. Проведены предварительные преобразования систем уравнений к решению численными методами и последующее моделирование этапов подъема грузов разной массы. Последовательное решение трех краевых задач позволяет получить величины интересующих токов статора в момент отрыва груза. Получены диаграммы токов фазы статора электродвигателя для грузов различной массы. Результаты моделирования свидетельствуют о наличии поддомшей фиксации разности величин токов статора после отрыва груза от опорной поверхности. На основании разработанной модели и полученных результатов исследования предложена функциональная схема устройства защиты крана от перегрузки и описан принцип его работы, который заключается в контроле поддомшей массы груза и контроле тока статора при подъеме груза. Сделан вывод о целесообразности и эффективности контроля электрических величин электродвигателя подъема для организации защиты мостового крана от перегрузок. Оценена эффективность работы предложенной системы.

Ключевые слова: ток статора, электродвигатель, защита, кран, моделирование, перегрузки.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-8-646-651

ВВЕДЕНИЕ

Ведение технологических процессов на металлургических предприятиях обеспечивается значительным количеством технологического и ремонтного оборудования. На металлургических предприятиях одним из основных видов оборудования является грузоподъемное оборудование: мостовые краны и кран-балки различного назначения. Доля грузоподъемных механизмов в общем количестве технологического и ремонтного оборудования цехов металлургических предприятий может достигать 9 – 12 %. Например, общее количество мостовых кранов площадки строительного проката АО «ЕВРАЗ ЗСМК» составляет порядка 530 единиц. От надежной и безопасной работы грузоподъемных кранов зависит безопасность персонала, ритмичность технологических процессов и экономические показатели предприятий. В этой связи разработка средств защиты и диагностики грузо-

подъемных механизмов от аварийных ситуаций является актуальной задачей [1, 2].

К основным аварийным ситуациям мостовых кранов можно отнести следующие события: обрыв подъемных канатов, переподъем грузозахватного органа, нарушение целостности и геометрии конструкции крана, выход из строя электродвигателя подъема. Значительная часть перечисленных аварийных ситуаций вызвана увеличением нагрузки при подъеме груза до недопустимой.

Для предотвращения аварийных режимов, вызванных подъемом грузов чрезмерной массы, используются предохранительные устройства (ограничители грузоподъемности). Предлагается к использованию несколько основных способов контроля перегрузки. Устройства с пружинно-рычажными системами не обладают достаточными точностью и быстродействием [3], тензодатчики также имеют недостаточную чувствительность [4, 5]. Возможны устройства

с применением дополнительных силовых элементов, усложняющих конструкцию и снижающих надежность защиты [6].

С учетом изложенного, а также в условиях недостатка эксплуатирующего и ремонтного персонала, для диагностики аварийной ситуации необходимо использовать все технические возможности, в том числе методы косвенного контроля. Идентификация аварийной ситуации подъема груза чрезмерной массы возможна с использованием косвенного метода, основанного на контроле электрических параметров электродвигателя механизма подъема [7, 8]. Для выявления диагностических признаков следует провести исследование модели объекта в аварийной ситуации.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДЪЕМА ГРУЗА КРАНОМ

Для описания механической части привода подъема мостовых кранов принята стандартная приведенная на рис. 1 трехмассовая модель с упругими связями между массами [9].

Движение масс трехмассовой модели после отрыва груза по данным работы [9] описывается выражениями

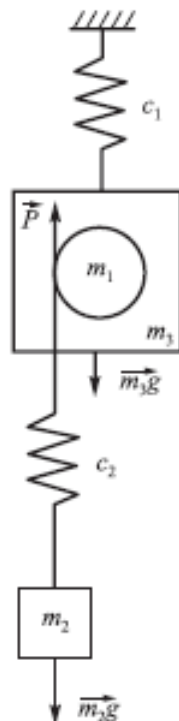


Рис. 1. Трехмассовая схема механизма подъема: m_1 , m_2 и m_3 – приведенные к канату массы груза, моста и вращающихся частей механизма подъема; c_1 и c_2 – жесткости каната и моста крана; P – среднелетящая сила электродвигателя

Fig. 1. Three-mass diagram of the lifting mechanism: m_1 , m_2 and m_3 are masses of the load, bridge, and rotating parts of the lifting mechanism brought to the rope; c_1 and c_2 – rigidity of rope and crane bridge; P – motor starting force

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = P - F_k(t); \\ m_2 \ddot{x}_2 = F_k(t) - Q + m_2 \ddot{x}_3; \\ m_3 \ddot{x}_3 = G + F_k(t) - F_{упр.м}(t), \end{cases} \quad (1)$$

где x_1 , x_2 , x_3 – перемещения масс; $Q = m_1 g$ – вес поднимаемого груза; $G = m_3 g$ – вес моста крана с тележкой; $F_k(t)$ – сила натяжения подъемного каната; $F_{упр.м}(t)$ – упругая сила балок моста.

Для описания приводного асинхронного электродвигателя принята система (α, β) -координат, неподвижных относительно статора электродвигателя [10, 11]:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{sa}}{dt} + r_s i_{sa} = U_{mf} \sin(\omega t); \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} + r_s i_{s\beta} = 0; \\ \frac{d\psi_{ra}}{dt} + r_r i_{ra} + \frac{i}{R_{бар}} x'_1 \psi_{r\beta} = 0; \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + r_r i_{r\beta} - \frac{i}{R_{бар}} x'_1 \psi_{ra} = 0; \\ \psi_{sa} = L_s i_{sa} + L_m i_{ra}; \\ \psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}; \\ \psi_{ra} = L_r i_{ra} + L_m i_{sa}; \\ \psi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}; \\ P = 3k(\psi_{sa} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{sa}), \end{cases} \quad (2)$$

где r_s и r_r – сопротивления статора и ротора; L_s и L_r – индуктивности статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность статора и ротора; ω – угловая частота; U_{mf} – фазное напряжение; ψ_{sa} , ψ_{ra} , $\psi_{s\beta}$, $\psi_{r\beta}$ – потокосцепления статора (ψ_s) и ротора (ψ_r) по продольной (α) и поперечной (β) осям; i_{sa} , $i_{s\beta}$ и i_{ra} , $i_{r\beta}$ – составляющие токов статора и ротора по продольной и поперечной осям; i – передаточное число механизма подъема; $R_{бар}$ – радиус барабана механизма подъема; $k = i/R_{бар}$ – коэффициент приведения электромагнитного момента двигателя к подъемному канату.

В работе [9] цикл подъема груза рассматривается как последовательность трех этапов:

- выбор «слабины» каната;
- натяжение каната;
- отрыв и подъем груза.

Для каждого из этапов с использованием выражений (1), (2) можно записать систему дифференциальных уравнений, описывающих движение масс и поведение электрических параметров двигателя [9, 10, 12].

Первый этап.

– начальные условия:

$$\begin{aligned} x'_1 = 0; x'_2 = 0; x'_3 = 0; i_{sa} = i_{sa0}; i_{s\beta} = i_{s\beta0}; \\ i_{ra} = i_{ra0}; i_{r\beta} = i_{r\beta0}; t = 0; \end{aligned}$$

– система уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = 3kL_m(i_{ra}i_{\phi} - i_{r\phi}i_{sa}); \\ L_s \frac{di_{sa}}{dt} + L_m \frac{di_{ra}}{dt} + r_s i_{sa} = U_{\omega\phi} \sin(\omega t); \\ L_s \frac{di_{\phi}}{dt} + L_m \frac{di_{r\phi}}{dt} + r_s i_{\phi} = 0; \\ L_r \frac{di_{ra}}{dt} + L_m \frac{di_{sa}}{dt} + r_r i_{ra} - \\ - kx'_1(L_r i_{r\phi} + L_m i_{s\phi}) = 0; \\ L_r \frac{di_{r\phi}}{dt} + L_m \frac{di_{s\phi}}{dt} + r_r i_{r\phi} + \\ + kx'_1(L_r i_{ra} + L_m i_{sa}) = 0; \end{cases} \quad (3)$$

– условие окончания:

$$F_k(t) = c_1 x_1 > 0. \quad (4)$$

Второй этап.

– начальные условия:

$$\begin{aligned} x'_1 = x'_{1k}; x'_2 = 0; x'_3 = x'_{3k}; i_{sa} = i_{sa1k}; i_{\phi} = i_{\phi1k}; \\ i_{ra} = i_{ra1k}; i_{r\phi} = i_{r\phi1k}; t = t_{1k}; \end{aligned}$$

– система уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = 3kL_m(i_{ra}i_{\phi} - i_{r\phi}i_{sa}) - \\ - c_1(x_1 - x_3); \\ m_3 \ddot{x}_3 = G + c_1(x_1 - x_3) - c_2 x_3; \\ L_s \frac{di_{sa}}{dt} + L_m \frac{di_{ra}}{dt} + r_s i_{sa} = U_{\omega\phi} \sin(\omega t); \\ L_s \frac{di_{\phi}}{dt} + L_m \frac{di_{r\phi}}{dt} + r_s i_{\phi} = 0; \\ L_r \frac{di_{ra}}{dt} + L_m \frac{di_{sa}}{dt} + r_r i_{ra} - \\ - kx'_1(L_r i_{r\phi} + L_m i_{s\phi}) = 0; \\ L_r \frac{di_{r\phi}}{dt} + L_m \frac{di_{s\phi}}{dt} + r_r i_{r\phi} + \\ + kx'_1(L_r i_{ra} + L_m i_{sa}) = 0; \end{cases} \quad (5)$$

– условие окончания:

$$F_k(t) = c_1(x_1 - x_2) = m_2 g. \quad (6)$$

Третий этап.

– начальные условия:

$$\begin{aligned} x'_1 = x'_{1k}; x'_2 = 0; x'_3 = x'_{3k}; i_{sa} = i_{sa2k}; i_{\phi} = i_{\phi2k}; \\ i_{ra} = i_{ra2k}; i_{r\phi} = i_{r\phi2k}; t = t_{2k}; \end{aligned}$$

– система уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = 3kL_m(i_{ra}i_{\phi} - i_{r\phi}i_{sa}) - Q - c_1(x_1 - x_2); \\ m_2 \ddot{x}_2 = c_1(x_1 - x_2) - Q + m_2 x'_3; \\ m_3 \ddot{x}_3 = G + c_1(x_1 - x_2) - c_2 x_3; \\ L_s \frac{di_{sa}}{dt} + L_m \frac{di_{ra}}{dt} + r_s i_{sa} = U_{\omega\phi} \sin(\omega t); \\ L_s \frac{di_{\phi}}{dt} + L_m \frac{di_{r\phi}}{dt} + r_s i_{\phi} = 0; \\ L_r \frac{di_{ra}}{dt} + L_m \frac{di_{sa}}{dt} + r_r i_{ra} - kx'_1(L_r i_{r\phi} + L_m i_{s\phi}) = 0; \\ L_r \frac{di_{r\phi}}{dt} + L_m \frac{di_{s\phi}}{dt} + r_r i_{r\phi} + kx'_1(L_r i_{ra} + L_m i_{sa}) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Системы уравнений (3), (5), (7) являются задачами Коши. При этом начальные условия для каждой следующей задачи определяются по результатам расчета предыдущей.

Для приведения систем (3), (5), (7) к стандартному виду введем замену [13, 14]:

$$\begin{cases} i_{sa} = \frac{1}{\sigma X_s} \psi_{sa} - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} \psi_{ra}; \\ i_{\phi} = \frac{1}{\sigma X_s} \psi_{\phi} - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} \psi_{r\phi}; \\ i_{ra} = \frac{1}{\sigma X_r} \psi_{ra} - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} \psi_{sa}; \\ i_{r\phi} = \frac{1}{\sigma X_r} \psi_{r\phi} - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} \psi_{\phi}, \end{cases} \quad (8)$$

где $X_m = \omega L_m$ – индуктивное сопротивление взаимной индуктивности машины; $X_r = \omega L_r$ и $X_s = \omega L_s$ – индуктивные сопротивления ротора и статора; $\sigma = \frac{X_m^2}{X_s X_r}$ – коэффициент рассеяния.

Введем также следующие обозначения:

Исходное обозначение ... ψ_m ψ_{ϕ} ψ_m $\psi_{r\phi}$ x'_1 x'_2 x'_3 x_1 x_2 x_3
Замена w_1 w_2 w_3 w_4 w_5 w_6 w_7 w_8 w_9 w_{10}

Запишем соотношения (8) в новых обозначениях

$$\begin{cases} i_{sa} = \frac{1}{\sigma X_s} w_1 - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} w_3; \\ i_{\phi} = \frac{1}{\sigma X_s} w_2 - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} w_4; \\ i_{ra} = \frac{1}{\sigma X_r} w_3 - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} w_1; \\ i_{r\phi} = \frac{1}{\sigma X_r} w_4 - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} w_2. \end{cases} \quad (9)$$

Преобразуем систему уравнений (3), (5), (7) с учетом (9) и вышеприведенной замены переменных [15–18].

На примере системы выражений (7) (третий этап) покажем приведение к стандартному виду. Запишем систему (7) с учетом замены и новых обозначений:

$$\begin{cases} \frac{dw_1}{dt} = -U_{\text{мф}} \sin(\omega t) - r_s i_{ra}; \\ \frac{dw_2}{dt} = -r_s i_{r\beta}; \\ \frac{dw_3}{dt} = -r_s i_{ra} + k w_3 w_4; \\ \frac{dw_4}{dt} = -r_s i_{r\beta} + k w_5 w_3; \\ \frac{dw_5}{dt} = \frac{3kL_m}{m_1} (i_{ra} i_{r\beta} - i_{r\beta} i_{ra}) - \frac{c_1}{m_1} (w_8 - w_9); \\ \frac{dw_6}{dt} = \frac{c_1}{m_2} (w_8 - w_9) - \frac{Q}{m_2} + \frac{dw_7}{dt}; \\ \frac{dw_7}{dt} = \frac{G}{m_3} + \frac{c_1}{m_3} (w_8 - w_9) - \frac{c_2}{m_3} w_{10}; \\ \frac{dw_8}{dt} = w_5; \\ \frac{dw_9}{dt} = w_6; \\ \frac{dw_{10}}{dt} = w_7. \end{cases} \quad (10)$$

Последовательным решением трех задач Коши можно рассчитать величины интересующих токов статора. Совместное решение преобразованных выражений (3), (5), (7) позволяет получить электрические величины электродвигателя (токов статора) на этапе начала движения при отрыве груза от опорной поверхности.

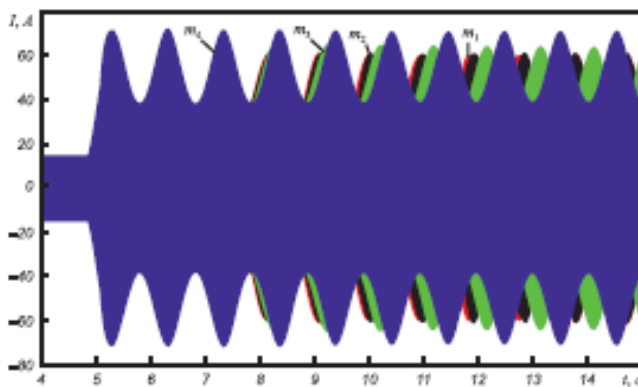


Рис. 2. Колебания тока статора электродвигателя при подъеме грузов различной массы для полной последовательности трех этапов в масштабе нескольких колебаний грузов

Fig. 2. Oscillations of current of the electric motor stator when lifting loads of different weights for a complete sequence of three stages on a scale of several loads oscillations

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Приведенная методика была использована для расчетов токов статора двигателя механизма подъема ремонтного мостового крана грузоподъемностью 32 т АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в программном комплексе MatLab [19, 20].

Исследовали величины токов статора в режиме подъема грузов допустимой массы и подъема груза массой, превышающей допустимую на 3, 15 и 25 %. Результаты моделирования: величины токов статора электродвигателя подъема при отрыве от поверхности грузов массой $m_1 = 32\,000$ кг, $m_2 = 33\,000$ кг, $m_3 = 36\,000$ кг и $m_4 = 40\,000$ кг ($I_1(t)$, $I_2(t)$, $I_3(t)$ и $I_4(t)$ соответственно) показаны на рис. 2–4.

На рис. 2 до момента времени 4,8 с продолжается выбор «слабины» каната механизма подъема (первый этап движения механизма). На первом этапе ток статора не зависит от величины массы груза и одинаков для всех грузов. Значение тока в течение первого этапа неизменно (за исключением не изображенного на рис. 2 промежутка времени при запуске двигателя). Величина «слабины» каната принята одинаковой для всех грузов. В момент времени 4,8 с первый этап движения заканчивается в соответствии с условием (4) окончания первого этапа.

На втором этапе движения амплитудное значение тока возрастает по мере натяжения каната механизма подъема. До окончания этапа значения тока также не зависят от массы груза (рис. 2, 3).

Время начала третьего этапа движения для каждого из грузов различно (рис. 2, 3). В соответствии с условием окончания второго этапа (6) для грузов большей массы отрыв груза происходит позднее.

На третьем этапе движения амплитудные значения тока колеблются с частотой, определяемой соотношением приведенных масс и жесткостью связей. Кроме

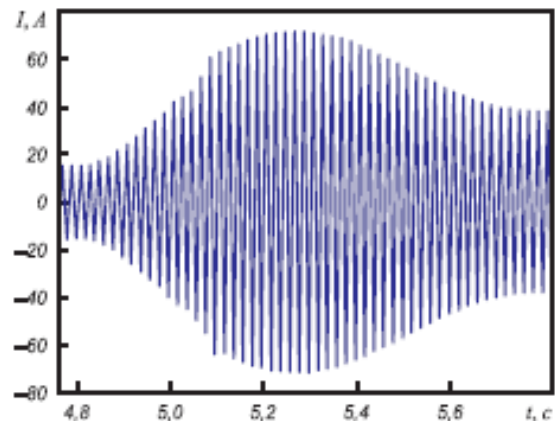


Рис. 3. Колебания тока статора электродвигателя при подъеме грузов различной массы в масштабе одного первого колебания грузов

Fig. 3. Oscillations of current of the electric motor stator when lifting loads of different weights on the scale of the first oscillation of loads

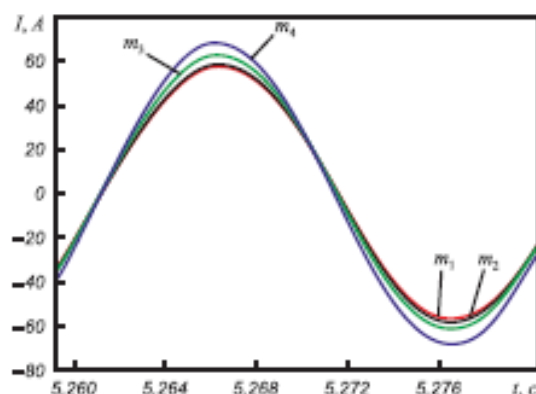


Рис. 4. Ток статора электродвигателя при подъеме грузов различной массы в масштабе одного полного колебания тока

Fig. 4. Current of the electric motor stator when lifting loads of different weights on the scale of one complete current oscillation

смещения по времени начала третьего этапа (отрыва груза) отличаются по величине мгновенные и амплитудные значения тока для разных масс m_1 , m_2 , m_3 и m_4 (рис. 2 – 4). Также наблюдается смещение колебаний по фазе для грузов различной массы. Появление различий в величинах моделируемого тока статора на третьем этапе свидетельствует о чувствительности модели к вариации массы поднимаемого груза.

Выводы

Проведено математическое моделирование процессов подъема грузов различной массы. На первых двух этапах значения тока приводного электродвигателя механизма подъема не зависят от массы груза. Время начала третьего этапа зависит от массы груза. Частота колебаний тока на третьем этапе зависит от массы груза, но при этом изменяется в небольших пределах (для грузов с массами 32 и 40 т разница составила 0,1 Гц). Мгновенные и амплитудные значения тока на третьем этапе возрастают по мере увеличения массы груза. Результаты моделирования свидетельствуют о наличии поддающейся фиксации разнице величин токов статора для грузов разной массы после отрыва груза от опорной поверхности. Таким образом, контроль электрических величин электродвигателя подъема позволяет создать защиту грузоподъемного механизма от перегрузки на основании метода амплитудного анализа тока статора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прокофьев Б.И., Попов М.Ю. Безопасная эксплуатация крановых сооружений: Учебное пособие. – Томск: изд. Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2014. – 160 с.

2. Eihib M. Dynamics and Control of Cranes: A Review. Department of Engineering Science and Mechanics, MC 0219. – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2001. – 46 p.
3. Пат. 2144901 РФ. Устройство для измерения и ограничения грузоподъемности лебедки / Платонов Г.Г., Кудрявцев А.В., Сологубов С.Н.; заявл. 20.05.1998; опубл. 27.01.2000. Бюл. № 3.
4. Пат. 2464220 РФ. Тензометрическая ось для измерения нагрузки на крюке грузоподъемного крана / Потопов В.А., Тимин Ю.Ф., Корников М.В.; заявл. 24.03.2011; опубл. 20.10.2012. Бюл. № 29.
5. Пат. 2483016 РФ. Ограничитель нагрузки мостового крана / Коровин В.А., Коровин К.В.; заявл. 24.08.2011; опубл. 27.05.2013. Бюл. № 15.
6. Пат. 2381984 РФ. Устройство для определения веса груза мостового крана / Кадыров Х.М.; заявл. 28.07.2008; опубл. 20.02.2010. Бюл. № 5.
7. Сафин Н.Р., Практ В.А., Дмитриевский В.А. Диагностика неисправностей вентиляторных установок с помощью спектрального анализа токов статора // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. № 4. С. 37 – 42.
8. Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Аникинов Д.С. Диагностика аварийных режимов ленточных транспортеров в горно-металлургической промышленности // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 12. С. 906 – 911.
9. Казак С.А. Динамика мостовых кранов. – М.: Машиностроение, 1968. – 332 с.
10. Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков К.А. Электрические машины (специальный курс). – М.: Высшая школа, 1987. – 287 с.
11. Alan L. Sheldrake. Handbook of Electrical Engineering: For Practitioners in the Oil, Gas and Petrochemical Industry. – John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 631 p.
12. Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Аникинов Д.С., Реморов В.Е. Об использовании метода контроля состояния машин технологических агрегатов по энергетическим параметрам привода // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 12. С. 31 – 33.
13. Ansari A., Deshpande D. Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink // International Journal of Engineering Science and Technology. 2010. Vol. 2. No. 5. P. 1260 – 1267.
14. Arya M.K., Wadhvani S. Transient Analysis of Three Phase Squirrel Cage Induction Machine using Matlab // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). 2009. Vol. 1. No. 3. P. 918 – 922.
15. William F. Trench. Elementary differential equations. Department of Mathematics Trinity University San Antonio. – Texas, USA, 2017. – 663 p.
16. David J. Logan. First course in differential equations for scientists and engineers. – Springer-Verlag, 2015. – 380 p.
17. Jeffrey R. Chasnov Introduction to Differential Equations. – The Hong Kong University of Science and Technology, 2016. – 147 p.
18. Zhengyan Zhang D. Chen and Min Feng "Dynamics model and dynamic simulation of overhead crane load swing systems based on the ADAMS, "2008 9th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design. – Kunming, 2008. P. 484 – 487.
19. Mark S. Gockenbach. MATLAB Tutorial to accompany Partial Differential Equations: Analytical and Numerical Methods, 2nd edition. – SIAM, 2010. – 136 p.
20. Howard P. Solving ODE in MATLAB. – Fall, 2007. – 22 p.

Поступила в редакцию 19 февраля 2019 г.

После доработки 4 апреля 2019 г.

Принята к печати 29 мая 2019 г.

MODELING OF OVERLOADS OF RAISING MECHANISM IN METALLURGICAL OVERHEAD CRANES

V.V. Varlamov¹, M.V. Kipervasser¹, A.V. Gerasimuk²

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo region, Russia

² JSC "Sibirskii Tyazhpromelektroproekt", Novokuznetsk, Kemerovo region, Russia

Abstract. Electromechanical processes occurring when the load is lifted by an overhead crane are considered. The main idea of the work is to identify emergency mode (crane overload) by a method based on control of stator current of lift motor. To obtain stator current diagrams of electric motor, mathematical model of overhead crane (three-mass circuit) has been developed, which includes equations describing elastic properties of crane beams and its rope. A system of (α, β) coordinates, fixed relative to electric motor stator, is adopted to describe the drive asynchronous motor. Lifting cycle is considered as sequence of three steps: choice of the rope "slack"; rope tension; separation of cargo lifting. For each stage, a system of differential equations has been compiled describing motion of masses of overhead crane elements and electrical parameters of electric motor. Initial and boundary conditions for each of the stages were determined. Preliminary transformations of the system of equations to their solution by numerical methods and subsequent modeling of stages of lifting loads were carried out for different weights. Sequential solution of three boundary value problems allows obtaining values of stator currents at time of load separation. Diagrams of stator phase currents of an electric motor were obtained for loads of different mass. Simulation results indicate the presence of fixable difference in magnitudes of stator currents after the load is separated from the support surface. On basis of the developed model and the study results, a functional diagram of crane overload protection device is proposed and its principle of operation is described. It consists in controlling lifted load mass and stator current when lifting the load. Conclusion is made about feasibility and effectiveness of monitoring electrical values of lifting motor for development of overhead crane protection against overloads. Effectiveness of the proposed system was evaluated.

Keywords: stator current, electric motor, protection, crane, modeling, overloads.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-8-646-651

REFERENCES

1. Prokof'ev B.I., Popov M.Yu. *Bezopasnaya ekspluatatsiya kranovykh sooruzhenii: Uchebnoe posobie* [Safe operation of crane units: Manual]. Tomsk: izd. Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta, 2014. 160 p. (In Russ.).
2. Ehib M. *Dynamics and Control of Cranes: A Review*. Department of Engineering Science and Mechanics, MC 0219, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2001. 46 p.
3. Platonov G.G., Kudryavtsev A.V., Sologubov S.N. *Ustroystvo dlya izmereniya i ogranicheniya gruzopod'emnosti lebedki* [Device for measuring and limiting winch loading capacity]. Patent RF no. 2144901. *Bulleten' izobretenii*. 2000, no. 3. (In Russ.).
4. Potapov V.A., Timin Yu.F., Kornikov M.V. *Tenzometricheskaya os' dlya izmereniya nagruzki na kryuke gruzopod'emnogo kрана* [Tensometric axis for measuring the load on the hook of a lifting crane]. Patent RF no. 2464220. *Bulleten' izobretenii*. 2012, no. 29. (In Russ.).
5. Korovin V.A., Korovin K.V. *Ogranichitel' nagruzki mostovogo kрана* [Load limiter of overhead crane]. Patent RF no. 2483016. *Bulleten' izobretenii*. 2013, no. 15. (In Russ.).
6. Kadyrov Kh.M. *Ustroystvo dlya opredeleniya vesa gruzа mostovogo kрана* [A device for determining weight of the load of overhead crane]. Patent RF no. 2381984. *Bulleten' izobretenii*. 2010, no. 5. (In Russ.).
7. Safin N.R., Prakh V.A., Dmitrievskii V.A. Diagnostics of malfunctions of fan installations using spectral analysis of stator currents. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*. 2016, no. 4, pp. 37–42. (In Russ.).
8. Savel'ev A.N., Kipervasser M.V., Anikanov D.S. The assessment of power changes in motor parameters in case of emergencies in the mechanical part of belt conveyor. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 12, pp. 906–911. (In Russ.).
9. Kazak S.A. *Dinamika mostovykh kранov* [Dynamics of overhead cranes]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1968. 332 p. (In Russ.).
10. Sipailov G.A., Kononenko E.V., Khor'kov K.A. *Elektricheskie mashiny (spetsial'nyi kurs)* [Electric machines (special course)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1987. 287 p. (In Russ.).
11. Alan L. Sheldrake. *Handbook of Electrical Engineering: For Practitioners in the Oil, Gas and Petrochemical Industry*. John Wiley & Sons Ltd, 2003. 631 p.
12. Savel'ev A.N., Kipervasser M.V., Anikanov D.S., Remorov V.E. On the use of the method of monitoring the condition of machinery technological units by the energy parameters of the drive. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 12, pp. 31–33. (In Russ.).
13. Ansari A., Deshpande D. Mathematical model of asynchronous machine in MATLAB Simulink. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2010, vol. 2, no. 5, pp. 1260–1267.
14. Arya M.K., Wadhvani S. Transient analysis of three phase squirrel cage induction machine using MATLAB. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. 2009, vol. 1, no. 3, pp. 918–922.
15. William F. Trench. *Elementary differential equations*. Department of Mathematics Trinity University San Antonio, Texas, USA, 2017. 663 p.
16. David J. Logan. *First course in differential equations for scientists and engineers*. Springer-Verlag, 2015. 380 p.
17. Jeffrey R. Chasnov. *Introduction to Differential Equations*. The Hong Kong University of Science and Technology, 2016. 147 p.
18. Zhengyan Zhang D. Chen, Min Feng. Dynamics model and dynamic simulation of overhead crane load swing systems based on the ADAMS. In: *9th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design*, Kunming, 2008, pp. 484–487.
19. Mark S. Gockenbach. *MATLAB Tutorial to accompany Partial Differential Equations: Analytical and Numerical Methods*. 2nd edition. SIAM, 2010. 136 p.
20. Howard P. *Solving ODE in MATLAB*. Fall, 2007, 22 p.

Information about the authors:

V.V. Varlamov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Chair of Applied Mathematics and Informatics (vadin.varlamov@mail.ru)
M.V. Kipervasser, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Electrical Engineering, Electric Drive and Industrial Electronics (kipervasser2012@ya.ru)
A.V. Gerasimuk, Leading Specialist of the Department of Power Supply (heavymetd17200@gmail.com)

Received February 19, 2019
Revised April 4, 2019
Accepted May 29, 2019

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., главный редактор

Протопопов Е.В., заместитель главного редактора

Ивани Е.А., заместитель главного редактора

Бащенко Л.П., заместитель ответственного секретаря

Потапова Е.Ю., заместитель главного редактора по развитию

Олендаренко Н.П., ведущий редактор

Запольская Е.М., ведущий редактор

Расенец В.В., верстка, иллюстрации

Кузнецов А.А., системный администратор

Острогорская Г.Ю., менеджер по работе с клиентами

Подписано в печать 25.08.2019. Формат 60×90 1/4. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,75. Заказ 9848. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.
Тел./факс: (499) 236-76-17, 236-76-35