

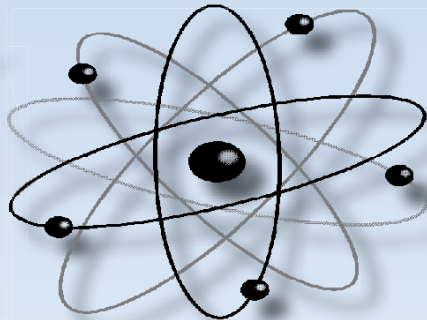
ISSN 2076-4359

Учёные записки

№ V-1 (45)

2020

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.
Редакция не возвращает рукописи авторам.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых периодических изданий ВАК РФ

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций России. Свидетельство ПИ № ФС7738212 от 30.11.2009.

ISSN 2076-4359 = Učēnye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, присылайте свои материалы на адрес электронной почты: journal@knastu.ru

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учёные записки КНАГТУ», находящейся на сайте <http://www.knastu.ru>

Материалы, оформленные с нарушением данных правил, к рассмотрению не принимаются.

Адрес учредителя и издателя:
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 27
Телефон для справок:
+7 (4217) 24-13-48

Адрес редакции: 681013,
г. Комсомольск-на-Амуре,
ул. Комсомольская, д. 50, ауд.508
Телефон для справок:
+7 (4217) 24-13-48

Индекс журнала
в каталоге Роспечать: 66090.
Цена свободная.
© Все права на опубликованные материалы принадлежат учредителю журнала – ФГБОУ ВО

Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Журнал основан в 2010 году

Редакционная коллегия:

Главный редактор журнала:	Алексей Иванович Евстигнеев , д-р техн. наук, проф.
Заместитель главного редактора, ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике»:	Сергей Николаевич Иванов , д-р техн. наук, доц.
Заместитель главного редактора, ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:	Галина Алексеевна Шушарина , канд. филол. наук, доц.
Технический редактор:	Татьяна Николаевна Карпова
Дизайн и верстка:	Приходченко Оксана Вадимовна , канд. техн. наук
Менеджер информационных ресурсов:	Андреанов Иван Константинович , канд. техн. наук

Серия: «Науки о природе и технике»

Отделы:

1. Авиационная и ракетно-космическая техника (**Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф.);
2. Энергетика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф.);
3. Управление, вычислительная техника и информатика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф., **Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф., **Сергей Николаевич Иванов**, д-р техн. наук, доц., **Николай Алексеевич Тарануха**, д-р техн. наук, проф., **Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
4. Математика и механика (**Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
5. Машиностроение (**Михаил Юрьевич Сариллов**, д-р техн. наук, доц., **Борис Николаевич Марьин**, д-р техн. наук, проф., **Борис Яковлевич Мокрицкий**, д-р техн. наук, доц., **Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф., **Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
6. Металлургия и металловедение (**Владимир Алексеевич Ким**, д-р техн. наук, проф., **Олег Викторович Башков**, д-р техн. наук, доц.);
7. Флот и кораблестроение (**Николай Алексеевич Тарануха**, д-р техн. наук, проф., **Виктор Михалович Козин**, д-р техн. наук, проф.);
8. Науки о земле и безопасности жизнедеятельности человека (**Ирина Павловна Степанова**, д-р техн. наук, проф.);
9. Строительство и архитектура (**Николай Петрович Крадин**, д-р архитектуры, проф., член-корреспондент РААСН, **Олег Евгеньевич Сысоев**, д-р техн. наук, доц.).

Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Отделы:

1. Философия, социология и культурология (**Татьяна Алексеевна Чабанюк**, д-р культурологии, проф., **Виктория Юрьевна Прокофьева**, д-р филол. наук, проф., **Вера Ивановна Юдина**, д-р культурологии, доц., **Надежда Юрьевна Костюрина**, д-р культурологии, доц., **Илья Игоревич Докучаев**, д-р филос. наук, проф., **Александр Георгиевич Никитин**, д-р филос. наук, проф.);
2. Филология и искусствознание (**Олег Александрович Бузуев**, д-р филос. наук, проф.);
3. Психология и педагогика (**Татьяна Евгеньевна Наливайко**, д-р пед. наук, проф.);
4. Политология и право (**Владимир Александрович Смоляков**, д-р полит. наук);
5. История (**Жанна Валерьяновна Петрунина**, д-р ист. наук, проф.);
6. Экономика (**Геннадий Иванович Усанов**, д-р экон. наук, проф., **Елена Витальевна Кизиль**, д-р экон. наук, доц.).

Периодичность: два раза в квартал (один номер каждой серии в квартал)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

«УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

СЕРИЯ: «НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ»

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ ШПОРТ, доктор технических наук

ЦУЙ СЮЙ, профессор Шеньянского аэрокосмического университета (КНР)

ЭНЕРГЕТИКА

АЛЕКСАНДР ЛООС, доктор философии, профессор Академии Грюндига в Нюрнберге (Германия)

ИШТВАН ВАЙДА, доктор технических наук, профессор, директор Института автоматизации Будапештского университета технологий и экономики (Венгрия)

ШАНДОР ХАЛАС, доктор технических наук, профессор Будапештского университета технологий и экономики (Венгрия)

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ КУЛЬНИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, директор Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН

ТАКАО ИТО, доктор технических наук, профессор факультета бизнес-управления Университета Мияки (Япония)

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

НИКИТА ФЁДОРОВИЧ МОРОЗОВ, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории упругости Санкт-Петербургского государственного университета

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ ЛЕВИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом математического моделирования, механики и мониторинга природных процессов Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН

БОРИС ДМИТРИЕВИЧ АННИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом механики деформируемого твёрдого тела Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭДУАРД СТЕПАНОВИЧ ГОРКУНОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института машиноведения УрО РАН

АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ ХОЛЬКИН, академик РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова

СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ГРИГОРЬЕВ, доктор технических наук, профессор, ректор Московского государственного технологического университета «Станкин»

МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ КАБЛОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Всероссийского института авиационных материалов

КОНСТАНТИН ВСЕВОЛОДОВИЧ ГРИГОРОВИЧ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией диагностики материалов Института металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

ЛЕОНИД АНАТОЛЬЕВИЧ НАУМОВ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем морских технологий ДВО РАН

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ КИСЕЛЕВ, академик РАСХН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник Дальневосточного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института сельского хозяйства РАСХН

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

ШИ ТИЕМАО, доктор философии, профессор, проректор Шеньянского архитектурно-строительного университета (КНР)

СЕРИЯ: «НАУКИ О ЧЕЛОВЕКЕ, ОБЩЕСТВЕ И КУЛЬТУРЕ»

ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ

ДАВИД ИЗРАИЛЕВИЧ ДУБРОВСКИЙ, доктор философских наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института философии РАН

КИРИЛЛ ЭМИЛЬЕВИЧ РАЗЛОГОВ, доктор искусствоведения, профессор, президент АНО «Новый институт культурологии»

ФИЛОЛОГИЯ И ИСКУССТВОВЕДЕНИЕ

СВЕТЛАНА ГРИГОРЬЕВНА ТЕР-МИНАСОВА, доктор филологических наук, профессор, президент факультета иностранных языков и регионоведения Московского государственного университета

ВАН ЦЗИНЬЛИН, доктор философии, профессор, директор Института международного образования Чанчуньского университета (КНР)

ПСИХОЛОГИЯ И ПЕДАГОГИКА

ЕКАТЕРИНА ИОСИФОВНА АРТАМОНОВА, доктор педагогических наук, профессор кафедры педагогики высшей школы Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

ПОЛИТОЛОГИЯ И ПРАВО

НИКОЛАЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ МЕРЕЦКИЙ, доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой уголовно-правовых дисциплин Дальневосточного государственного университета путей сообщения

ИСТОРИЯ

АЛЕКСАНДР МАНУЭЛЬЕВИЧ РОДРИГЕС-ФЕРНАНДЕС, доктор исторических наук, профессор, заведующий кафедрой новой и новейшей истории Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

ЭКОНОМИКА

АЛЕКСАНДР ЕВСТРАТЬЕВИЧ ЗУБАРЕВ, доктор экономических наук, профессор, первый проректор по стратегическому развитию и международному сотрудничеству Тихоокеанского государственного университета

Шаломов В. И.
V. I. Shalomov

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОВЫШЕННЫХ ДОКРИТИЧЕСКИХ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАРА ДЛЯ ТЕПЛОФИКАЦИОННОГО ЭНЕРГБЛОКА МОЩНОСТЬЮ 200-250 МВт

EFFICIENCY ESTIMATION OF APPLICATION OF STEAM INCREASED PRECRITICAL INITIAL PARAMETERS FOR A HEATING POWER UNIT WITH A CAPACITY OF 200-250 MW

Шаломов Вячеслав Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: shalomov2012@yandex.ru.

Mr. Vyacheslav I. Shalomov – PhD in Engineering, Associate Professor, Thermal Power Plants Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: shalomov2012@yandex.ru.

Аннотация. В работе представлены результаты численного исследования эффективности теплофикационного энергоблока на базе турбоустановки Т-180/210-130 с промежуточным перегревом при работе на повышенных докритических начальных параметрах пара. Показана возможность получения новой турбины с увеличенной мощностью и повышенными технико-экономическими показателями.

Summary. The paper presents the results of a numerical study of the efficiency of a thermal power unit based on a T-180/210-130 turbine unit with intermediate overheating when operating at elevated subcritical initial parameters of steam. The possibility of obtaining a new turbine with increased capacity and increased technical and economic indicators is shown.

Ключевые слова: теплофикационный энергоблок, докритические повышенные начальные параметры пара, численные исследования, блок-схема расчёта, мощность турбины, тепловая нагрузка, технико-экономические показатели.

Key words: heating power unit, subcritical increased initial parameters of steam, numerical studies, flowchart of calculation, turbine power, thermal load, technical and economic indicators.

УДК 621.311

Целесообразность использования повышенных докритических начальных параметров пара подтверждается опытом зарубежных стран, а также длительной эксплуатацией оборудования Черепетской ГРЭС в Тульской области России [1]. Первая очередь этой электростанции в составе четырёх энергоблоков мощностью по 150 МВт каждый с паровыми котлами на давление 170 ата и температуру 550 °С была введена в эксплуатацию с 1953 по 1966 год.

Ленинградский металлический завод (ЛМЗ) последние годы поставляет в зарубежные страны паровые турбины с повышенными начальными параметрами пара, к примеру в Финляндию: теплофикационную турбину Т-140-145 ($p_0 = 14,2$ МПа) для ТЭС «Топпила»; конденсационные турбины К-200-181 ($p_0 = 17,7$ МПа) для ТЭС «Кристина» и «Тахколусто» и К-255-162 ($p_0 = 15,9$ МПа) для ТЭС «Алькахольма».

Для численных исследований эффективности применения повышенных докритических параметров свежего пара в качестве базового был выбран теплофикационный энергоблок с турбоустановкой Т-180/210-130 ЛМЗ. В АО «Дальневосточная генерирующая компания» филиале «Хабаровская генерация» действуют шесть энергоблоков с паровыми турбинами Т-180/210-130 ЛМЗ. Четыре энергоблока находятся в составе Хабаровской ТЭЦ-3 с установленной мощностью 720 МВт и два – в составе Комсомольской ТЭЦ-3 с установленной мощностью 360 МВт. Теплофикационные энергоблоки спроектированы на докритические начальные параметры (критические

параметры: $p_{кр} = 22,13$ МПа, $t_{кр} = 374,15$ °С) с промежуточным перегревом пара. ЛМЗ рассматривает турбину Т-180/210-130 как базовую модель семейства «Т-180» для дальнейшего развития.

Энергоблок Комсомольской ТЭЦ-3 включает в себя паровой котёл типа ТПГЕ-215 и паровую теплофикационную турбину Т-180/210-130 с электрогенератором типа ТГВ-200 МУЗ мощностью 200 МВт. Паровой котёл – однобарабанный, газоплотный с естественной циркуляцией, Т-образной компоновки. Паропроизводительность котла 670 т/ч. Основным топливом является природный газ Сахалинского месторождения.

Паровая турбина Т-180/210-130 представляет собой одновальный трёхцилиндровый агрегат с сопловым парораспределением с частотой вращения вала 3000 об/мин. В её состав входит три цилиндра – высокого, среднего и низкого давлений (ЦВД, ЦСД и ЦНД). ЦВД и ЦСД однопоточные. ЦНД двухпоточный. Проточная часть ЦВД состоит из 12 ступеней давления, из которых первая ступень регулирующая, одновенечная. Проточная часть ЦНД включает 11 ступеней давления. ЦНД имеет четыре ступени в каждом потоке: две ступени до нижнего теплофикационного отбора и две ступени (регулирующую и ступень давления) после него.

Технические данные турбины [2]: электрическая мощность: номинальная – 180 МВт, максимальная – 210 МВт, тепловая нагрузка – 260 Гкал/ч (302 МВт). Максимальная мощность турбоустановки (ТУ) достигается при её работе в конденсационном режиме. Номинальные параметры свежего пара перед стопорным клапаном: давление $p_0 = 12,75$ МПа, температура $t_0 = 540$ °С. Параметры пара после промперегрева: давление $p_{пп} = 2,49$ МПа, температура $t_{пп} = 540$ °С. Расход свежего пара: номинальный – 656 т/ч, максимальный – 670 т/ч. Температура питательной воды – 248 °С. Расчётная температура воды на входе в конденсатор 27 °С. Давление в конденсаторе – 8,6 кПа.

Свежий пар после первичного пароперегревателя котла через регулирующие органы турбины поступает в ЦВД. Параметры пара после ЦВД: температура 333 °С, избыточное давление 2,71 МПа. Промежуточный перегрев пара после ЦВД осуществляется в газовом пароперегревателе, встроенном в паровой котёл. Нагретый до начальной температуры (540 °С) пар поступает в ЦСД. Турбоустановка второго энергоблока Комсомольской ТЭЦ-3 (см. рис. 1) имеет 7 нерегулируемых отборов пара, предназначенных для подогрева питательной воды в 3 подогревателях низкого давления (ПНД), деаэраторе и 3 подогревателях высокого давления (ПВД). В тепловой схеме предусмотрены также два регулируемых теплофикационных отбора, предназначенных для ступенчатого подогрева сетевой воды в горизонтальных сетевых подогревателях низкого и высокого давлений. Тепловая схема 2-го энергоблока отличается ещё тем, что деаэратор является самостоятельной ступенью регенеративного подогрева питательной воды.

Он подключён к 4-му отбору турбины. Давление в этом отборе близко номинальному давлению в деаэраторе. При переходе на частичные паровые нагрузки турбины давление в 4-м отборе снижается. Если регулирующий клапан перед деаэратором открыт, то давление в нём синхронно уменьшается («скользит»). Отсутствие потерь энергии на дросселирование в регулирующем клапане приводит к повышению экономичности турбоустановки при работе на частичных режимах.

Результаты предварительного расчёта потерь мощности в регулирующем клапане деаэратора при его работе с постоянным давлением и в скользящем режиме представлены на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что в среднем потери мощности на дросселирование в регулирующем клапане при работе деаэратора с постоянным давлением составляют 0,08 %. А расчётное сравнение технико-экономических показателей свидетельствует, что удельный расход теплоты на выработку электроэнергии при скользящем давлении в деаэраторе будет меньше в среднем на 0,06 %.

В соответствии с целью работы предполагалось выполнить вариативные расчёты тепловой схемы ТУ при её работе в теплофикационном и конденсационном режимах (Т-режиме и К-режиме). В основу исследования положен метод расчёта тепловых и материальных балансов [3]. Для данного исследования методика расчёта и компьютерная программа, построенная на базе сопряжённых программных продуктов Mathcad и XStiem, были адаптированы под цель работы и тепловую схему турбины Т-180/210-130. Блок-схема алгоритма расчёта приведена на рис. 3.

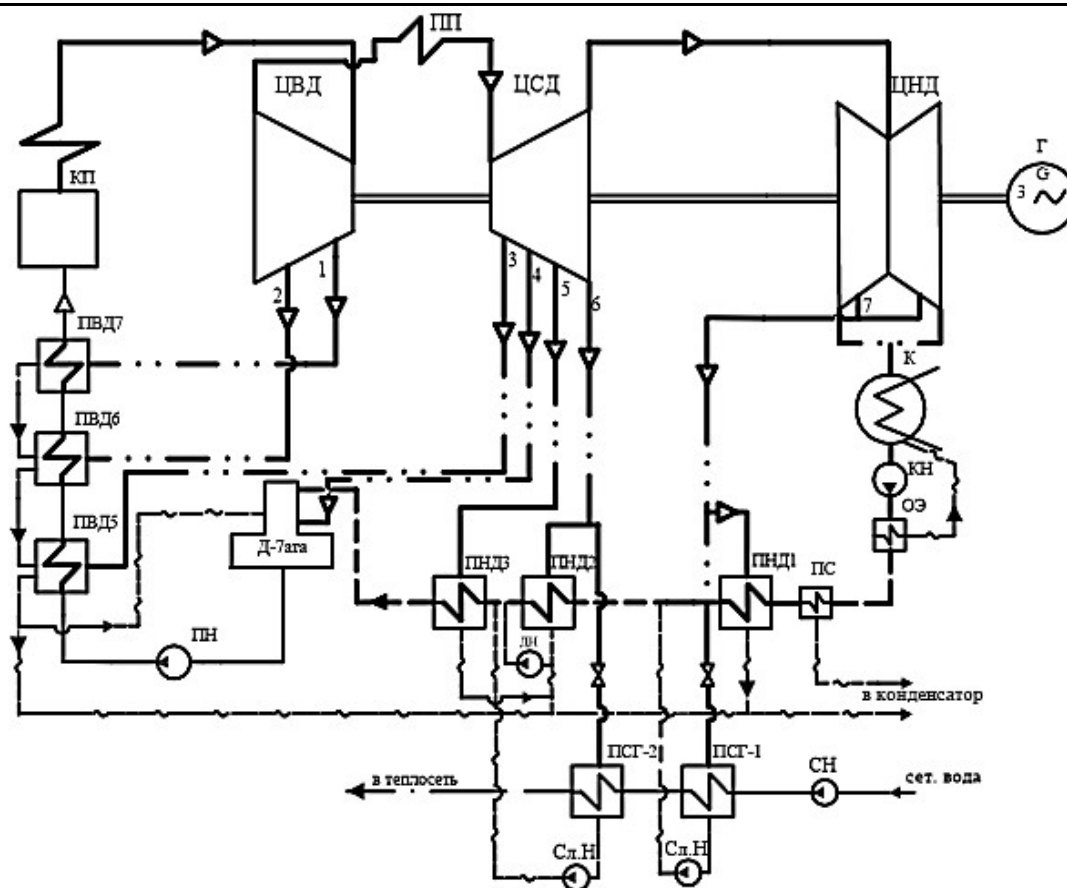


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема турбины Т-180/210-130: КП – котёл паровой; ЦВД, ЦСД, ЦНД – цилиндры высокого, среднего и низкого давления; ПП – промежуточный пароперегреватель; Г – генератор; К – конденсатор; КН – конденсатный насос; ОЭ – охладитель эжектора; ПС – подогреватель сальниковый; ПНД – подогреватель низкого давления; ПВД – подогреватель высокого давления; Д – деаэратор; ПН – питательный насос; ПСГ – подогреватель сетевой горизонтальный; СН – сетевой насос; ДН – дренажный насос; Сл.Н – сливной насос

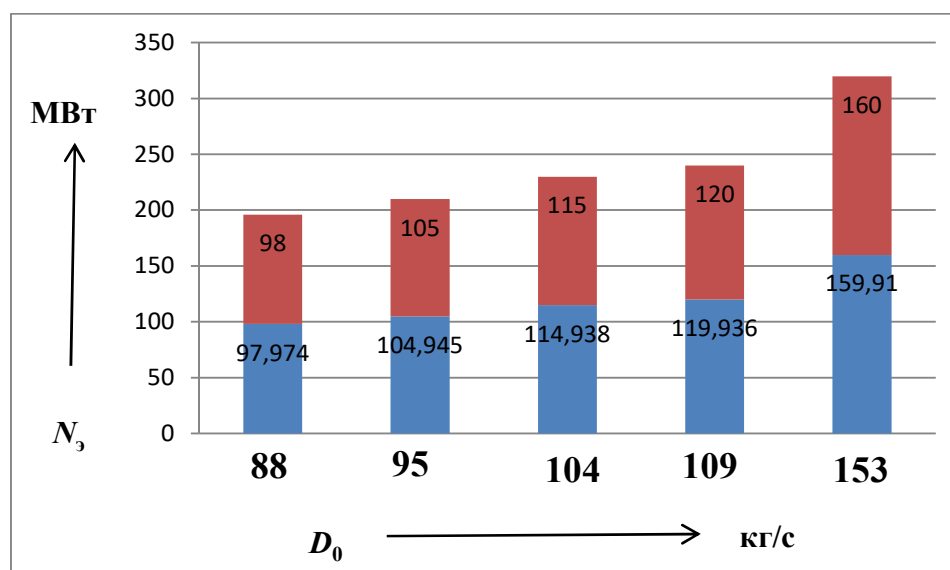


Рис. 2. График изменения мощности ТУ в зависимости от расхода пара в турбину

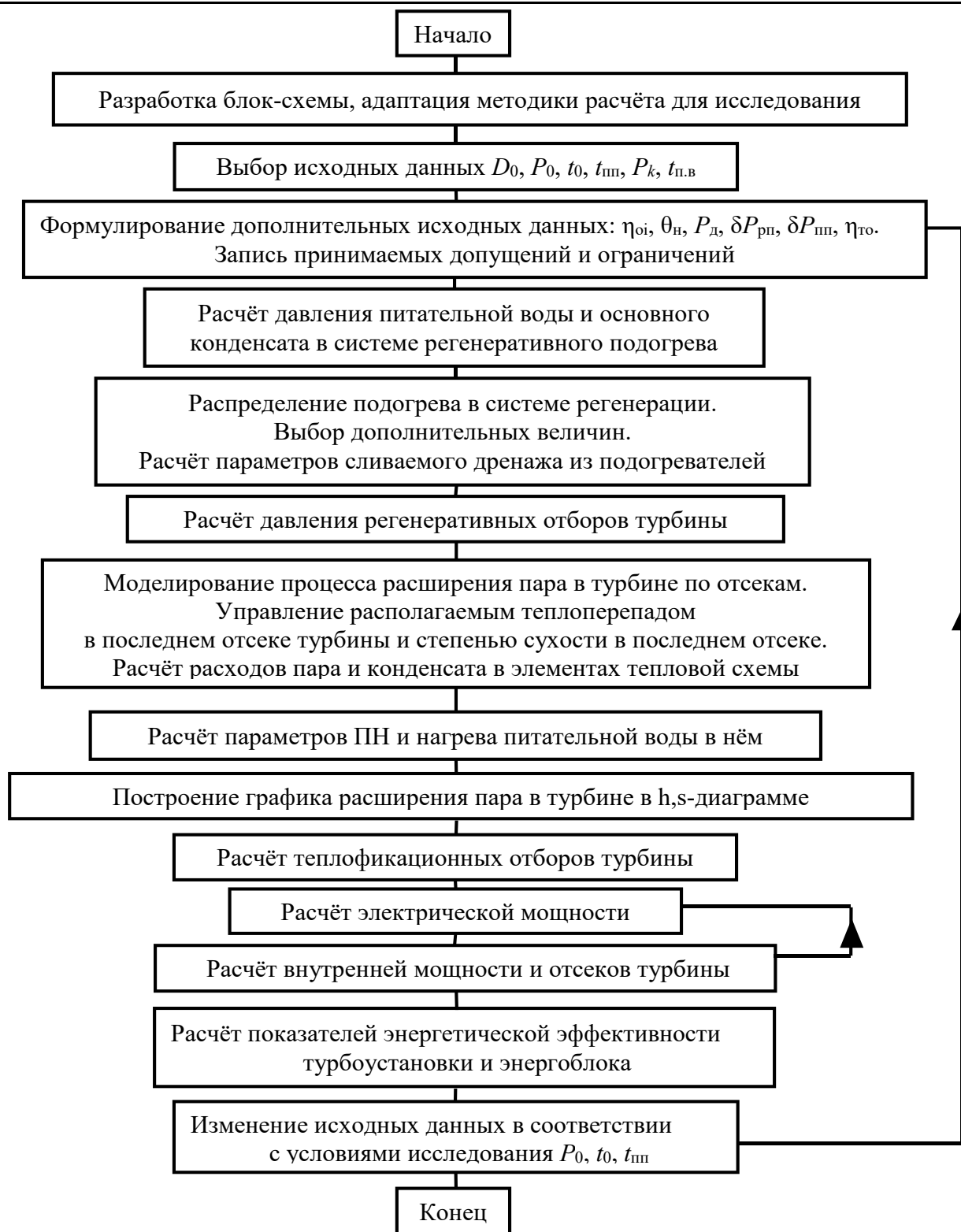


Рис. 3. Блок-схема расчёта тепловой схемы турбоустановки

Особенность данного расчётного алгоритма тепловой схемы заключается в том, что основной исходной величиной является не мощность ТУ, а расход пара в турбину. А мощность является определяемым параметром. При расчёте тепловой схемы ТУ в К-режиме пропускается блок расчёта теплофикационных отборов.



Мощность турбины N_T , кВт, без учёта регенеративных отборов определяется по выражению

$$N_T = D_0 \cdot H_0 \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m, \quad (1)$$

где D_0 – расход пара в турбину, кг/с; H_0 – теоретический теплоперепад в турбине, кДж/кг; η_{oi} – внутренний относительный КПД турбины; η_m – механический КПД турбины.

Из уравнения (1) следует, что мощность турбины можно увеличивать повышением и расхода пара, и теплоперепада, и КПД турбины. В то же время надо учитывать, что внутренний относительный КПД турбины будет повышаться при росте как расхода пара, так и теплоперепада. Повышение расхода пара обязательно повлечёт за собой увеличение размеров проточной части турбины. В работе оцениваются возможные уровни мощности ТУ и её технико-экономические показатели, достигаемые повышением использованного теплоперепада.

Расчёты технико-экономических показателей ТУ выполнены для параметров пара: начального давления в диапазоне от 130 кгс/см² (12,74 МПа) до 190 кгс/см² (18,64 МПа), температуры – от 540/540 до 600/600 °С. Расход свежего пара и давление в конденсаторе имеют номинальные значения и сохраняются постоянными при всех вариантах расчёта. Исходная тепловая нагрузка принята 277 160 кВт. Она обеспечивается двухступенчатым подогревом сетевой воды последовательно в ПСГ-1 и ПСГ-2 при температурах сетевой воды: обратной $t_{oc} = 51$ °С, прямой $t_{pc} = 107$ °С и расходе сетевой воды 1800 кг/с. Для расчётных исследований выбраны семь вариантов параметров пара турбоустановки (см. табл. 1).

Таблица 1

Варианты параметров пара для расчётных исследований

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7
Параметры пара: $p_0, t_0/t_{пп}$	12,74; 540/540	13,72; 550/550	14,7; 560/560	15,68; 570/570	16,66; 580/580	17,64; 590/590	18,64; 600/600
Температура питательной воды $t_{пв}, ^\circ\text{C}$	248	251	253	256	258	261	262

Повышение давления за котлом сопровождается увеличением температуры питательной воды. Это связано с ростом давления насыщения в барабане котлоагрегата. Оптимальная температура питательной воды определялась по формуле Д. П. Гохштейна [4] с учётом запаса в сторону увеличения для ПТУ с промежуточным перегревом. Действительная температура питательной воды с учётом рекомендаций [5] устанавливалась ниже оптимальной. Значения температуры питательной воды, соответствующие вариантам расчёта, приведены в табл. 1. Внутренний относительный КПД цилиндров принят: для ЦВД и ЦСД – 0,88; для ЦНД – 0,87. В ходе расчётов тепловой схемы они оставались постоянными. Кроме того, были приняты следующие величины [3]:

1. недогревы воды в регенеративных подогревателях: для ПВД – 2 °С; для ПНД – 4 °С;
 2. недогрев сетевой воды в сетевых подогревателях – 4,5 °С;
 3. потеря давления в трубопроводах греющего пара от турбины до регенеративных подогревателей – 8 %;
 4. потеря давления в регулирующих клапанах турбины – 5 %.
- КПД парового котла принят 92 %.

Ожидаемым результатом вариативных расчётов является повышение мощности энергоблока. График изменения мощности при работе турбины в теплофикационном и конденсационном режимах показан на рис. 4.

Из графика следует, что при повышении начального давления от 12,74 до 18,64 МПа и температуры пара от 540/540 до 600/600 °С электрическая мощность турбины N_e увеличивается в Т-режиме от 180 до 206 МВт, в К-режиме от 210 до 250 МВт. Рост электрической мощности объясняется повышением использованного теплоперепада в турбине при постоянном значении давле-

ния в конденсаторе. Заметим, что расход свежего пара в турбину оставался неизменным и близким номинальному значению 182 кг/с.

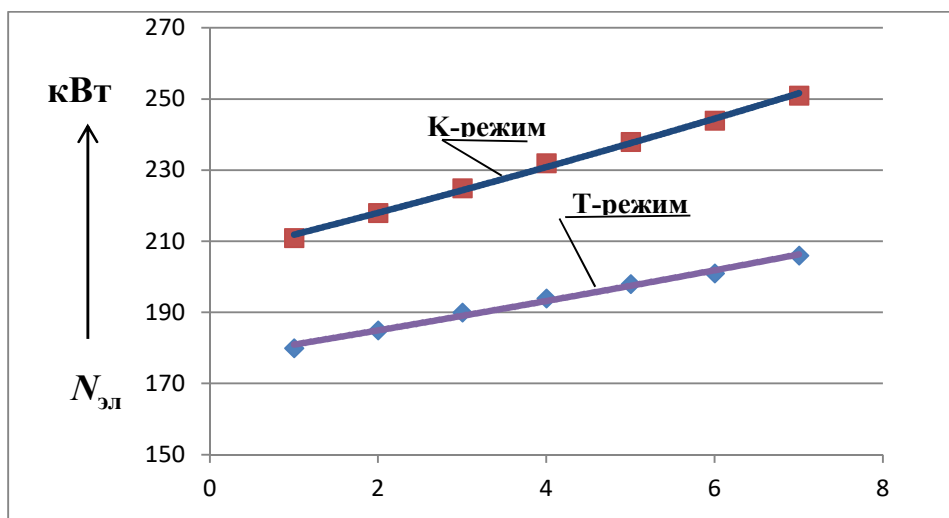


Рис. 4. График зависимости мощности для Т- и К-режимов

Поведение графиков на рис. 4 показывает, что темп роста мощности в К-режиме выше, чем в Т-режиме. Это связано с тем, что при работе ТУ в К-режиме расход пара в конденсатор уже не ограничивается необходимостью обеспечивать максимальную отопительную нагрузку турбины. В Т-режиме доля расхода пара в конденсатор в каждом из вариантов расчёта составляет примерно 4,3 % (7,7 кг/с).

Изменение температуры питательной воды наглядно представлено в форме графика на рис. 5.

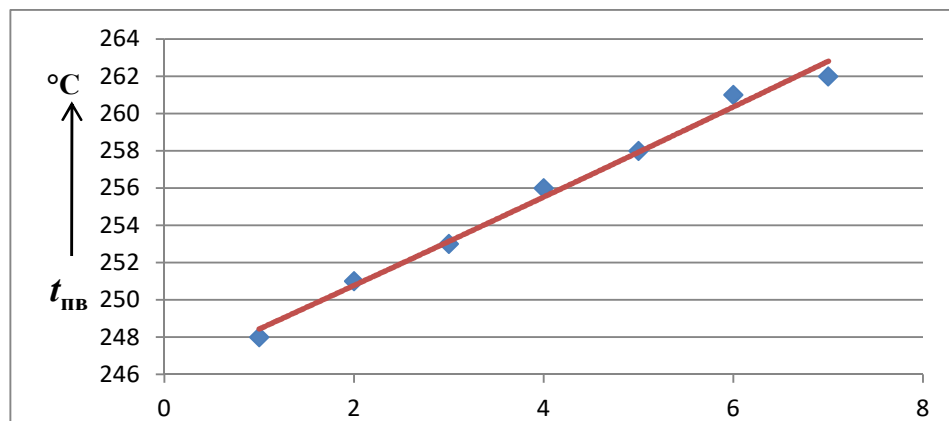


Рис. 5. График изменения температуры питательной воды

Видим, что характер функции $t_{пв} = f(p_0, t_0)$ практически линейный: температура питательной воды от варианта к варианту начальных параметров пара повышается в среднем на 2,5 °С. И только к 7-му варианту задаваемых параметров свежего пара темп роста температуры снижается до 1 °С. Рост электрической мощности и температуры питательной воды ведёт к заметному улучшению технико-экономических показателей ТУ, в частности удельный расход теплоты на выработку электроэнергии (графики на рис. 6) снижается в Т-режиме на 2,1 % и достигает 4473 кДж/(кВт·ч) и в К-режиме на 9 % и равен 7844 кДж/(кВт·ч). Удельный расход пара на выра-

ботку электроэнергии в К-режиме снижается с 3,1 до 2,62 кг/(кВт·ч), а КПД ТУ повышается с 0,417 до 0,459. При этом электрический КПД всего энергоблока составляет 41,4 %.

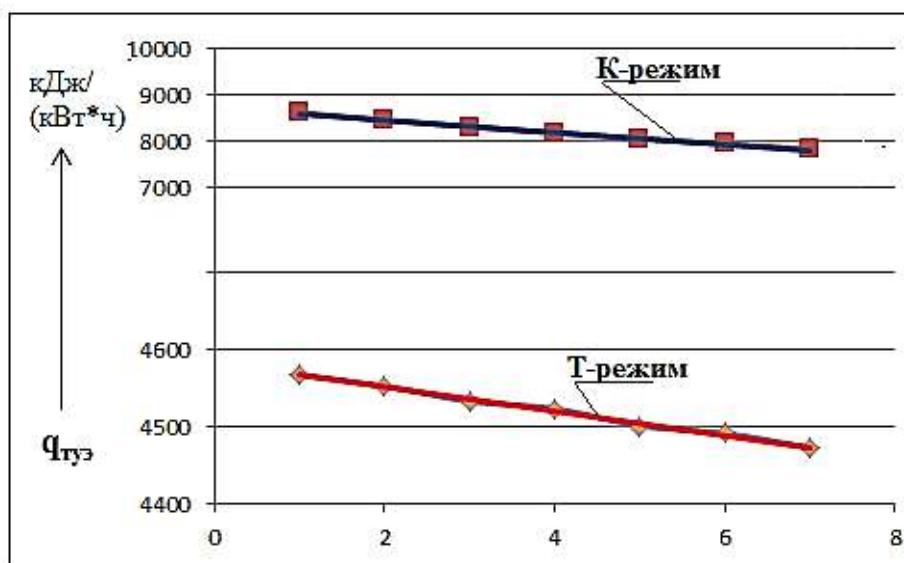


Рис. 6. График зависимости удельного расхода теплоты на выработку электроэнергии для Т- и К-режимов

Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии турбоустановкой уменьшается и становится равным 297 г/(кВт·ч) против 327 г/(кВт·ч) для исходного варианта расчёта тепловой схемы.

Расчёты энергетических и материальных балансов тепловой схемы проведены с относительной погрешностью около 0 %.

Результаты расчётных исследований показывают, что выход на установленный уровень повышенных докритических начальных параметров (в нашем случае 18,64 МПа, 600 °С) с промежуточным перегревом пара 600 °С приводит к заметному росту мощности и тепловой экономичности энергоблока ТЭЦ. На базе ТУ Т-180/210-130 мы получили энергоблок с новой теплофикационной турбиной с маркировкой Т-206/251-18,64. Мощность такой турбины для Т-режима 206 МВт, для К-режима 251 МВт с начальным давлением пара 18,64 МПа (190 кгс/см²). У новой ТУ ЛМЗ Т-200/210-130, установленной на Новосибирской ТЭЦ-5, мощность при работе в Т-режиме повышена до 200 МВт за счёт увеличения максимального расхода пара в турбину до 710 т/ч (у турбины Т-180/210-130 максимальный расход свежего пара 670 т/ч).

Однако при повышении начальных параметров пара расчётная тепловая нагрузка турбины Q_T снижается. Характер зависимости Q_T от параметров свежего пара представлен на рис. 7. График показывает, что уменьшение тепловой нагрузки составляет примерно 7 МВт. Для увеличения Q_T до исходного значения необходимо снижать начальные параметры пара, что противоречит конечной цели исследования.

Одним из эффективных способов повышения количества отпускаемой турбиной тепловой энергии является уплотнение регулирующих поворотных диафрагм в ЦНД. Ранее было отмечено, что ЦНД у турбины Т-180/210-130 двухпоточный. Поворотные диафрагмы установлены с двух сторон перед двумя последними ступенями. К настоящему времени этот способ апробирован на ряде теплофикационных турбин различных типов, в том числе Т-180/210-130 ЛМЗ и Т-185/220-130 ТМЗ [6].

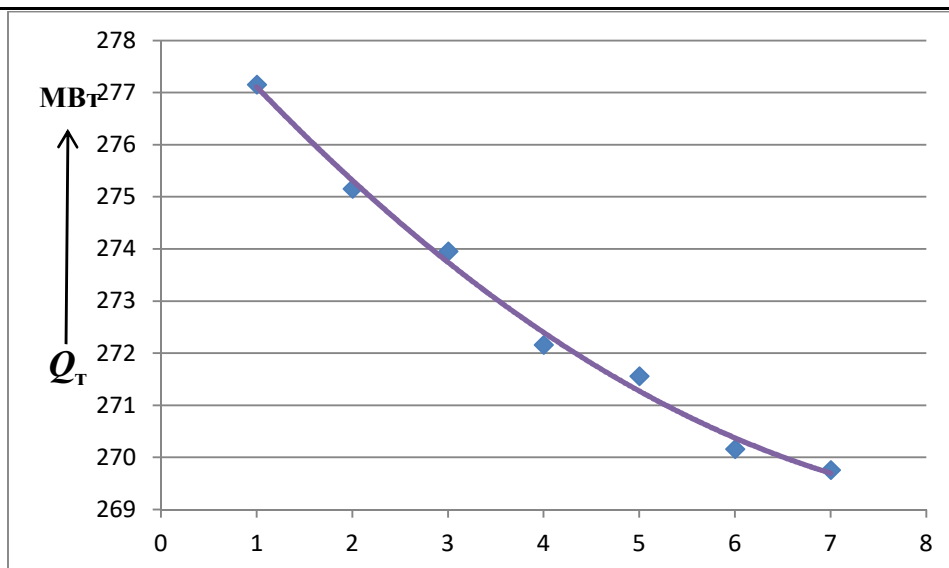


Рис. 7. График зависимости тепловой нагрузки Q_T от параметров свежего пара ТУ

Выводы

Численные исследования эффективности разрабатываемого теплофикационного энергоблока мощностью 200-250 МВт для расширения Комсомольской ТЭЦ-3 выполнены на базе турбоустановки Т-180/210-130.

По результатам расчётных исследований получен энергоблок с новой теплофикационной турбиной с промежуточным перегревом пара на повышенные докритические начальные параметры с маркировкой Т-204/251-18,64. У турбины мощность в теплофикационном режиме 204 МВт, в конденсационном режиме 251 МВт на параметры $p_0 = 18,64$ МПа, $t_0/t_{\text{мн}} = 600/600$ °С.

Турбоустановка отличается повышенными технико-экономическими показателями: удельный расход теплоты снизился в Т-режиме на 2,1 %, в К-режиме на 9 %; электрический КПД энергоблока близок к 41 %.

Определённое снижение отопительной нагрузки ТУ может быть компенсировано уплотнением регулирующих поворотных диафрагм в ЦНД.

В заключение нужно сказать, что в работе не рассматривались следующие направления совершенствования энергоблока:

1. создание паровых котлов повышенных параметров пара;
2. совершенствование тепловой схемы энергоблока;
3. модернизация проточной части турбины;
4. сокращение расходов энергии на собственные нужды энергоблока.

Перспективные технические решения по этим направлениям предлагаются и исследуются специалистами в области энергомашиностроения, проектирования и эксплуатации ТЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петреня, Ю. К. Роль НПО ЦКТИ в стратегии развития энергомашиностроения России / Ю. К. Петреня, П. А. Кругликов, Л. Н. Моисеева // Теплоэнергетика. – 2003. – № 2. – С. 4-8.
2. Инструкция по эксплуатации турбины Т-180/210-130 ИЭ-30-21-03-2017. – Комсомольск-на-Амуре, 2017. – 52 с.
3. Рыжкин, В. Я. Тепловые электрические станции / В. Я. Рыжкин. – М.: Энергия, 1976. – 442 с.
4. Аксельбандт, А. М. Судовые энергетические установки / А. М. Аксельбандт. – Л.: «Судостроение», 1970. – 472 с.
5. Семёнов, А. С. Тепловой расчёт паровой турбины / А. С. Семёнов, А. М. Шевченко. – Киев: Высша школа, 1975. – 208 с.
6. Повышение экономичности теплофикационных турбин с двухпоточными ЦНД / Л. Л. Симою, В. Ф. Гуторов, Е. И. Эфрос, Г. Д. Баринберг и др. // Теплоэнергетика. – 2000. – № 11. – С. 14-17.



Лысов Н. А., Янченко А. В.
N. A. Lysov, A. V. Yanchenko

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ СЖАТОГО ВОЗДУХА
С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ В НЕБОЛЬШИХ
ОБЪЁМАХ**

**EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE
WITH THE FOLLOWING TRANSFORMATION INTO ELECTRICITY IN SMALL VOLUMES**

Лысов Николай Андреевич – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: lysov.98@mail.ru.

Mr. Nikolay A. Lysov – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave. 27. E-mail: lysov.98@mail.ru.

Янченко Андрей Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: ayanchenko@mail.ru.

Mr. Andrey V. Yanchenko – PhD in Engineering, Associate Professor, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave. 27. E-mail: ayanchenko@mail.ru.

Аннотация. В данной статье рассмотрены особенности использования аккумуляторов сжатого воздуха и последующее преобразование энергии сжатого воздуха в электрическую. Результат поверхностного подсчёта показал, что использование аккумулятора сжатого воздуха невыгодно ввиду больших затрат и низкой эффективности всей системы. Помимо этого, для аккумулятирования воздуха в достаточных объёмах необходимо либо иметь большой герметичный резервуар, либо запастись сжатым воздухом сильно высоким давлением используя дорогое оборудование.

Summary. This article describes features of using compressed air and the subsequent conversion of energy of compressed air into electrical energy. It is shown that the use of compressed air does not require large expenditures and low efficiency of the entire system. In addition, in order to accumulate air in sufficient volumes, it is necessary either to have a large sealed reservoir, or to store compressed air at a very high pressure using expensive equipment.

Ключевые слова: аккумулятирование энергии, сжатый воздух, автономная электроэнергия, неисчерпаемые ресурсы.

Key words: energy storage, compressed air, autonomous electric power, inexhaustible resources.

УДК 621.8.033:621.31

Самым основополагающим и необходимым ресурсом современного века является электричество. Работа всех современных устройств завязана на использовании электроэнергии в том или ином виде. Электричество используется абсолютно в каждом аспекте нашей жизни: бытовой технике, освещении, вентиляторах, насосах, промышленном оборудовании и т.д. Каждый гражданин и каждое юридическое лицо должны оплачивать услуги энергоснабжения за объём энергии, который они использовали. Соответственно, огромное количество организаций заботятся об экономии электроэнергии. Во-первых, это экономически выгодно, поскольку организация всегда несёт большие расходы на электроэнергию. Во-вторых, это приводит к улучшению экологических показателей, т.к. большая часть энергии вырабатывается путём сжигания ресурсов [1].

К вопросу экономии электроэнергии можно подходить с двух позиций: 1) снижение объёма используемой энергии путём смены техники на более новую с большим КПД или 2) снижение цены на электроэнергию путём подбора оптимального поставщика электроэнергии или использо-

вания ночного тарифа [2]. Так, взяв за пример цены на электроэнергию для жителей Москвы на 2020 год, можно увидеть, что цена дневной зоны (7:00...23:00) составляет 6,29 р., а ночной зоны (23:00...7:00) – 2,13 р.[3]. Таким образом, ночью выгоднее использовать электроэнергию в 2,95 раза. Несмотря на очевидное снижение затрат на электроэнергию почти в 3 раза ни одно предприятие не будет переводить свою работу на ночной режим. Возможным решением данной ситуации является система аккумулирования электроэнергии в ночное время суток с последующей реализацией её обратно в сеть в дневное время.

Если говорить про аккумуляцию электроэнергии, то большинство представит себе распространённые электрохимические способы запаса энергии, на основе которых сделаны батареи в телефонах или аккумуляторы в автомобилях, но есть и другие способы резервации энергии. В табл. 1 представлены важнейшие характеристики основных аккумуляторов – преобразователей энергии [4].

Таблица 1

Плотность аккумулируемой энергии в различных устройствах и материалах
(вес мотора и генератора, вес баллонов и двигателей не учтён)

Устройство аккумулирования (материал)	Плотность энергии, кВт·ч/кг, без учёта КПД и массы дви- гателя	КПД, %	Плотность энергии, кВт·ч/кг, с учё- том КПД
Водород (водородный двигатель)	38,8	50...60	20,0...23,0
Бензин (бензиновый двигатель)	13,0...14,0	25...30	3,25...4,2
Свинцово-кислотный аккумулятор	0,025...0,04	96...98	0,02...0,039
Никель-кадмиевые аккумуляторы	0,045...0,065	96...98	0,043...0,064
Литий-ионные аккумуляторы	0,110...0,250	96...98	0,105...0,245
Гидроёмкость	0,0003	64	0,002
Стальной маховик	0,05	96...98	0,049
Маховик из углеродного волокна	0,215...0,5	96...98	0,21...0,49
Маховик из кварцевого стекла	0,9	96...98	0,88
Кольцевой маховик	1,4...4,17	96...98	1,36...4,0
Сжатый воздух (пневмоаккумулятор)	2 (на 1 м ³)	30...40	0,6...0,8

Анализируя приведённые в табл. 1 данные, можно наблюдать, что наибольшую плотность энергии содержат исчерпаемые углеводородные ресурсы, используемые в двигателях внутреннего сгорания, а также водород, который нужно специально масштабно производить и запасать. Если говорить про свинцово-кислотные и никель-кадмиевые аккумуляторы, то несмотря на высокий КПД таких систем у них очень маленькая энергоёмкость вкпе с ограниченным числом циклов разрядки-зарядки (около 500). Литиевые же аккумуляторы очень дороги и не подходят для подобной цели.

Технологию запасаания электроэнергии с помощью кинетической энергии вращения маховика запатентовал Н. В. Гулиа ещё в 1964 году. Супермаховики имеют умеренную цену, превосходную долговечность и полную безопасность для экологии, но используют их только в качестве компенсации пиков электропотребления в сети, поскольку долго хранить энергию маховики не способны [5].

Для преобразования электроэнергии в потенциальную гидравлическую энергию необходимо иметь огромные объёмы резервуаров и бассейнов, поскольку у воды очень малая энергоёмкость. Постройка плотин и водных резервуаров – очень дорогое мероприятие, поэтому этот метод мы также оставляем без внимания. Использование энергии сжатого воздуха в сравнении с ранее обозримыми способами аккумулирования энергии имеет ряд достоинств. Воздух – экологически чистый, общедоступный, восполняемый и взрывобезопасный ресурс. Воздух легко транспортиро-

вать, запасать и использовать. Сжатый воздух может работать в широком диапазоне температур (отрицательных и положительных), при любых вибрациях, в химически агрессивной среде, при электромагнитных и радиационных помехах [6]. Для хранения сжатого воздуха часто используются подходящие горные выработки или специально создаваемые подземные ёмкости в соляных породах, что экономически выгодно для запаса воздуха в больших объёмах. Поэтому аккумулирование энергии с помощью сжатого воздуха является наиболее надёжным и выгодным способом, чем все рассмотренные выше способы.

Первые системы пневмо-воздушного аккумулирования (ПВА) были запатентованы в 1949 году, а первая воздушно-аккумулирующая газотурбинная электростанция была построена в городе Гунторф (ФРГ) в 1978 году. Электростанция мощностью 290 МВт накапливала сжатый воздух под давлением 6 МПа в подземных каменных пластах на глубине до 800 м в часы малой нагрузки электросети и использовала этот объём для выработки электроэнергии в период пиковой нагрузки. При объёме хранилища в 300 тыс. м³ обеспечивалась эффективная работа газотурбинной установки в течение 2 ч [7].

Рассмотрим пример расчёта системы ПВА. Пусть имеется офисное помещение на 50 сотрудников. Согласно нормам СанПин, минимальная площадь рабочего места сотрудника, использующего ПЭВМ с плоским дискретным экраном, 4,5 м² [8]. Согласно статистическим данным, в Канаде на офисы приходится около 350 кВт·ч/м² [9]. Принимаем это с условием, что потребление электроэнергии в России и Канаде достаточно схожи. Предположим, что на дневное время 7:00...21:00 (14 ч) приходится 80 % суточного энергопотребления, а остальные 20 % приходятся на ночное время 21:00...7:00. Таким образом в течении года предприятие использует днём

$$50 \cdot 4,5 \cdot 350 \cdot 0,8 = 49 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч}.$$

Допустим, что весь год в период 7:00...21:00 (14 часов) нагрузка распределена равномерно, тогда средняя потребляемая мощность в час на период всего рабочего дня будет

$$P_{\text{сред.пот.}} = \frac{49 \cdot 1000}{365 \cdot 14} = 9,589 \text{ кВт}.$$

Важнейшим параметром при подборе генератора является его КПД, при этом генератор подбирается так, чтобы его номинальная мощность была достаточно близка к требуемой. Совершив краткий обзор генераторов из открытых источников, в качестве примера выберем трёхфазный синхронный генератор фирмы Leroy-Somer LSA 40 VS2 со следующими характеристиками: номинальная мощность – 10 кВт; частота вращения – 1500 об./мин; КПД при нагрузке 9 кВт – 85,4 %; графики КПД $\eta(P_H)$ для двух значений $\cos\varphi$ представлены на рис. 1.

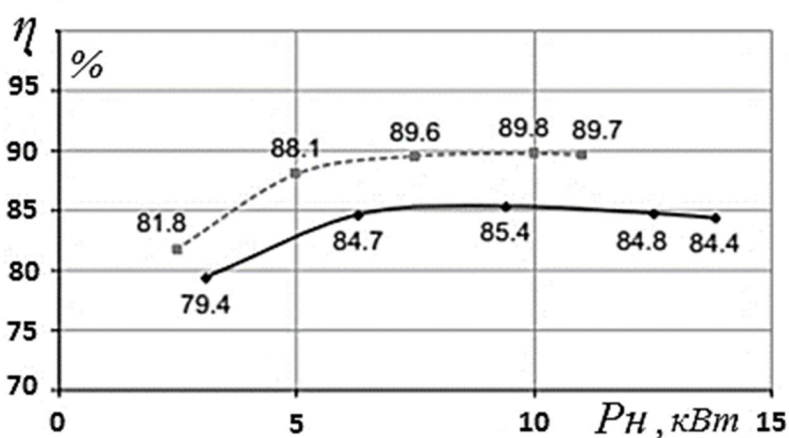


Рис. 1. Зависимость КПД генератора LSA 40 VS2 от нагрузки (--- при $\cos\varphi = 1$; — при $\cos\varphi = 0,8$) [10]

Зная мощность и КПД генератора, можно найти необходимую мощность подводимого привода:

$$P_{\text{г}} = \frac{P_{\text{день}}}{\eta} = \frac{9,6}{0,854} = 11,24 \text{ кВт}.$$

Для обеспечения генератора необходимой мощностью выберем пневмодвигатель 68-0065/IEC112A со следующими характеристиками: номинальная мощность – 18 кВт; номинальный крутящий момент – 57 Н·м; номинальная частота вращения – 3000 об./мин; частота вращения холостого хода – 6000 об./мин, максимальный расход воздуха – 20 м³/мин, номинальное рабочее давление – 6 бар. На основе рабочей характеристики данного пневмодвигателя (см. рис. 2) определяем его следующие данные: при работе двигателя на оборотах $n_{1500} = 25 \% n_{\text{м}} = 1500$ об./мин он имеет мощность $P_{1500} = 73 \% P_{\text{н}} = 13,14$ кВт и расход воздуха $Q_{1500} = 56 \% Q_{\text{м}} = 11,2$ м³/мин.

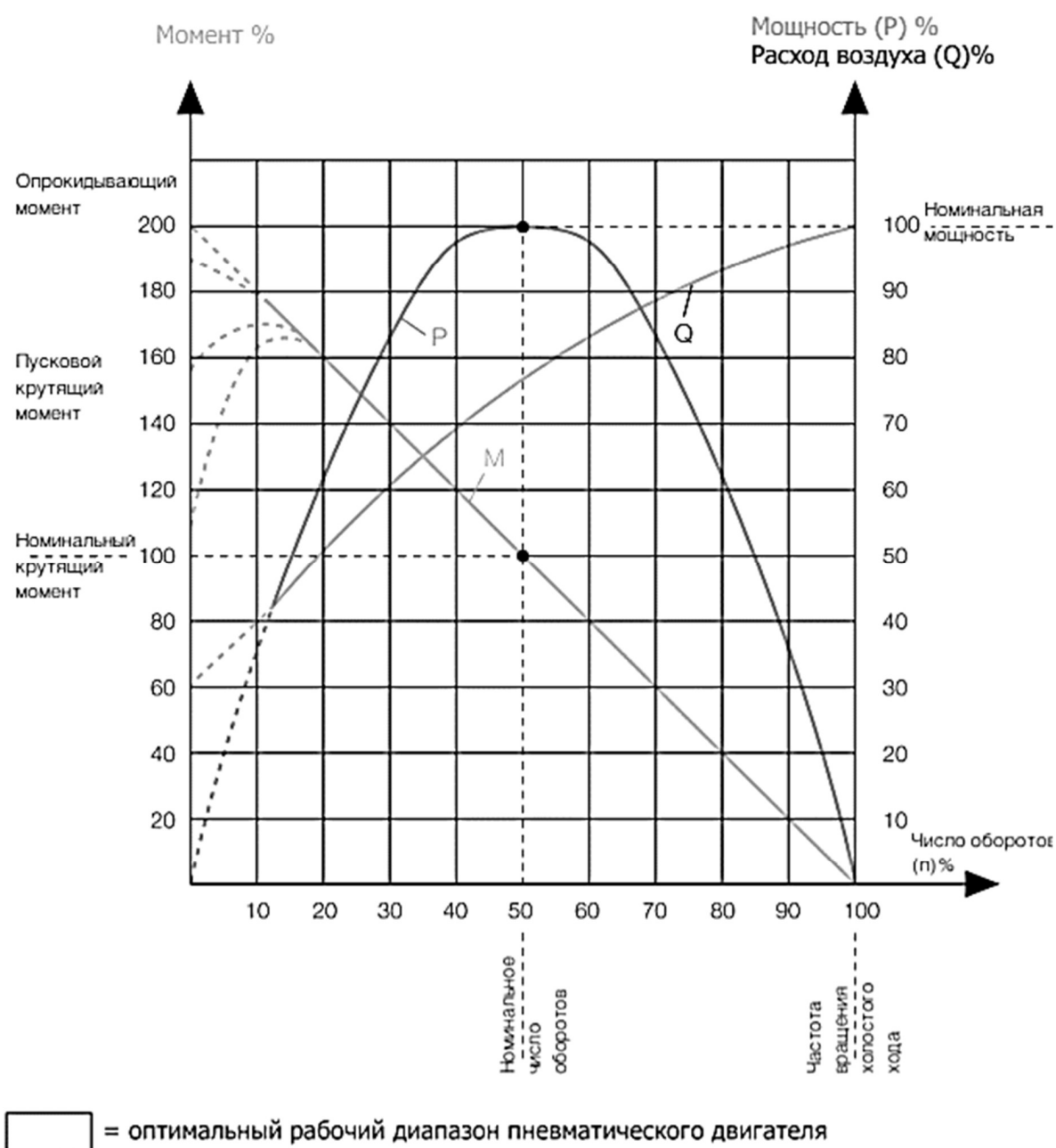


Рис. 2. Механическая характеристика пневмодвигателя 68-0065/IEC112A

Мощность двигателя в данном режиме превышает требуемую. Поэтому необходимо учесть корректировку среднего значения рабочего давления воздуха согласно рис. 3. Тогда при $P_r/P_{1500} = 0,85$ среднее необходимое рабочее давление воздуха будет 5,4 бар. Для учёта потерь давления на фильтрах, осушителях, охладителях и в трубопроводе добавим 0,5 бар, тогда минимальное давление в системе должно быть $p_{\min} = 5,9$ бар.

Для расчёта объёма хранилища сжатого воздуха нам известно: средний расход воздуха – $Q_{1500} = 11,2$ м³/мин; максимальное давление в системе определим, как $p_{\max} = 10$ бар, поскольку на данном давлении работает большинство производительных компрессоров; минимальное давление системы $p_{\min} = 5,9$ бар, период времени работы электростанции – $t_{\text{день}} = 14$ часов. В основу расчётов возьмём общую формулу определения расхода в пневматических ресиверах [12]:

$$Q_R = \frac{V(p_{\max} - p_{\min})}{\Delta t},$$

где Q – расход потребляемого сжатого воздуха, м³/мин; V – объём резервуара со сжатым воздухом, м³; p_{\min} и p_{\max} – давление до и после работы ресивера, бар; Δt – продолжительность работы ресивера, мин.

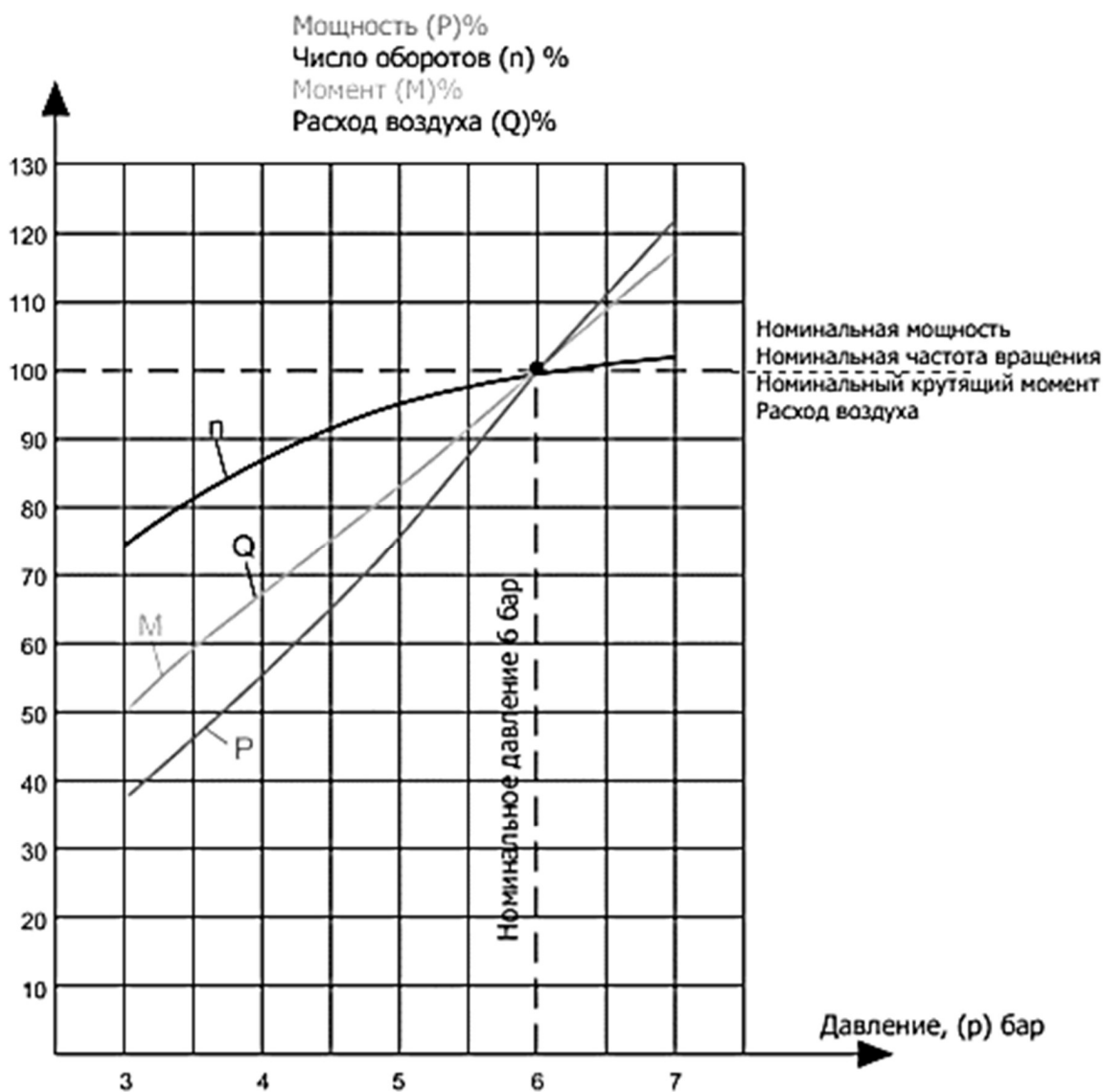


Рис. 3. График корректировки значений двигателя по изменению давления воздуха [11]

Из приведённой формулы выразим объём и подставим необходимые данные:

$$V = \frac{Q \cdot \Delta t}{(p_{\max} - p_{\min})},$$

$$V = \frac{11,2 \cdot 14 \cdot 60}{(10 - 5,9)} = 2295 \text{ м}^3.$$

Для подбора компрессора найдём необходимый минимальный расход для накачки воздухом ресивер за время ночного тарифа $t_{\text{ночь}} = 8$ часов:

$$Q_K = \frac{Q(p_{\max} - p_{\min})}{\Delta t} = \frac{2295(10 - 5,9)}{8 \cdot 60} = 19,6 \frac{\text{м}^3}{\text{мин}}.$$

Путём анализа возможных вариантов компрессоров было выявлено, что экономически и практически выгодно устанавливать несколько компрессоров с низкой производительностью, но высоким максимальным давлением, чем устанавливать одну большую высокопроизводительную установку.

В качестве примера возьмём промышленный винтовой компрессор Pioneerair Z75A в количестве 2 шт. Технические характеристики компрессора: максимальная величина давления – 12 бар, производительность при давлении в 7 бар – 10 м³/мин, потребляемая мощность – 55 кВт.

Найдём затрачиваемую и возвращаемую мощность системы и сравним их:

$$P_{\text{зат}} = 2 \cdot P_{\text{компр}} \cdot t_{\text{ночь}} = 2 \cdot 55 \cdot 8 = 880 \text{ кВт},$$

$$P_{\text{ген}} = P_{\text{сред.пот.}} \cdot t_{\text{день}} = 9,589 \cdot 14 = 134,224 \text{ кВт}.$$

Итоговое соотношение потраченной и возвращаемой энергии:

$$\eta_{\text{системы}} = \frac{P_{\text{ген}}}{P_{\text{зат}}} = \frac{134,224}{880} = 0,15.$$

Соотношение тарифов электроэнергии, ниже значения которого реализация системы не будет целесообразной:

$$\eta_{\text{цен}} = \frac{C_{\text{ночь}}}{C_{\text{день}}} = \frac{2,13}{6,29} = 0,33.$$

По полученным данным видно, что рассмотренная система пневматического аккумулирования не принесёт никакой экономической выгоды от запаса электроэнергии ночью и использования её днём.

Заключение. Как показывает упрощённый примерный расчёт, применение предприятием системы с пневматическим аккумулированием подобной конфигурации экономически невыгодно. Даже при самых позитивных предположениях и без учёта потерь утечки воздуха при негерметичности системы, разницы температур входящего и исходящего сжатого воздуха в резервуар, без учёта неравномерности суточной нагрузки предприятия и иных видов потерь КПД системы остаётся низким, и поскольку оно намного ниже разницы цен тарифов электроэнергии (не говоря об окупаемости системы), организация не окупит даже потраченный киловатт энергии, поскольку приведённая система аккумулирования в сутки будет расходовать бюджет предприятия на электроэнергию больше, чем само предприятие без такой системы аккумулирования энергии.

Кроме этого, предприятие столкнётся с такой проблемой, как огромные объёмы аккумулятора сжатого воздуха, поскольку либо это будет в огромных объёмах наземного пространства и, соответственно, будет много утечек, либо придётся тратить значительные ресурсы на подготовку такого же объёма аккумулятора под землей. Несмотря на то, что на практике используют отработанные месторождения горючих ископаемых или подземные полости, полость эта должна находиться на значительной глубине. Компенсировать же недостаток количества пространства под за-



пасание сжатого воздуха возможно приобретением дорогого оборудования для нагнетания воздуха очень большого давления (13 бар и выше).

Стоит отметить, что в качестве запасного восполняемого альтернативного источника электроэнергии при перебоях с электропитанием приведённая система аккумулирования энергии может иметь место. Например, для обеспечения бесперебойной электроэнергией ответственной структуры на 5 мин хватит пары наземных цистерн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скачок потребления энергии в мире [Электронный ресурс] / Priroda.su. – Режим доступа: <http://www.priroda.su/item/2571> (дата обращения: 06.06.2020).
2. Ларин, Д. Как снизить затраты на электроэнергию на предприятии? [Электронный ресурс] / Энерго-март – федеральная розничная энергосбытовая компания. – Режим доступа: <https://en-mart.com/zatraty-na-elektroenergiyu-na-predpriyatii/> (дата обращения: 06.06.2020).
3. Тарифы на электроэнергию для населения в Москве. Действуют с 1 января 2020 года [Электронный ресурс] / ЭнергоВОПРОС.ру. – Режим доступа: <https://energovopros.ru/spravochnik/elektrosnabzhenie//tarify-na-elektroenergiyu/moskva/29449/> (дата обращения: 06.06.2020).
4. Современные электрохимические системы аккумулирования энергии / Т. Л. Кулова, И. И. Николаев, В. Н. Фатеев, А. Ш. Алиев // KIMYA PROBLEMLERI. – 2018. – № 1. – С. 9-34.
5. Попов, Л. Вращающаяся армия бережёт 60 герц стабильного электричества [Электронный ресурс] / MEMBRANA, 2001–2012. – Режим доступа: <http://www.membrana.ru/particle/3111> (дата обращения: 06.06.2020).
6. Рачков, М. Ю. Технические средства автоматизации: учеб. / М. Ю. Рачков. – 2-е изд., стереотип. – М.: МГИУ, 2007. – 185 с.
7. Пневмо-воздушное аккумулирование (ПВА) [Электронный ресурс] / Мастерская своего дела. – Режим доступа: <https://proizvodim.com/pnevmo-vozdushnoe-akkumulirovanie-pva.html> (дата обращения: 06.06.2020).
8. О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03: постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 3 июня 2003 г. № 118 // Российская газета. – 2003. – № 120.
9. Башмаков, И. А. Энергопотребление зданий сферы услуг: мировой опыт / И. А. Башмаков // Энерго-сбережение. – 2015. – № 5. – С. 24-29.
10. LSA 40 Low Voltage Alternator – 4 pole: документация // LEROY-SOMER. – 2020. – С. 12.
11. Пневматические двигатели. Решения в области специализированных приводных устройства: документация [Электронный ресурс] // ИНТЕРТУЛМАШ. – 112 с. – Режим доступа: <https://www.itmash.ru/ftpgetfile.php?id=80&module=files> (дата обращения: 06.06.2020).
12. Расчёт имеющегося объёмного расхода (потребления) сжатого воздуха без расходомера [Электронный ресурс] / Megapascal.ru. – Режим доступа: http://www.megapascal.ru/info//raschet_rashoda_szhatogo_vozduha/ (дата обращения: 06.06.2020).

Андрианов И. К.

I. K. Andrianov

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ШТАМПОВ
В УСЛОВИЯХ МНОГООПЕРАЦИОННОЙ ШТАМПОВКИ**

**MATHEMATICAL MODEL OF THE STAMP CYCLIC LOADING IN CONDITIONS
OF MULTI-OPERATION STAMPING**

Андрианов Иван Константинович – кандидат технических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru.

Mr. Ivan K. Andrianov – PhD, Assistant Professor, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Avenue, 27. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru.

Аннотация. В работе предложена математическая модель аппроксимации функции нагружения штампов для многооперационного процесса формообразования с учётом цикличности нагружения. Функция нагружения штампа представлена с помощью тригонометрического полинома Фурье относительно времени. Предложенная интерполяция позволяет исключить кусочное представление графика нагружения в задачах, требующих гладкого представления с целью проведения операций дифференцирования и интегрирования без применения дискретных методов. Полученная модель на практике может быть использована при расчёте процессов штамповки в несколько этапов с применением реверсивных вкладышей, а также при поточном производстве изделий в условиях циклического нагружения.

Summary. The paper offers a mathematical model for approximating the stamp loading function for a multi-operation forming process, taking into account the loading cycle. The stamp loading function is represented using a trigonometric Fourier polynomial with respect to time. The proposed interpolation makes it possible to exclude piecemeal representation of the loading graph in problems that require smooth representation in order to perform differentiation and integration operations without using discrete methods. The resulting model can be used in practice for calculating stamping processes in several stages with the use of reversible inserts, as well as for in-line production of products under cyclic loading conditions.

Ключевые слова: математическое моделирование, циклическое нагружение, штамп, аппроксимация рядом Фурье, формообразование.

Key words: mathematical modeling, cyclic loading, stamping, approximation by Fourier series, shaping.

УДК 519.6

На сегодняшний день разработка различных методов расчёта штампов требует задания силового нагружения в виде гладкой математической функции, поскольку характер изменения нагрузки влияет на изменение напряжённого состояния штампов и формуемого изделия. В связи с этим в работе была поставлена задача рассмотреть модель математической аппроксимации циклической функции нагружения для многооперационных процессов штамповки. С практической точки зрения это связано, во-первых, с многосерийностью производства изделий методами штамповки, во-вторых, ввиду сложности формуемых изделий для исключения дефектов процессы формовки и вытяжки проводят с применением реверсивных вкладышей, каждый из которых может быть использован на отдельном этапе формообразования. Стоит отметить, что для большинства заготовок достаточно порядка 2-3 операций, что особенно актуально для производства полупатрубок в авиационной сфере. В то же время количество таких изделий может измеряться сотнями единиц, а процесс изготовления носить поточный характер.

Кусочное представление графика функции нагружения, безусловно, является более точным, однако при проведении математических исследований, связанных с операциями интегрирования и

дифференцирования, могут возникнуть трудности однозначного определения производной, что вынуждает рассматривать решение задачи с применением методов дискретизации на этапе, где более предпочтительным является использование функции нагружения как непрерывной функции времени.

Стоит подчеркнуть достаточно большую освещённость в литературных источниках методов обработки металлов давлением, технологий штамповки. Что касается математического описания силового воздействия, следует отметить ряд работ [12; 17; 19], где представлены модели аппроксимации силовых функций с целью автоматизации производства. Однако вопросы, касающиеся многооперационности и цикличности процессов формообразования, не учитывались в данных моделях. Некоторые математические аспекты интерполирования сеточных функций исследованы в работах [1; 9; 10]. Большинство работ посвящено вопросам моделирования процессов штамповки с заданным нагружением, что представлено в работах [2; 15; 16]; особенности повреждаемости штампов и условия взаимодействия инструментов описаны в работах [4; 8; 21]. Методы топологической оптимизации штампов формообразования рассматривались в работах [22; 23]. Вопросы циклического нагружения и связанные с ними проблемы упругого гистерезиса представлены в работах [6; 13; 14; 18]. Проблемы оценки напряжённо-деформированного состояния и многоцикло-вой усталости в процессах штамповки рассмотрены в работах [5; 7; 11; 20].

Таким образом, рассмотрим штамп, испытывающий воздействие циклического нагружения. Задачей исследования является построение математической модели аппроксимации силовой функции как периодической. Ввиду особенностей процессов формообразования, предполагающих многооперационные этапы (как правило, не более четырёх операций) формовки, вытяжки с применением промежуточных матриц, реверсов, требуется рассмотреть периодическую функцию с несколькими максимумами за один период.

Рассмотрим однооперационный цикл нагружения. С учётом особенностей процессов формообразования цикл является пульсирующим ассиметричным. Зададим значения функции нагружения:

$$\begin{aligned} p &= 0 \quad \text{при } t = (i - 1)t_c, & i &= 1, \dots, N, \\ p &= p^* \quad \text{при } t = \frac{t_c}{2} + (i - 1)t_c, & i &= 1, \dots, N, \end{aligned} \quad (1)$$

где p – поверхностная нагрузка; i – номер цикла нагружения; N – количество циклов нагружения.

Представим аппроксимирующую функцию в следующем виде с неизвестными коэффициентами A, B, C, D :

$$P(t) = A \sin(Bt + C) + D. \quad (2)$$

Учитывая временные условия (1) для аппроксимирующей функции (2) и решая систему уравнений, определим аппроксимирующие коэффициенты для циклической нагрузки:

$$A = \frac{p^*}{2}, \quad B = \frac{2\pi}{t_c}, \quad C = -\frac{\pi}{2}, \quad D = \frac{p^*}{2}. \quad (3)$$

Тогда аппроксимирующая функция (см. рис. 1) при циклическом нагружении для однооперационного формообразования согласно (3) будет представлена в виде

$$p(t) = \frac{p^*}{2} \left[\sin\left(\frac{2\pi}{t_c}t - \frac{\pi}{2}\right) + 1 \right]. \quad (4)$$

Если один цикл формообразования включает в себя K операций нагружения, то для построения аппроксимирующей функции применим преобразование Фурье. Пусть временная сеточная функция за один цикл имеет вид

$$\left\{ 0; \frac{t_1}{2}; t_1; \dots; t_1 + t_2; \dots; \sum_k t_k \right\}.$$

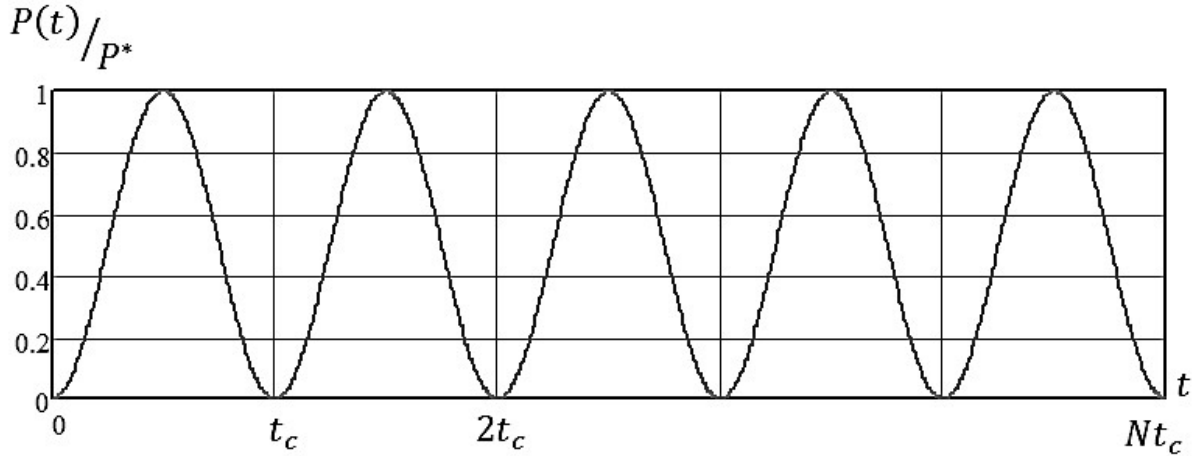


Рис. 1. Аппроксимирующая функция циклического нагружения для однооперационного формообразования

Для двухоперационного процесса формообразования при циклическом нагружении узлы временной функции будут иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{l} 0; \frac{t_1}{2}; t_1; t_1 + \frac{t_2}{2}; t_1 + t_2; \dots \\ (i-1)(t_1 + t_2); \frac{2i-1}{2}t_1 + (i-1)t_2; it_1 + (i-1)t_2; it_1 + \frac{2i-1}{2}t_2; i(t_1 + t_2); \dots \\ (N-1)(t_1 + t_2); \frac{2N-1}{2}t_1 + (N-1)t_2; Nt_1 + (N-1)t_2; \\ Nt_1 + \frac{2N-1}{2}t_2; N(t_1 + t_2) \end{array} \right\},$$

где t_1 – время первой промежуточной операции нагружения; t_2 – время второй промежуточной операции нагружения.

Для циклического процесса формообразования аппроксимируем функцию нагружения с помощью тригонометрического полинома Фурье:

$$p(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^n a_j \cos\left(\frac{2\pi j}{t_c} t\right) + \sum_{j=1}^n b_j \sin\left(\frac{2\pi j}{t_c} t\right), \quad n < \frac{(m-1)K}{2}, \quad (5)$$

где m – количество узлов дискретизации временной функции в пределах одной операции; K – количество операций формообразования за один цикл нагружения.

Тогда аппроксимирующие коэффициенты циклической функции нагружения будут иметь вид

$$a_0 = \frac{2}{(m-1)K} \sum_{l=0}^{(m-1)K-1} p_l, \quad (6)$$

$$a_j = \frac{2}{(m-1)K} \sum_{l=0}^{(m-1)K-1} p_l \cos\left(\frac{2\pi j}{t_c} t_l\right), \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (7)$$

$$b_j = \frac{2}{(m-1)K} \sum_{l=0}^{(m-1)K-1} p_l \sin\left(\frac{2\pi j}{t_c} t_l\right), j = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

где K – количество операций формообразования.

Для трёхоперационного циклического процесса нагружения при задании нагрузки в виде

$$p|_{N=1} = \{0; p_1; 0; p_2; 0; p_3; 0\},$$

$$t|_{N=1} = \left\{0; \frac{t_c}{6}; \dots; t_c\right\}$$

функция нагружения может быть аппроксимирована следующим полиномом согласно соотношениям (5) – (8):

$$p(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^2 a_j \cos\left(\frac{2\pi j}{t_c} t\right) + \sum_{j=1}^2 b_j \sin\left(\frac{2\pi j}{t_c} t\right), \quad (9)$$

где

$$a_0 = \frac{1}{3}(p_1 + p_2 + p_3),$$

$$a_j = \frac{1}{3}\left(p_1 \cos\left(\frac{\pi j}{3}\right) + p_2 \cos(\pi j) + p_3 \cos\left(\frac{5\pi j}{3}\right)\right),$$

$$b_j = \frac{1}{3}\left(p_1 \sin\left(\frac{\pi j}{3}\right) + p_2 \sin(\pi j) + p_3 \sin\left(\frac{5\pi j}{3}\right)\right).$$

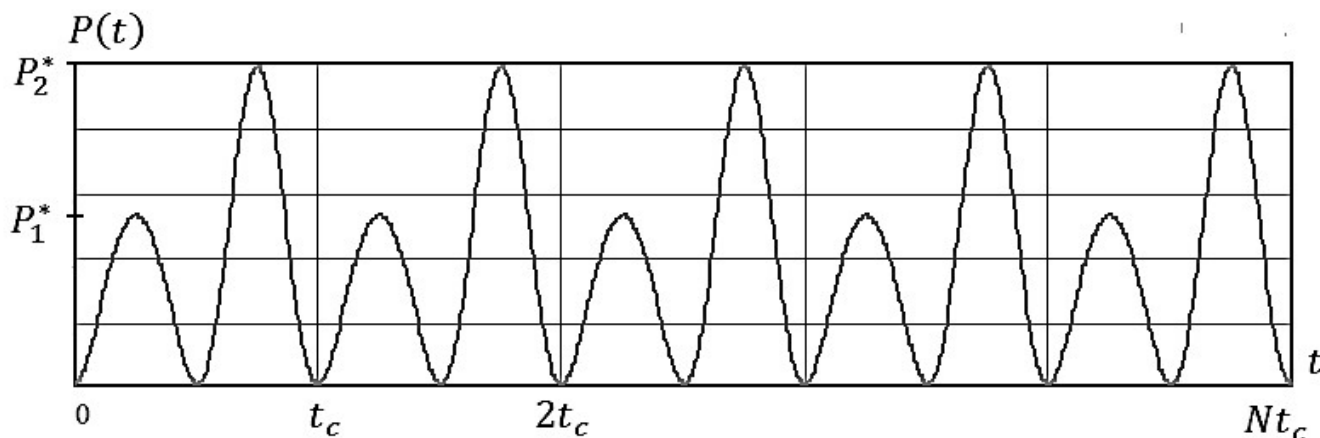


Рис. 2. Зависимость циклической нагрузки от времени
для двухоперационного процесса формообразования

На рис. 2 и 3 представлены аппроксимации функции нагружения для двух- и трёхоперационного процесса формообразования. В случае трёхоперационного многоциклового формообразования для построения сеточной функции нагружения за один цикл взято 6 узловых точек; нагрузка аппроксимируется тригонометрическим полиномом (9). Стоит отметить, что для более точного определения скорости нагружения количество точек за один цикл может быть увеличено, что определяется параметром m в интерполяционном полиноме (5).

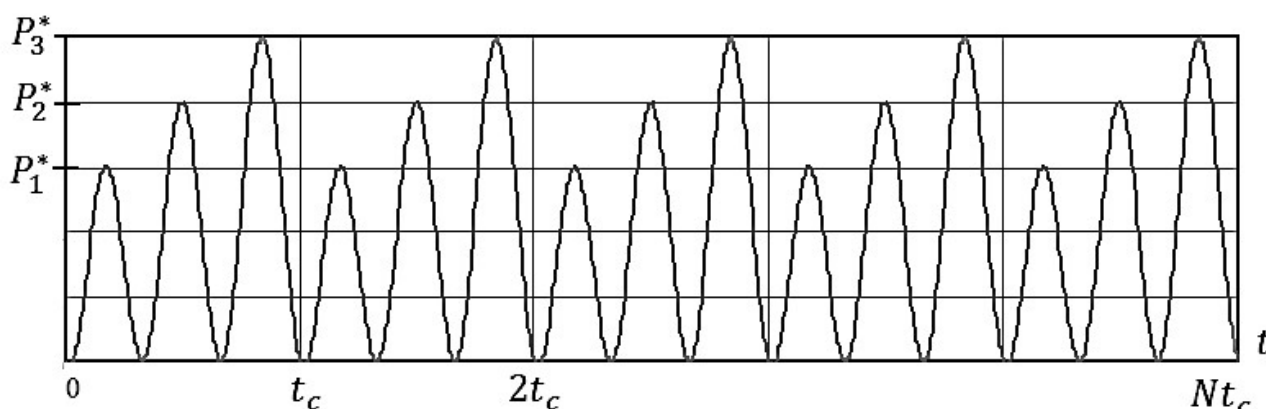


Рис. 3. Зависимость циклической нагрузки от времени при трёхоперационном процессе формообразования

Таким образом, представленная математическая модель аппроксимации действующей нагрузки (4), (5) позволит учитывать многооперационность процесса формообразования при проведении исследований, исключающих кусочное представление функции нагружения. Особенно важным данный этап представляется для задачи оптимизации топологии штампа с помощью стержневых структур, где для каждого стержня требуется своя функция нагружения, определяющая его напряжённое состояние с последующим дифференцированием и интегрированием при проведении расчётов многоциклового усталости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрианов, И. К. Параметрическая идентификация математической модели теплообменного процесса для тонкостенных криволинейных оболочек турбомашин / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг // Математическое моделирование и численные методы. – 2016. – № 2 (10). – С. 24-38.
2. Андрианов, И. К. Основы моделирования процессов формообразования в программе ram-stamp 2g / И. К. Андрианов, С. В. Белых, А. В. Станкевич. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – 63 с.
3. Андрианов, И. К. Численный метод расчёта теплоотдачи для требуемого температурного поля на поверхности контакта лопатки и теплозащитного покрытия при поперечной схеме охлаждения / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг // Вестник Московского государственного областного университета. Серия «Физико-математика». – 2015. – № 2. – С. 34-44.
4. Анализ повреждений и совершенствование штампов и технологии объёмной штамповки лопаток газотурбинных / А. В. Арефьев, М. С. Болховитин, Л. Н. Лесневский, В. А. Панов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 6. – С. 35-40.
5. Багмутов, В. П. Особенности построения единой структурной модели упруго-пластического деформирования слоистых волоконных композитов при статическом и циклическом нагружении / В. П. Багмутов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2005. – № 3. – С. 90-96.
6. Бондарь, В. С. Математическое моделирование процессов ратчинга при несимметричных циклических нагружениях / В. С. Бондарь, С. В. Бурчаков, В. В. Даншин // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2009. – № 1. – С. 41-51.
7. Бухановский, В. В. Малоцикловая прочность и циклическая ползучесть молибден-вольфрамового сплава при высокотемпературном повторно-статическом нагружении / В. В. Бухановский, И. Мамулич // Металлы. – 2004. – № 3. – С. 91-99.
8. Волков, С. А. Система управления роботизированным комплексом автоматизированной штамповки лопаток компрессоров газотурбинных двигателей / С. А. Волков, Т. Д. Кожина, А. Н. Ломанов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. – 2018. – № 1 (44). – С. 82-85.
9. Гринкруг, М. С. Численная модель оптимального теплоотвода в многослойных оболочковых элементах турбомашин / М. С. Гринкруг, И. К. Андрианов // Перспективы науки. – 2019. – № 1 (112). – С. 25-28.
10. Гринкруг, М. С. Численный подход к расчёту параметров охлаждающего потока в каналах оболочковых элементов турбомашин для заданных условий на поверхности теплоотвода [Электронный ресурс] /



- М. С. Гринкруг, И. К. Андрианов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2016. – Т. 8, № 1. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/25TVN116.pdf> (дата обращения: 12.06.2020).
11. Деформационное поведение и разрушение субмикрористаллического титана при циклическом нагружении / О. А. Кашин, Е. Ф. Дударев, Ю. Р. Колобов [и др.] // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2004. – № 27. – С. 130-134.
12. Лыков, Д. А. Аппроксимация силовой характеристики электромагнита полиномом 3-й степени / Д. А. Лыков // Актуальные вопросы науки и техники: материалы Междунар. студенческой науч.-практ. конф. – Воронеж: Руна, 2015. – С. 190-193.
13. Мирсаяпов, И. Т. Выявление зон концентрации напряжений в железобетонных конструкциях при циклическом нагружении / И. Т. Мирсаяпов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – № 6. – С. 16-18.
14. Олькин, С. И. Влияние ползучести на рост трещины при нерегулярном циклическом нагружении / С. И. Олькин // Учёные записки ЦАГИ. – 2003. – Т. 34, № 1-2. – С. 123-128.
15. Станкевич, А. В. Сравнительный анализ моделирования процессов формообразования с помощью программных пакетов Is-dyna и ram-stamp 2g / А. В. Станкевич, И. К. Андрианов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. – 2017. – Т. 73, № 3. – С. 26-32.
16. Обзор возможностей программы математического моделирования технологических процессов штамповки и металлообработки «ММТПМ (ШТАМПОВКА)» / С. А. Стебунов, Ю. А. Гладков, С. С. Каневский [и др.] // Естественные и технические науки. – 2013. – № 6 (68). – С. 429-436.
17. Толочко, А. В. Использование цифрового фильтра в MATLAB при аппроксимации данных измерения динамических параметров силовых модулей / А. В. Толочко, И. Ю. Бутарев // САПР и моделирование в современной электронике: сборник научных трудов I Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Л. А. Потапова, А. Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2017. – С. 72-76.
18. Тритенко, А. Н. К учёту явления гистерезиса при циклическом нагружении несвязной сыпучей среды / А. Н. Тритенко // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2007. – № 3 (579). – С. 21-26.
19. Трубников, Ю. В. Аппроксимация силовой функции общей задачи многих тел в метрике L_2 / Ю. В. Трубников, А. М. Воронов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2008. – № 3. – С. 133-140.
20. Шенбергер, П. Н. Особенности механизма деформирования в разделительных операциях листовой штамповки / П. Н. Шенбергер // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2018. – № 2 (44). – С. 53-60.
21. Шнейберг, А. М. Оценка влияния осевого вращения инструмента на усилие комбинированной объёмной штамповки в открытом штампе / А. М. Шнейберг, С. В. Иванов, М. А. Ширшкова // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2018. – № 5. – С. 15-22.
22. Andrianov, I. K. Finite-element model of the shell-shaped half-pipes forming for blanks behavior investigating during corrugating at the stamping / I. K. Andrianov, A. V. Stankevich // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», EastConf 2019. – 2019. – P. 8725322.
23. Andrianov, I. K. The finite element simulation of the stamping die optimal topology / I. K. Andrianov, S. V. Belykh // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», EastConf 2019. – 2019. – P. 8725410.

Гордин С. А., Гринкруг М. С., Зайченко И. В.
К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДУТЬЁМ
ТВЁРДОТОПЛИВНЫХ КОТЛОВ

Гордин С. А., Гринкруг М. С., Зайченко И. В.
S. A. Gordin, M. S. Grinkrug, I. V. Zaychenko

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДУТЬЁМ ТВЁРДОТОПЛИВНЫХ КОТЛОВ

ON THE EFFICIENCY INCREASING OF THE BLOWER CONTROL SYSTEMS OF SOLID FUEL BOILERS

Гордин Сергей Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: gordin@knastu.ru.

Mr. Sergey A. Gordin – PhD in Engineering, Head of Department of Applied Mathematics and Computer Science, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: gordin@knastu.ru.

Гринкруг Мирон Соломонович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Общая физика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: grin@knastu.ru.

Mr. Miron S. Grinkrug – PhD in Engineering, Head of Department of General Physics, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: grin@knastu.ru.

Зайченко Илья Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: zaychenko@inbox.ru.

Mr. Ilya V. Zaychenko – PhD in Engineering, the Senior Lecturer, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: zaychenko@inbox.ru.

Аннотация. Статья посвящена решению вопроса повышения эффективности систем управления дутьём твёрдотопливных котлов. Существующие алгоритмы вычисления потерь с уходящими газами, величина которых определяет эффективность работы системы управления дутьём котла, имеют существенные недостатки, обусловленные либо высокой сложностью вычислений, либо недостаточной точностью формулы Зигерта. Авторы статьи опытным путём подтвердили ограниченность практического применения в логике систем управления дутьём твёрдотопливного котла формулы Зигерта. Для устранения выявленных недостатков предложена новая формула расчёта потерь с уходящими газами, которая может использоваться в системах управления дутьём твёрдотопливных котлов и имеет достаточно высокую точность и вместе с тем низкую вычислительную сложность.

Summary. The article is devoted to the solution of the issue of increasing the efficiency of control systems for blowing solid fuel boilers. The existing algorithms for calculating losses with exhaust gases, the value of which determines the efficiency of the boiler blast control system, have significant drawbacks due to either the high complexity of the calculations or the insufficient accuracy of the Siegert formula. The authors of the article empirically confirmed the limited practical application of the Siegert formula in the logic of control systems for blowing a solid fuel boiler. To eliminate the identified shortcomings, a new formula for calculating losses with exhaust gases was proposed, which can be used in control systems for the blast of solid fuel boilers, which has a sufficiently high accuracy and at the same time low computational complexity.

Ключевые слова: угольные котлы, КПД котла, потери с уходящими газами, тепловой расчёт котлов.

Key words: coal-fired boilers, boiler efficiency, waste gas losses, heat calculation of boilers.

УДК 697.311

Используемые в автономных системах теплоснабжения твёрдотопливные водогрейные котлы, как правило, имеют расчётный КПД на уровне 82...83 %. Фактический КПД котлов, определяемый по результатам пусконаладочных испытаний, ниже расчётного на 5...20 % и колеблется в широких пределах в процессе прогорания угля.

Такое снижение КПД твёрдотопливных котлов обусловлено особенностями горения твёрдого топлива: в начале цикла в топку котла поступает порция топлива, которое разогревается, из него испаряется влага, а затем топливо начинает прогорать с постепенным уменьшением количества горящего топлива. Для повышения КПД твёрдотопливных котлов используются различные системы регулирования подачи воздуха [1; 2]. Как правило, все эти системы имеют в своём составе газоанализатор, вычисляющий на основе измерений температуры уходящих газов, концентрации кислорода (O_2), углекислого (CO_2) и угарного (CO) газов потери с уходящими газами.

Анализ существующих способов расчёта потерь с уходящими газами

Расчёт потерь с уходящими газами может быть выполнен двумя способами: тепловым расчётом, либо по формуле Зигерта.

Тепловой расчёт потерь с уходящими газами с использованием основных уравнений горения топлива выполняется по следующей системе формул [3; 4]:

1. коэффициент, зависящий от состава топлива:

$$\beta = 2.37 \cdot \frac{H^p - 0.126 \cdot O^p + 0.038 \cdot N^p}{C^p + 0.368 \cdot S^p},$$

где H^p , O^p , C^p , S^p , N^p – содержание в топливе соответственно водорода, кислорода, углерода, серы, азота, %;

2. содержание в продуктах сгорания SO_2 и CO_2 :

$$RO_2 = \frac{21 - O_2}{1 + \beta},$$

где O_2 – измеренное газоанализатором содержание кислорода в дымовых газах, %;

3. коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{1659 + 21 \cdot \beta \cdot (RO_2 + CO) - 8.4 \cdot CO}{(100 \cdot \beta + 79) \cdot (RO_2 + CO) - 0.5 \cdot CO},$$

где CO – измеренное газоанализатором содержание CO в дымовых газах, %;

4. объём воздуха, поступающего в топку котла:

$$V_{\text{сух}}^{\text{возд}} = 0.089 \cdot C^p + 0.266 \cdot H^p + 0.033 \cdot (S^p - O^p);$$

$$V^{\text{возд}} = \alpha \cdot V_{\text{сух}}^{\text{возд}} \cdot \left(1 + 0.0016 \cdot d_{\text{возд}}\right) \cdot \frac{273 + T_{\text{возд}}}{273} \cdot \frac{760}{h_{\text{возд}}},$$

где $d_{\text{возд}}$ – влагосодержание воздуха, г/кг; $T_{\text{возд}}$ – температура воздуха, °C; $h_{\text{возд}}$ – давление воздуха, мм рт. ст.;

5. объём дымовых газов:

$$V_{RO_2+CO}^{\text{дым}} = 1.86 \cdot \frac{C^p}{100} + 0.684 \cdot \frac{S^p}{100}; \quad V_{O_2}^{\text{дым}} = 0.21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{\text{сух}}^{\text{возд}};$$

$$V_{H_2O}^{\text{дым}} = \frac{9 \cdot H^p + W^p}{80.4} + \frac{1.293 \cdot d_{\text{возд}}}{804} \cdot \alpha \cdot V_{\text{сух}}^{\text{возд}}; \quad V_{N_2}^{\text{дым}} = 0.79 \cdot \alpha \cdot V_{\text{сух}}^{\text{возд}} + \frac{N^p}{125};$$

$$V_{CO}^{\text{дым}} = \frac{CO}{100} \cdot (V_{RO_2+CO}^{\text{дым}} + V_{O_2}^{\text{дым}} + V_{N_2}^{\text{дым}}); \quad V_{RO_2}^{\text{дым}} = V_{RO_2+CO}^{\text{дым}} - V_{CO}^{\text{дым}},$$

где W^p , N^p – соответственно содержание в топливе влаги и азота, %;

6. энтальпия воздуха и дымовых газов:

$$J^{\text{возд}} = V^{\text{возд}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot T_{\text{возд}} \cdot \frac{760}{h_{\text{возд}}};$$

$$J_{\text{дым}} = (V_{\text{RO}_2}^{\text{дым}} \cdot c_{\text{RO}_2} + V_{\text{CO}}^{\text{дым}} \cdot c_{\text{CO}} + V_{\text{O}_2}^{\text{дым}} \cdot c_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2}^{\text{дым}} \cdot c_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{дым}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot T_{\text{дым}} \cdot \frac{760}{h_{\text{дым}}},$$

Где $c_{\text{возд}}, c_{\text{RO}_2}, c_{\text{CO}}, c_{\text{O}_2}, c_{\text{N}_2}, c_{\text{H}_2\text{O}}$ – соответственно теплоёмкость воздуха и продуктов сгорания, ккал/м³·°C; $T_{\text{дым}}$ – температура дымовых газов, °C; $h_{\text{дым}}$ – давление дымовых газов, мм рт. ст.;

7. относительные потери с уходящими газами:

$$qA = \frac{Q_{\text{н}} - (J_{\text{дым}} - J_{\text{возд}})}{Q_{\text{н}}} \cdot 100,$$

где $Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания топлива, ккал/кг.

Для формулы Зигерта существует два варианта [4]:

$$qA = f \cdot \frac{FT - AT}{\text{CO}_2} \quad (1)$$

или

$$qA = (FT - AT) \cdot \left(\frac{A1}{\text{CO}_2} + B \right); \quad \text{CO}_2 = \text{CO}_2^{\text{max}} \cdot \left(1 + \frac{\text{O}_2}{\text{O}_2^{\text{max}}} \right), \quad (2)$$

где qA – потери с уходящими газами, %; FT – температура дымовых газов, °C; AT – температура окружающей среды, °C; O_2 – значение кислорода в дымовых газах (округлённое в сторону ближайшего целого числа), %; $f, A1, B$ – коэффициенты пересчёта, зависящие от вида топлива; CO_2 – концентрация углекислого газа в дымовых газах, %.

Оба метода расчёта потерь с уходящими газами имеют свои недостатки: тепловой расчёт содержит множество формул, которые часто трудно реализовать в логике промышленного контроллера и которые требуют проведения множества вычислений; формула Зигерта является скорее оценкой КПД, чем точным расчётом.

Натурные испытания, проведённые на котельной с. Селихино Хабаровского края с использованием угля марки ЗБР, имеющего следующие характеристики согласно сертификата: $S^p = 55.0$, $S^p = 0.33$, $A^p = 8.7$, $W^p = 35.97$ – и низшую теплотворную способность $Q_{\text{н}} = 4248$ ккал/кг, показали, что величина потерь с уходящими газами, определённая по формуле Зигерта, ниже, чем на основе теплового расчёта. Сводные данные натурных испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результат натурных испытаний

№ испы- тания	$T_{\text{возд}}$	O_2	CO	$T_{\text{дым}}$	Формула Зигерта (1)	Формула Зигерта (2)	Тепловой расчёт
1	26,6	16,9	9,83	175,8	19,70	16,71	28,01
2	26,6	16,4	8,34	205,9	21,10	18,07	30,44
3	26,6	17,1	9,78	187,8	22,37	18,90	31,78
4	26,6	19	8,93	110,8	22,79	18,53	30,67
5	26,6	17,9	2,14	141,5	20,06	16,68	28,57
6	26,6	18	8,67	149,8	22,23	18,45	31,00
7	26,6	17,7	2,02	140,9	18,75	15,65	26,76
8	26,6	16,3	15,29	213,3	21,50	18,45	30,64
9	26,6	16,4	15,82	194,3	19,73	16,90	27,98
10	26,6	16,8	8,87	189,3	20,97	17,82	29,99
Среднее					20,92	17,62	29,58

Как следует из табл. 1, для проведённого испытания результаты расчёта qA по формуле Зигерта отличаются от результатов теплового расчёта на 30...40 % в меньшую сторону. Данный опыт

подтверждает, что формула Зигерта даёт заниженное значение потерь с уходящими газами. Кроме этого, практическое применение данной формулы ограничено небольшим набором возможных значений коэффициентов пересчёта, зависящих от видов топлива. Как правило, данные коэффициенты даны только по укрупнённому виду топлива: каменный, бурый уголь, газ, мазут и т.п.

Для выявления ограничений формулы Зигерта был выполнен сравнительный расчёт потерь с уходящими газами для бурого угля, применяемого на котельной с. Селихино Хабаровского края для широкого диапазона значений входных параметров:

1. содержание CO в дымовых газах 0...20 %;
2. содержание O₂ в дымовых газах 0...20 %;
3. температура дымовых газов 100...300 °C.

В результате сравнительного расчёта было установлено, что формула Зигерта не только даёт постоянное заниженное значение потерь с уходящими газами, но и точность формулы колеблется в достаточно широких пределах, а ошибка может достигать 50 %. Результат сравнительного расчёта представлен на рис. 1.

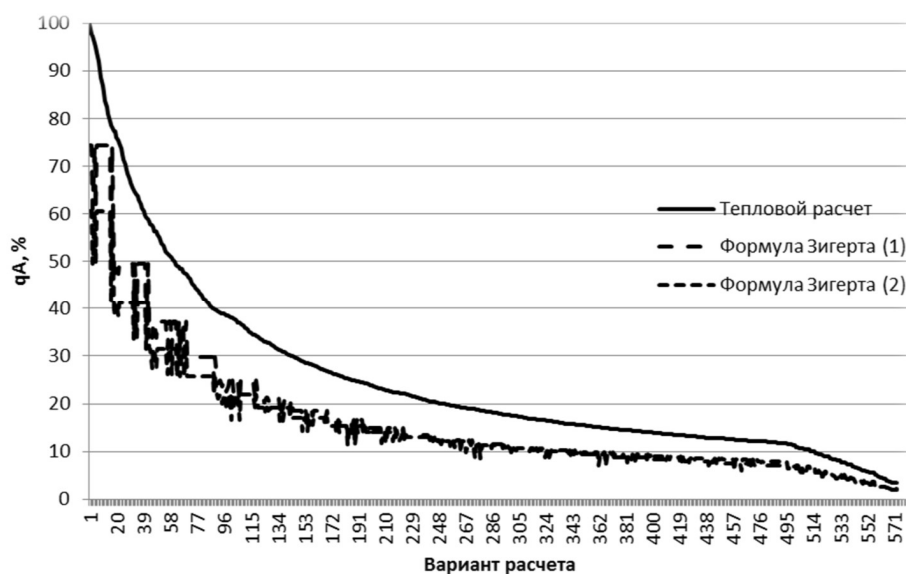


Рис. 1. Сравнительный расчёт qA

Таким образом, применение формулы Зигерта для определения потерь с уходящими газами в системах управления дутьём твёрдотопливных котлов может приводить к ошибкам управления, обусловленным обозначенными выше причинами.

Предлагаемый способ расчёта потерь с уходящими газами

Внешний вид кривой потерь с уходящими газами, полученной на основе теплового расчёта, позволяет предположить, что, возможно, существует иная формула, кроме формулы Зигерта, лишённая недостатков формулы Зигерта и имеющая меньшую вычислительную сложность по сравнению с тепловым расчётом.

Для определения такой формулы было проведено множество расчётов потерь с уходящими газами на основе формул теплового расчёта для следующих диапазонов значений входных параметров:

1. содержание CO в дымовых газах 0...20 %;
2. содержание O₂ в дымовых газах 0...20 %;
3. температура дымовых газов 100...300 °C;
4. содержание углерода в топливе 50...70 %;
5. содержание золы в топливе 5...15 %;

6. содержание водорода, кислорода, азота в топливе принималось 0 %, серы 0.33 %, что соответствует среднестатистическому содержанию указанных веществ в буром и каменном углях.

Содержание влаги в топливе определялось для заданных параметров по формуле

$$W^p = 100 - H^p - O^p - C^p - S^p - N^p.$$

Результаты расчёта были обработаны статистическими методами, и получена следующая формула определения потерь с уходящими газами:

$$qA = 0.03 \cdot (FT - AT) \cdot \left(2.1 - \frac{C^p}{100} + 1.2 \cdot (\alpha - 1) \right) + \left(1.446 - 0.64 \cdot \frac{C^p}{100} - 0.42 \cdot \frac{A^p}{100} \right) \cdot (\alpha - 1),$$

где qA – потери с уходящими газами, %; FT – температура дымовых газов, °С; AT – температура окружающей среды, °С; C^p , A^p – содержание в топливе соответственно углерода, золы, %; α – коэффициент избытка воздуха.

Предложенная формула, по сравнению с формулой Зигерта, имеет ряд преимуществ:

1. отсутствуют коэффициенты, зависящие от вида топлива, а такие параметры, как зольность и содержание углерода, могут быть взяты из сертификата на уголь;
2. формула применима для любых типов углей.

Вместе с тем данная формула не учитывает содержание в топливе водорода и кислорода. Возможно, что для таких видов топлива может быть получена аналогичная формула.

Для проверки точности предложенной формулы был выполнен сравнительный расчёт потерь с уходящими газами на основе формул теплового расчёта для следующих диапазонов значений входных параметров:

1. содержание СО в дымовых газах 0...20 %;
2. содержание O_2 в дымовых газах 0...20 %;
3. температура дымовых газов 100...300 °С;
4. содержание углерода в топливе 50...70 %;
5. содержание золы в топливе 5...15 %.

Сравнительный расчёт определения потерь с уходящими газами на основе формул теплового расчёта и предложенной формулы показал, что данная формула даёт достаточно точный результат, а среднее отклонение составляет не более 1.2 %. Результат сравнительного расчёта приведен на рис. 2.

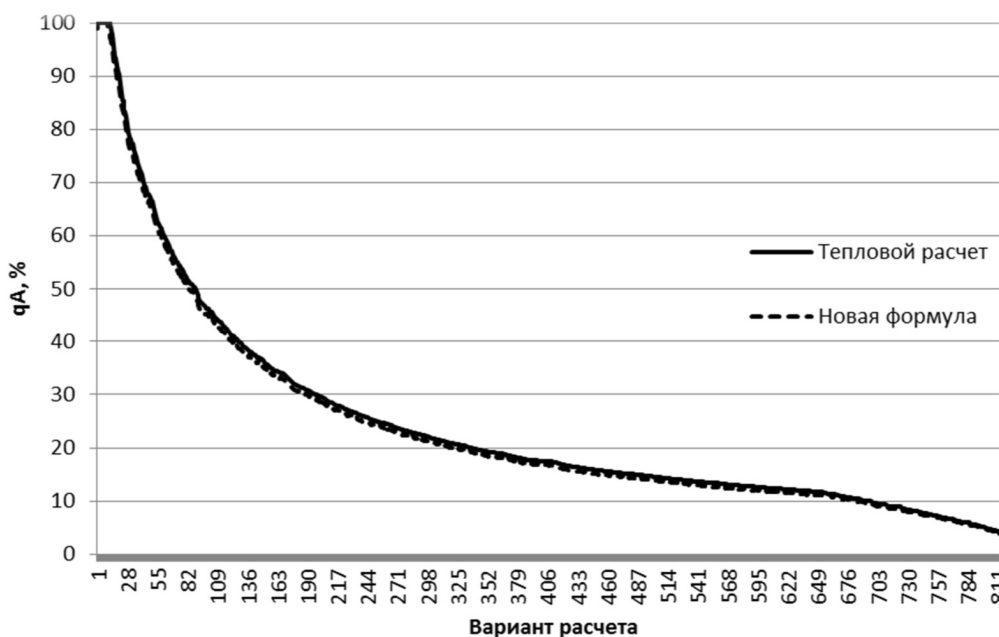


Рис. 2. Сравнительный расчёт qA по новой формуле



Заключение

1. Результаты сравнительного расчёта показали, что применяемая в современных газоанализаторах формула Зигерта даёт заниженное значение qA , а также нелинейную точность.
2. Для каждого вида топлива может быть получена формула, аналогичная формуле Зигерта, но имеющая более высокую точность.
3. Предложенная формула расчёта потерь с уходящими газами имеет небольшую вычислительную сложность и может использоваться в любых системах автоматики угольных котлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев, А. Е. Автоматическое регулирование режима работы водогрейного котла со слоевой угольной топкой / А. Е. Медведев, К. П. Волюков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2009. – № 3 (73). – С. 65-69.
2. Гордин, С. А. Об интеллектуальной адаптации ПИД-регулирования в системах управления котлов малой мощности / С. А. Гордин, И. В. Зайченко // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2020. – № 3. – С. 95-99.
3. Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод / под ред. Н. В. Кузнецова и др. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
4. ГОСТ Р 56777-2015. Котельные установки. Метод расчёта энергопотребления и эффективности = Boiler installations. Computational method of energy consumption and effectiveness: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 ноября 2015 г. № 2030-ст: введён впервые: дата введения 2016-07-01 / подготовлен Обществом с ограниченной ответственностью «СанТехПроект». – М.: Стандартинформ, 2016. – 67 с.
5. Практическое руководство по газовому анализу онлайн [Электронный ресурс] / McGrp.Ru, 2012-2020. – Режим доступа: <https://mcgrp.ru/files/viewer/132637/55> (дата обращения: 06.06.2020).

Каблуков А. В.
A. V. Kablukov

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЛИНЕЙНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ. ОБЗОР
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ ПО ВОПРОСУ**

**NUMERICAL MODELING OF OPTIMAL DESIGN OF LINEAR PIPELINE SYSTEM
BEARING STRUCTURES. REVIEW OF RESEARCH PAPERS ON THE ISSUE**

Каблуков Андрей Валерьевич – аспирант Иркутского национального исследовательского технического института (Россия, Иркутск); тел. 8(902)512-52-53. E-mail: andrewkablukov@mail.ru.

Mr. Andrey V. Kablukov – Post-Graduate Student, Irkutsk National Research Technical Institute (Russia, Irkutsk); tel. 8(902)512-52-53. E-mail: andrewkablukov@mail.ru.

Аннотация. Отмечена специфика проектирования и строительства объектов нефтегазовой сферы. Для дальнейшего изучения из общего перечня объектов капитального строительства отрасли отобраны металлические эстакады. Представлены специальные требования нормативных документов, предъявляемые к эстакадам. Описан пример снижения расходов на проектирование и строительство при помощи создания унифицированных проектных решений, отмечены недостатки данного подхода. Выявлена проблема оптимального проектирования эстакад как пространственных металлических конструкций. Приведены краткие итоги мониторинга научных работ, описывающих современные методы оптимального проектирования. Наиболее подробно из всех подходов к решению проблемы представлен результат мониторинга работ, посвящённых применению метаэвристических алгоритмов в оптимальном проектировании.

Summary. Features of the design and construction of oil and gas facilities are noted. Metal flyovers were selected from the general list of capital construction projects in the industry for further study. Specific requirements of regulatory documents for overpasses are given. An example of reducing the cost of design and construction using the creation of unified design solutions is described, the disadvantages of this approach are noted. The author reveals the problem of optimal design of flyovers as spatial metal structures, and provides brief results of the monitoring of scientific works describing modern methods of optimal design. The article presents the most detailed of all approaches to solving the problem and the result of monitoring works devoted to the use of metaheuristic algorithms in optimal design.

Ключевые слова: нефтегазовая отрасль, оптимизация проектирования, строительство, пространственные конструкции, эстакады, нейронные сети, конечно-элементная модель, метаэвристические алгоритмы.

Key words: oil and gas industry, design optimization, construction, spatial structures, flyovers, neural networks, finite element model, metaheuristic algorithms.

УДК 519.85

Введение

Нефтегазовый комплекс является основой энергоснабжения России и одной из её важнейших экономических отраслей, т.к. продукция, выпускаемая данным комплексом, является сырьём для функционирования ряда других отраслей промышленности и от этого зависит выпуск их конечной продукции.

Проектирование и строительство объектов нефтегазовой отрасли обладает особой спецификой, значительно отличающейся от промышленного строительства целым рядом особенностей, из которых необходимо отметить следующие:

– необходимость производства строительных работ в сложных климатических условиях Крайнего Севера;

– рассредоточенность объектов обустройства нефтегазовых месторождений на территории всей страны, требующая строительства высокотехнологичных систем нефтегазопроводов и технологических объектов их обслуживания;

– значительная удалённость районов расположения нефтяных и газовых месторождений от крупных населённых пунктов;

– высокий класс пожаро- и взрывоопасности работ на объектах;

– значительные объёмы и продолжительность строительства.

Все вышеперечисленные проблемы ведут к значительному возрастанию стоимости добычи и транспортировки нефти и газа в сравнении с зарубежной практикой.

Неотъемлемой частью нефтегазодобычи в России является строительство нефтегазотрубопроводов. Одной из составляющих частей системы трубопроводов являются эстакады (см. рис. 1) различных типов, выполняемые преимущественно из металлических конструкций. При проектировании объёмно-планировочных и конструктивных решений данных объектов капитального строительства также необходимо обращать внимание на особенности отрасли: условия вечной мерзлоты и повышенные требования к безопасности объектов [1; 7].

Дополнительной сложностью при создании расчётных моделей эстакад является необходимость соблюдать особые требования нормативных документов [8; 9; 10]. Отметим некоторые из них:

– нормативная вертикальная нагрузка от трубопроводов на опоры и эстакады должна приниматься как сумма вертикальных нагрузок от всех трубопроводов;

– расчёт строительных конструкций отдельно стоящих опор и эстакад следует производить как плоских конструкций. При необходимости проведения уточнённых расчётов и учёта дополнительных факторов расчёт строительных конструкций отдельно стоящих опор и эстакад следует производить как расчёт пространственных систем с учётом их совместной работы с трубопроводами;

– при прокладке трубопроводов на эстакаде продольная горизонтальная нагрузка от сил трения в подвижных опорных частях труб воспринимается пролётным строением и анкерными опорами и на промежуточные опоры не передаётся.



Рис. 1. Изображение эстакады

Одним из возможных мероприятий, целью которых является снижение затрат на проектирование и строительство, является создание типовых унифицированных проектов зданий и сооружений для обустройства нефтегазовых месторождений. Данное мероприятие может быть эффективно реализовано с привлечением математического аппарата оптимизации, внедрённого на стадии проектирования несущих элементов сооружений нефтегазодобычи.

Примером унификации проектных решений может являться создание СТПК (системы типового проектирования компании), разработанной НИПИ, входящими в состав ПАО НК «Роснефть» (см. рис. 2). Данная система даёт возможность накапливать оптимальные технико-экономические проектные решения на ключевые технологические объекты и унифицированные требования на закупку оборудования и материалов для обустройства нефтегазовых месторождений в общую базу данных, которая используется в проектном производстве. Однако необходимо отметить, что оптимизация несущих конструкций сооружений пока не имеет широкого применения в реальном проектировании. Такие программные комплексы, как ЛИРА-САПР, SCAD, MicroFE, имеющие применение в практике современного российского проектирования, позволяют решать задачи поверочного расчёта, а также выполнять конструктивный расчёт в соответствии с нормативными требованиями, но в них не предусмотрены модули оптимизации.

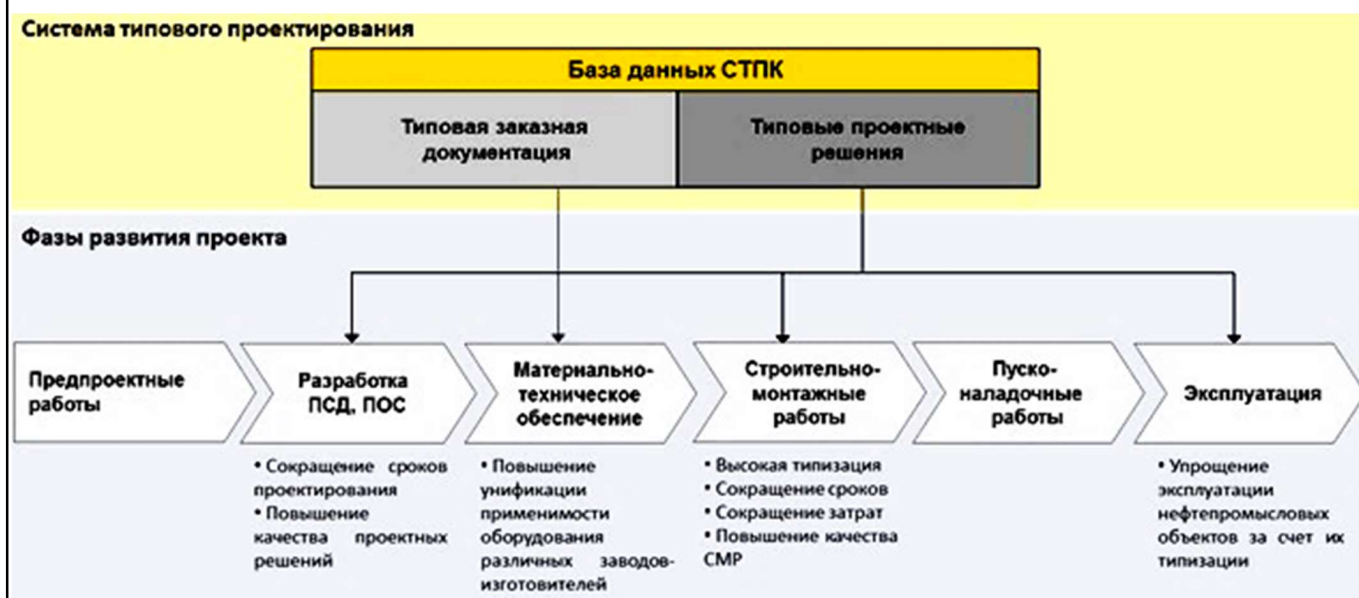


Рис. 2. Структура СТПК

Программные комплексы мирового класса (ANSYS, ABAQUS и MSC Nastran) помимо развитого аппарата КЭ анализа включают в себя модули оптимизации. Однако главной сложностью, препятствующей эффективному внедрению данных программ для задач оптимального проектирования, является отсутствие в них модуля проверок на основе российских нормативных документов и невозможность изменять сечения согласно сортаментам. По данной причине разработка эффективных алгоритмов оптимизации и программ на их основе является одной из актуальных проблем всей отрасли.

Методы решения задач оптимизации пространственных металлических конструкций

На примере эстакад как пространственных металлических конструкций рассмотрим вариант комплексного подхода к оптимальному проектированию сооружений, относящихся к нефтегазодобывающей отрасли.

Критерием оптимальности для сооружений данного типа является объём конструкции или минимальный вес. Ограничения же задаются в виде нормативных требований в соответствии с СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». Параметры состояния конструкций (напряжение, внут-

ренние усилия, узловые перемещения и т.д.) определяются путём решения задачи статического анализа.

В целом по проблеме оптимального проектирования строительных конструкций было опубликовано множество исследований российских и зарубежных учёных.

Остановимся более подробно на отдельных исследованиях, которые затрагивают вопрос оптимального проектирования пространственных конструкций.

Впервые общую постановку задачи оптимизации предложил Л. Шмит [26]. Он в своей работе отметил возможность использования расчёта конструкций с применением конечно-элементной модели и метода нелинейного программирования при наличии различных форм ограничений.

В 1991 году П. Хазела и Л. Берке представили алгоритмы оптимизации, которые были основаны на нейронной динамической модели. При решении задачи оптимизации учёные применили нейронные сети, заменяющие соотношение сила-перемещение в статическом анализе [18].

В статье 2002 года предлагают решение задачи оптимального проектирования пространственных конструкций методом практического нелинейного неупругого анализа [13] (см. рис. 3).

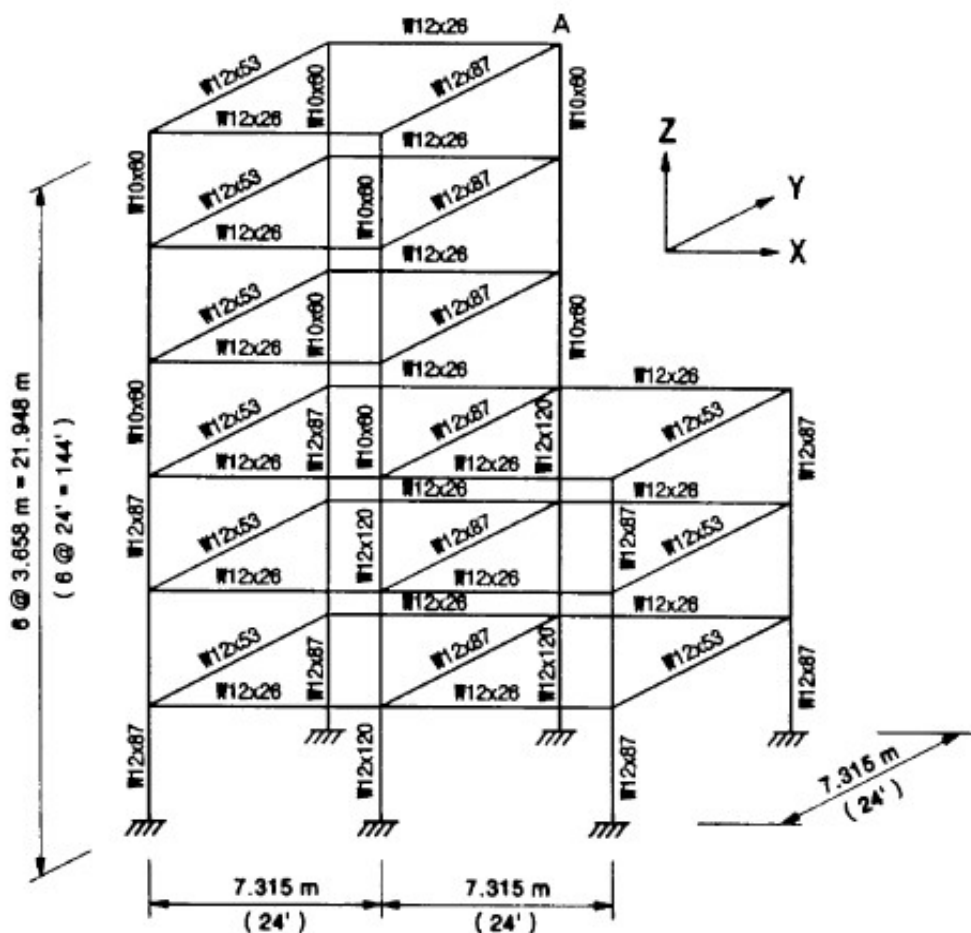


Рис. 3. Пример пространственной рамы для анализа

Работа [23] посвящена решению задачи структурной оптимизации каркасных стальных конструкций с использованием специального генетического алгоритма кодирования для установления стратегии обнаружения идеальной группировки элементов и с применением разработанного авторами штрафного метода для учёта ограничений.

Различные проблемы, возникающие при проектировании стальных конструкций промышленных объектов, в том числе многоярусных пространственных стержневых конструкций, рассматриваются в книге [15]. Особое внимание уделяется экономии и расчёту затрат, что позволяет сравнивать затраты и существенно экономить на этапах проектирования.

Алгоритм «поиска гармонии» в оптимизации проектирования стальных конструкций рассмотрен в [24].

Решение задачи оптимизации пространственных металлических конструкций с возможностью варьировать как параметры поперечного сечения, так и координаты узлов на непрерывном и дискретном диапазоне детально описано в кандидатской диссертации Ле Чан Минь Дата [6].

В монографии научных сотрудников ИРНИТУ, опубликованной в 2015 году, подробно рассматривался вопрос оптимизации в форме задачи нелинейного математического программирования и было описано применение авторской разработки ПК «РОСК» – программного комплекса по расчёту и оптимизации строительных конструкций [4].

Довольно успешно в решении задач оптимизации используется ПК ANSYS. Примеры его применения в решении задач оптимального проектирования с описанием метода аппроксимации подзадачи и метода первого порядка детально описаны в верификационном отчёте, опубликованном специалистами ЗАО НИЦ СтаДиО [3].

Ещё одним комплексом программ, эффективно применяемым для оптимального проектирования, являются MSC.Patran, MSC.Nastran, и результаты работы в них описаны в учебном пособии [2].

Следует заметить, что в последние два десятилетия особое внимание уделялось изучению метаэвристических алгоритмов решения задачи оптимального проектирования. Применение метаэвристики в оптимизации различного рода инженерных процессов чрезвычайно популярная и обсуждаемая тема в последние годы. В 2009 году была опубликована статья группы учёных, описывающая применение семи метаэвристических алгоритмов в реальном проектировании и сравнение их эффективности [17]. В статье 2016 года учёные из трёх стран в общем виде представляют работу метаэвристических алгоритмов оптимизации проектирования конструкций [25]. Также разработкам в области метаэвристики и их применению в строительстве и проектировании посвящена книга [16]. В данном издании детально описаны различные метаэвристические алгоритмы и даны практические примеры демонстрации их применения в оптимизации процесса проектирования реальных объектов.

Дадим краткое представление работ, описывающих применение метаэвристических алгоритмов. В статье [20] приведён пример использования алгоритмов оптимизации на основе метода колонии муравьёв и гармонического поиска в оптимальном проектировании пространственных стальных рам при дискретном изменении параметров сечений по критерию минимального веса с ограничениями по прочности и устойчивости. Ещё один пример наблюдения за муравьями – это так называемый «поиск с запретами», и его использование при проектировании стальных пространственных рам детально разобрано в статье [14]. Стратегия верхней границы для снижения вычислительных затрат метаэвристического алгоритма «Большого Взрыва – Большого Кризиса» (Big Bang – Big Crunch) и его модификаций, применяемых при оптимизации пространственных металлических конструкций, отражена в [22]. Статья [29] посвящена совместной работе программных комплексов MATLAB и SAP2000 при разработке алгоритма метаэвристической оптимизации на основе орлиной охоты для уменьшения металлоёмкости стальных пространственных рам.

Оптимизация при проектировании пространственных стальных конструкций при сейсмическом нагружении на основе метаэвристического алгоритма кукушки рассмотрена в [21] (см. рис. 4 и 5). Применение концепции «Производительного проектирования» и метаэвристических алгоритмов для решения задачи оптимизации внецентренно закреплённых рамных конструкций (см. рис. 6) описано в [11].

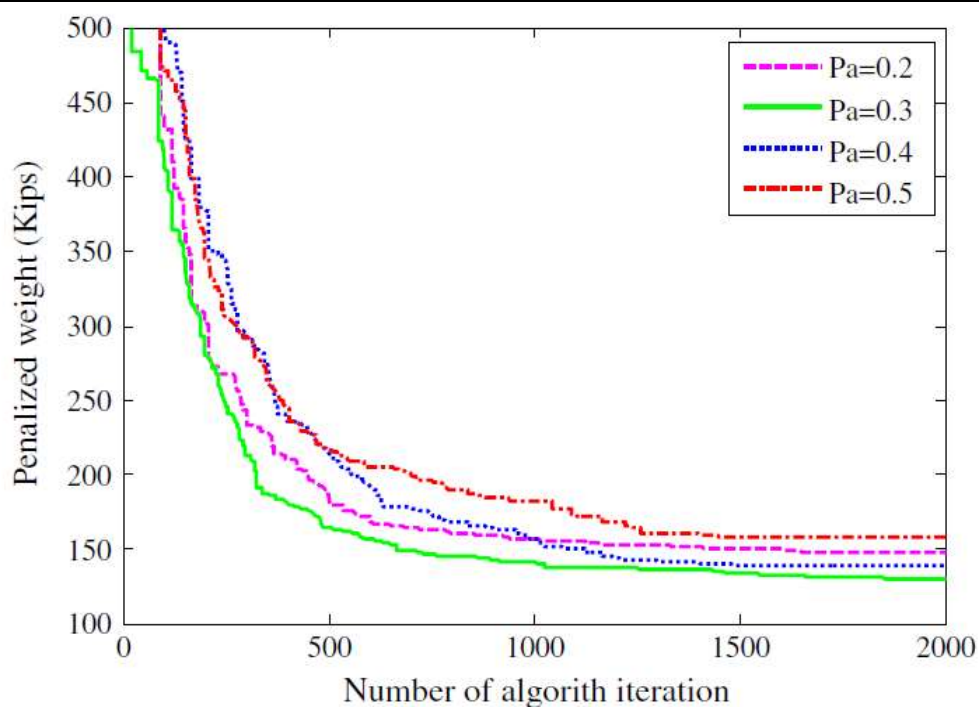


Рис. 4. Алгоритм кукушки. Кривые сходимости лучших полётов с постоянным количеством гнёзд и разной вероятностью обнаружения (P_a)

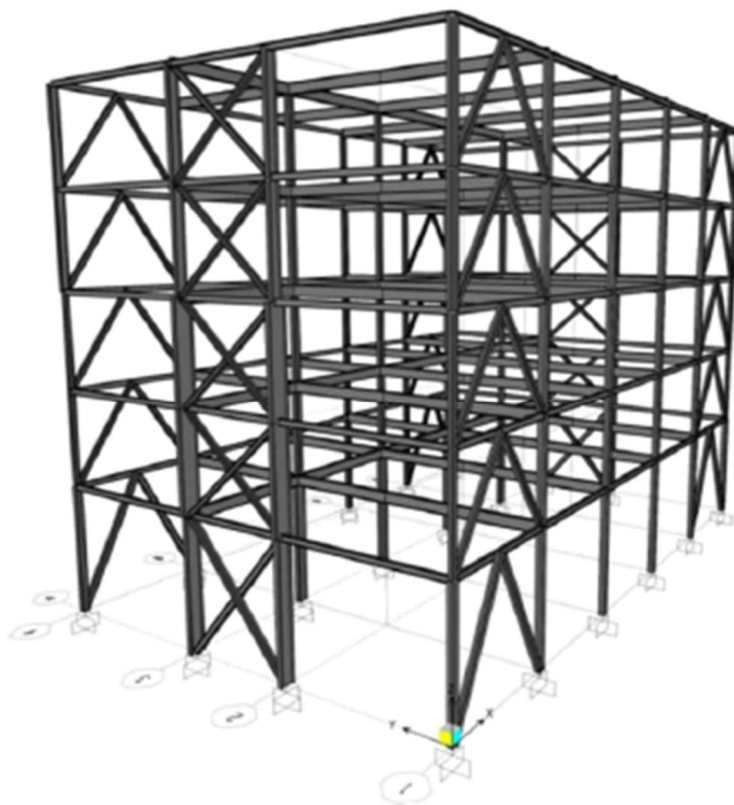


Рис. 5. Алгоритм кукушки. Пространственная рама из 325 элементов

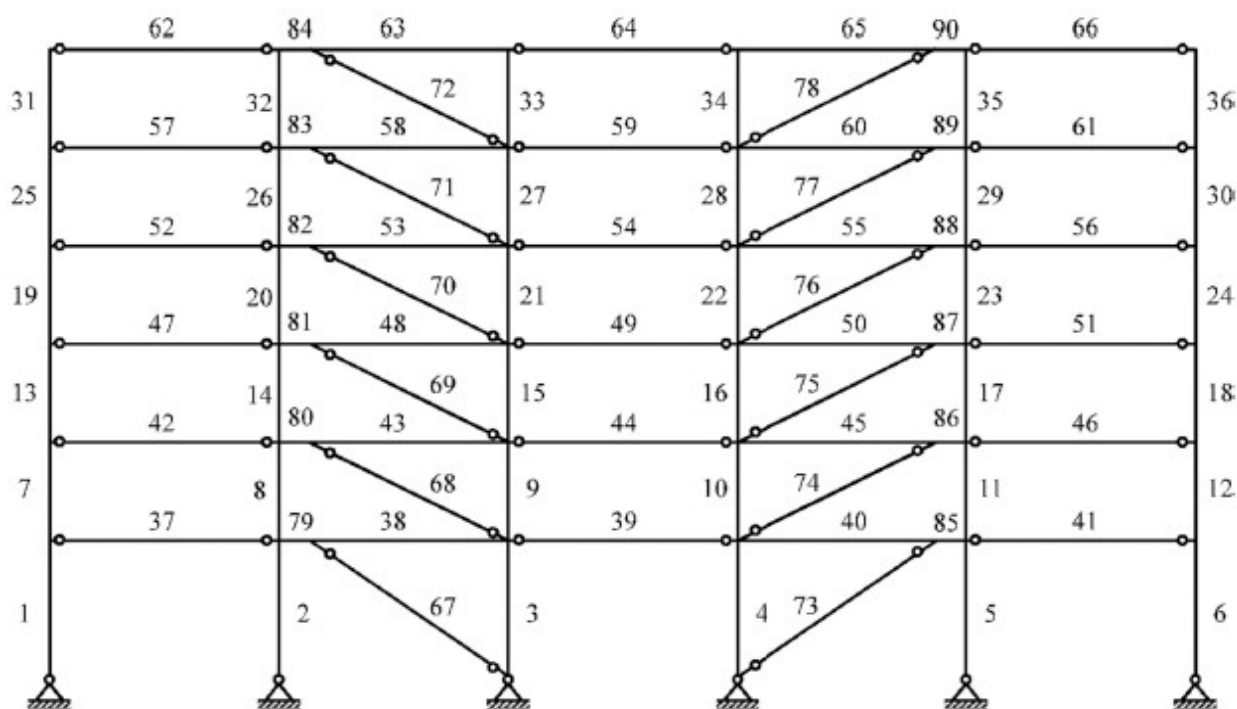


Рис. 6. Внецентренно закреплённая рамная конструкция

Довольно подробно оптимизация проектирования конструкций описана в книге Ароры «Введение в оптимальное проектирование» [12]. Данный труд на основе использования ПК Excel и MATLAB [5] демонстрирует различные подходы и процедуры на простых примерах и подтверждает их применимость в задачах инженерного проектирования.

Оптимизация проектирования отказоустойчивых конструкций, являющихся необходимыми на производственных объектах повышенной опасности, с использованием генетического метода описана в статье [27]. Вопрос оптимального проектирования стальных каркасных систем с особым вниманием к надёжности и устойчивости рассматривался и российскими учёными в статье [28]. Пути повышения надёжности отдельных элементов магистральных нефтепроводов предложены в работе [30].

Необходимо отметить, что одним из требований, предъявляемых к эстакадам, является способность воспринимать сейсмическую нагрузку. В статье [19] рассматривается вопрос оптимального проектирования пространственных сейсмостойких конструкций.

Выводы

По результатам мониторинга и анализа научных работ, посвящённых исследованию вопроса оптимального проектирования, были сделаны следующие выводы.

Расчёт и оптимизация металлических эстакад, являющихся типовыми унифицированными частями системы трубопроводов, являются актуальными и востребованными задачами. При этом рассматривается их моделирование в виде пространственных стрелевых систем.

Несмотря на то, что в области оптимизации пространственных металлических конструкций было опубликовано большое количество исследований, ни один из разработанных ранее методов не может быть использован как универсальный для решения задачи оптимального проектирования технических эстакад для нефтепроводов в соответствии с российскими нормативными документами в проектировании и строительстве.

Для дальнейшей работы над проблемой были выбраны следующие направления:

1. Построение модели задачи оптимизации линейных несущих конструкций трубопроводных систем с учётом нормативных требований.



2. Сравнительный анализ эффективности алгоритмов различных классов (градиентных, метаэвристических, алгоритмов нулевого порядка и др.) применительно к решению условно-экстремальных задач оптимизации плоских и пространственных стержневых конструкций.
3. Особая проработка вопросов отказоустойчивости конструкций при оптимизации проектирования.
4. Исследование возможности встраивания нейронных сетей в процесс оптимизации пространственных стержневых систем большой размерности.
5. Изучение вопроса оптимального проектирования сейсмостойких пространственных стержневых конструкций для регионов с активной сейсмикой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нефтегазовое строительство / В. Я. Беляева, А. М. Михайличенко, А. Н. Бараз, Р. Д. Габелая. – М.: Омега-Л, 2005. – 774 с.
2. Бормотин, К. С. Оптимальное проектирование в системах MSC.Patran, MSC.Nastran / К. С. Бормотин. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – 58 с.
3. Верификационный отчёт по программному комплексу ANSYS Mechanical // ЗАО НИЦ СтаДиО. – 2009.
4. Дмитриева, Т. Л. Реализация алгоритмов численной оптимизации в современных программных комплексах / Т. Л. Дмитриева, Ле Чан Минь Дат, Нгуен Ван Ты. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2015. – 160 с.
5. Кетков, Ю. Л. MATLAB. Программирование, численные методы / Ю. Л. Кетков, А. Ю. Кетков, М. М. Шульц. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 752 с.
6. Ле Чан Минь Дат. Численные модели и их программная реализация в задачах оптимизации пространственных металлических конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Ле Чан Минь Дат; [Место защиты: Иркутский государственный университет путей сообщения]. – Иркутск, 2016. – 173 с.
7. Мустафин, Ф. М. Строительные конструкции нефтегазовых объектов / Ф. М. Мустафин, Л. И. Быков, В. Н. Мохов. – СПб.: Недра, 2008. – 780 с.
8. Пособие по проектированию отдельно стоящих опор и эстакад под технологические трубопроводы (к СНиП 2.09.03-85). – М., 1989. – 75 с.
9. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Поправкой, с Изменением № 1).
10. СП 43.13330.2012 Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85 (с Изменениями № 1, 2).
11. Mohammad Ali Fathali, Seyed Rohollah Hoseini Vaez. Optimum performance-based design of eccentrically braced frames // Engineering Structures. – No. 202. 2020. – P. 1-15.
12. Jasbir Singh Arora. Introduction to optimum design, Third edition // Academic Press. – 8. 2011. – 896 p.
13. Se-Hyu Choi, Seung-Eock Kim. Optimal design of steel frame using practical nonlinear inelastic analysis // Engineering Structures. – No. 24. 2002. – P. 1189-1201.
14. Degertekin S. O., Hayalioglu M. S. Optimum design of steel space frames: tabu search vs. simulated annealing and genetic algorithms // Turkey International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS). – No. 1. 2009. – P. 34-45.
15. Farkas J., Jarmai K. Design and optimization of metal structures // Woodhead Publishing. – 4. 2008. – 328 p.
16. Amir Hossein Gandomi, Xin-She Yang, Siamak Talatahari, Amir Hossein Alavi. Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures // Elsevier. – 2. 2013. – 568 p.
17. Hasançebi O., Çarbas S., Dog̃an E., Erdal F., Saka M. P. Performance evaluation of metaheuristic search techniques in the optimum design of real size pin jointed structures // Computers and Structures. – No. 87. 2009. – P. 284-302.
18. Hajela P. Neurobiological Computational Models in Structural Analysis and Design / P. Hajela, L. Berke // Computers and Structures. – Vol. 41. No. 4. – 1991. – P. 657-667.
19. Aydin Hassanzadeh, Saeed Gholizadeh. Collapse-performance-aided design optimization of steel concentrically braced frames // Engineering Structures. – No. 197, 2019. – P. 1-15.
20. Ibrahim A. Optimum design of 3-D irregular steel frames using ant colony optimization and harmony search algorithms / A. Ibrahim // Monograph. – 8. 2010. – 185 p.
21. Kaveh A., Bakhshpoori T., Azimi M. Seismic optimal design of 3D steel frames using cuckoo search algorithm // Struct. Design Tall Spec. Build. – No. 24. 2015. – P. 210-227.
22. Kazemzadeh Azad S., Hasançebi O., Kazemzadeh Azad S. Upper bound strategy for metaheuristic-based design optimization of steel frames // Advances in Engineering Software. – No. 57. 2013. – P. 19-32.

23. Afonso C. C. Lemongea, Helio J. C. Barbosa, Alvaro L. G. A. Coutinho, Carlos C. H. Borges. Multiple cardinality constraints and automatic member grouping in the optimal design of steel framed structures // Engineering Structures. – No. 33. 2011. – P. 433-444.
24. Patrick Murren, Kapil Khandelwal. Design-driven harmony search (DDHS) in steel frame optimization // Engineering Structures. – No. 59. 2014. – P. 798-808.
25. Saka M. P., Hasançebi O., Geem Z. W. Metaheuristics in structural optimization and discussions on harmony search algorithm // Swarm and Evolutionary Computation. – No. 28. 2016. – P. 88-97.
26. Schmit L. A. Structural design by systematic synthesis / L. A. Schmit // Proceedings of second ASCE Conference of Electronic Computation. – 1960. – P. 105-122.
27. Serafinska A., Özenç K. and Kaliske M. A coupled approach of optimization, uncertainty analysis and configurational mechanics for a fail-safe design of structures // International journal for numerical methods in engineering. No. 109. 2016. – P. 125-152.
28. Serpik I., Alekseytsev A. Optimization of steel frame building systems in terms of parameters and reliability requirements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. – 8 p.
29. Siamak Talatahari, Amir Hossein Gandomi, Xin-She Yang, Suash Deb. Optimum design of frame structures using the Eagle Strategy with Differential Evolution // Engineering Structures. – No. 91. 2015. – P. 16-25.
30. Иванов, С. Н. Повышение эффективности электропривода магистральных задвижек / С. Н. Иванов, К. К. Ким // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2020. – № 3. – С. 71-77.
31. Анализ влияния конструкционных факторов на надёжность герметичных электромеханических преобразователей / Д. А. Голоколос, Н. С. Карпова, С. Н. Иванов, К. К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2013. – № IV-1(16). – С. 29-34.



Ким К. И., Ким К. К.
K. I. Kim, K. K. Kim

ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ В РЕЖИМЕ НАБРОСА НАГРУЗКИ

DYNAMIC STABILITY OF AN ASYNCHRONOUS MACHINE IN LOAD-SHIFTING MODE

Ким Константин Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта (Россия, Санкт-Петербург); тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Mr. Konstantin I. Kim – Dr. Sc., Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения (Россия, Санкт-Петербург); тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Mr. Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head of Theoretical Electrical Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы динамической устойчивости асинхронной машины при переходных режимах. Получены выражения для определения максимального значения ускорения, называемого граничным, при котором динамическая характеристика моментов практически совпадает со статической. Величина граничного ускорения показывает целесообразность учёта изменения скорости без сложного расчёта переходных процессов. Динамическая устойчивость зависит от формы и величины сообщаемой нагрузки, поэтому задача решена при допущении постоянства ускорения ротора. Проведён анализ критерия динамической устойчивости при различных значениях ускорения и коэффициента затухания роторной обмотки. Приведены расчётные результаты в виде кривых зависимости критерия от ускорения при параметрически заданных значениях коэффициента затухания. Показано, что величина максимального момента зависит не только от ускорения, но и от коэффициента затухания роторной обмотки и начального скольжения. Определена область применения полученных результатов, в частности для пусковых режимов двигателей.

Summary. The article considers issues of dynamic stability by an asynchronous machine during transient conditions. Expressions are obtained for determining the maximum value of acceleration, called the boundary value, at which the dynamic characteristic of the moments practically coincides with the static one. The magnitude of the boundary acceleration shows the feasibility of taking into account the change in speed without complicated calculation of transients. Dynamic stability depends on the shape and magnitude of the reported load, so the problem is solved under the assumption of constant rotor acceleration. The analysis of the dynamic stability criterion for various values of acceleration and attenuation coefficient of the rotor winding is carried out. The calculated results are presented in the form of curves of the dependence of the criterion on acceleration at parametrically specified values of the attenuation coefficient. It is shown that the maximum moment depends not only on acceleration, but also on the attenuation coefficient of the rotor winding and the initial slip. The scope of the results obtained is determined, in particular for engine starting conditions.

Ключевые слова: асинхронная машина, динамическая устойчивость, критерий устойчивости, ускорение ротора.

Key words: asynchronous machine, dynamic stability, stability criterion, rotor acceleration.

УДК 621.3.019

Введение.

Вращающий момент асинхронной машины в переходных режимах, связанных с изменением скорости, в существенной мере может отличаться от момента, получаемого по статической характеристике. Очевидно, эта разница будет тем значительнее, чем больше ускорение ротора при

прочих равных условиях. Также очевидно, что по мере уменьшения ускорения действительная характеристика моментов будет приближаться к статической и начиная с некоторого значения дальнейшего его уменьшение уже не скажется на величине вращающих моментов.

В связи с этим в настоящей статье рассматривается вопрос об определении максимального значения ускорения, при котором динамическая характеристика моментов практически совпадает со статической. В дальнейшем это ускорение будет называться граничным. Если знать его величину, нетрудно выяснить целесообразность учёта изменения скорости, не производя подробного расчёта переходных процессов.

Определение динамической устойчивости асинхронной машины в режиме наброса нагрузки.

Предварительно остановимся на вопросах, связанных с расчётом динамической устойчивости машины при внезапном приложении механической нагрузки. Эти вопросы, как будет видно из последующего, имеют не только самостоятельное значение, но и позволяют получить достаточно простое уравнение для расчёта ускорения ротора.

При заданных значениях параметров и инерционной постоянной системы характеристика вращающих моментов, следовательно, и величина максимального момента, которым и определяется динамическая устойчивость, зависят от формы и величины сообщаемой нагрузки. В практических случаях внезапного приложения механической нагрузки, последняя может изменяться весьма различным образом. Поэтому более или менее точное определение максимального момента возможно лишь при наличии конкретных условий. Нами эта задача рассматривается применительно к случаям, когда в пределах от начала процесса до максимальной точки включительно ускорение ротора можно считать постоянным.

Критерий динамической устойчивости (t_m) определяется из следующего уравнения:

$$\frac{dM}{dt} = 0.$$

Дифференцируя выражение для вращающих моментов [1] и приравнявая его нулю, найдём

$$\begin{aligned} & \left[F_s'(t) + \frac{\rho_2}{\rho_2^2 + s_0^2} \right] \left[-\rho_2 \sin \left(s_0 t + \frac{at^2}{2} \right) + s \cos \left(s_0 t + \frac{at^2}{2} \right) \right] + \left[F_s''(t) + \frac{s_0}{\rho_2^2 + s_0^2} \right] \times \\ & \times \left[\rho_2 \cos \left(s_0 t + \frac{at^2}{2} \right) + s \sin \left(s_0 t + \frac{at^2}{2} \right) \right] = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Полученное уравнение относительно величины в общем виде не решается. Попробуем упростить это уравнение, используя известный нам способ преобразования интегралов $F_s'(t)$ и $F_s''(t)$. При этом в соотношениях учтём только члены f_{s1} и f_{c1} . Тогда на основании $\sin(\frac{at^2}{2}) = \frac{\pi}{8} at^2$, $\cos(\frac{at^2}{2}) = \frac{\pi^2}{8} (1 - \frac{at^2}{\pi})$ найдём

$$\begin{aligned} F_s'(t) = & \frac{\cos \left(s_0 t + \frac{at^2}{2} \right) + k \sin \left(s_0 t + \frac{at^2}{2} \right)}{\rho_2 (1 + k^2)} e^{\rho_2 t} - \frac{\pi^2}{8 \rho_2 (1 + k^2)} \times \\ & \times \left\{ 1 - \frac{ae^{\rho_2 t}}{\pi \rho_2 (1 + k^2)} \left[((1 + 2k - k^2)2t - \frac{2 - 6(k - k^2)}{\rho_2 (1 + k^2)}) \sin(s_0 t) + ((1 - 2k - k^2) \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times 2t - \frac{2 - 6(k + k^2)}{\rho_2 (1 + k^2)} \cos(s_0 t)) - \frac{6(k^2 + k) - 2}{\rho_2 (1 + k^2)} e^{-\rho_2 t} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$F_s''(t) = \frac{\sin\left(s_0 t + \frac{at^2}{2}\right) - k \cos\left(s_0 t + \frac{at^2}{2}\right)}{\rho_2(1+k^2)} e^{\rho_2 t} +$$

$$+ \frac{\pi^2}{8\rho_2(1+k^2)} \left\{ k + \frac{ae^{\rho_2 t}}{\pi\rho_2(1+k^2)} \left[((1-2k-k^2)2t - \right. \right. \quad (3)$$

$$\left. \left. - \frac{2-6(k+k^2)}{\rho_2(1+k^2)} \right) \sin(s_0 t) - ((1+2k-k^2) - \frac{2-6(k-k^2)}{\rho_2(1+k^2)} \cos(s_0 t)) + \right.$$

$$\left. + \frac{6(k^2-k)-2}{\rho_2(1+k^2)} e^{-\rho_2 t} \right\},$$

где $k = \frac{s_0}{\rho_2}$.

Подставляя выражения (2) и (3) в уравнение (1), получим

$$\rho_2 \pi t_m + 1,25 \left\{ \left[-(1+2k)2\rho_2 t_m + 2 + 6k - \frac{s}{\rho_2} (-(1-2k)2\rho_2 t_m + \right. \right.$$

$$\left. \left. + 2 - 6k) \right] \cos\left(\frac{at_m^2}{2}\right) + [-(1-2k)2\rho_2 t_m + 2 - 6k + \frac{s}{\rho_2} (-(1+2k)2\rho_2 t_m + \right.$$

$$\left. \left. + 2 + 6k) \right] \sin\left(\frac{at_m^2}{2}\right) \right\} + 1,25 e^{-\rho_2 t} \left\{ \left[-\frac{s}{\rho_2} (6k+2) + 6k - 2 + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{0,2\pi\rho_2}{a} (sk + \rho_2^2) \right] \sin(s_0 t_m + \frac{at_m^2}{2}) + \left[-\frac{s}{\rho_2} (6k-2) - 6k - 2 + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{0,2\pi\rho_2}{a} (-s+k) \right] \cos(s_0 t_m + \frac{at_m^2}{2}) \right\} = 0.$$

Обычно в режимах внезапного приложения механической нагрузки начальное скольжение достаточно мало ($s_0 < s_H$), так что $k \ll 1$.

Поэтому, положив $s_0 = 0$, будем иметь

$$\rho_2 \pi t_m + 2,5 \left(\frac{1 - e^{-\rho_2 t_m}}{\rho_2} - t_m \right) \left[(\rho_2 + at_m) \sin\left(\frac{at_m^2}{2}\right) + (\rho_2 - at_m) \cos\left(\frac{at_m^2}{2}\right) \right] +$$

$$+ 0,25 \frac{\rho_2 \pi}{a} e^{-\rho_2 t_m} \left[\rho_2 \sin\left(\frac{at_m^2}{2}\right) - at_m \cos\left(\frac{at_m^2}{2}\right) \right] = 0. \quad (4)$$

Представляя величину $e^{-\rho_2 t}$ в виде ряда с учётом первых трёх его членов и пренебрегая слагаемыми с коэффициентом 0,25 ввиду их незначительности по сравнению с другими, получим весьма простое уравнение для определения приближённого значения:

$$\pi - 1,25 t_m \left[(\rho_2 + at_m) \sin\left(\frac{at_m^2}{2}\right) + (\rho_2 - at_m) \cos\left(\frac{at_m^2}{2}\right) \right] = 0.$$

Так как коэффициент затухания роторной обмотки – малая величина, то из полученного уравнения со всей очевидностью вытекает, что критерий динамической устойчивости находится вблизи точки

$$\tau = \sqrt{\frac{\pi}{a}}.$$

Учитывая сказанное, с помощью уравнения (4) можно найти уточнённое значение t_m .

На основе указанного уравнения производился численный подсчёт критерия t_m при различных значениях ускорения и коэффициента затухания роторной обмотки. Результаты подсчёта представлены на рис. 1 в виде кривых зависимости $\frac{t_m}{\tau}$ от ускорения при параметрически заданных значениях коэффициента затухания. Ускорение дано в относительных единицах, причём за его единицу принято ускорение, соответствующее режиму изменения скорости от 0 до 1 в течение одного электрического радиана. Из приведённых кривых видно, что величина $\frac{t_m}{\tau}$ практически не зависит от ускорения и приближённо составляет 0,94.

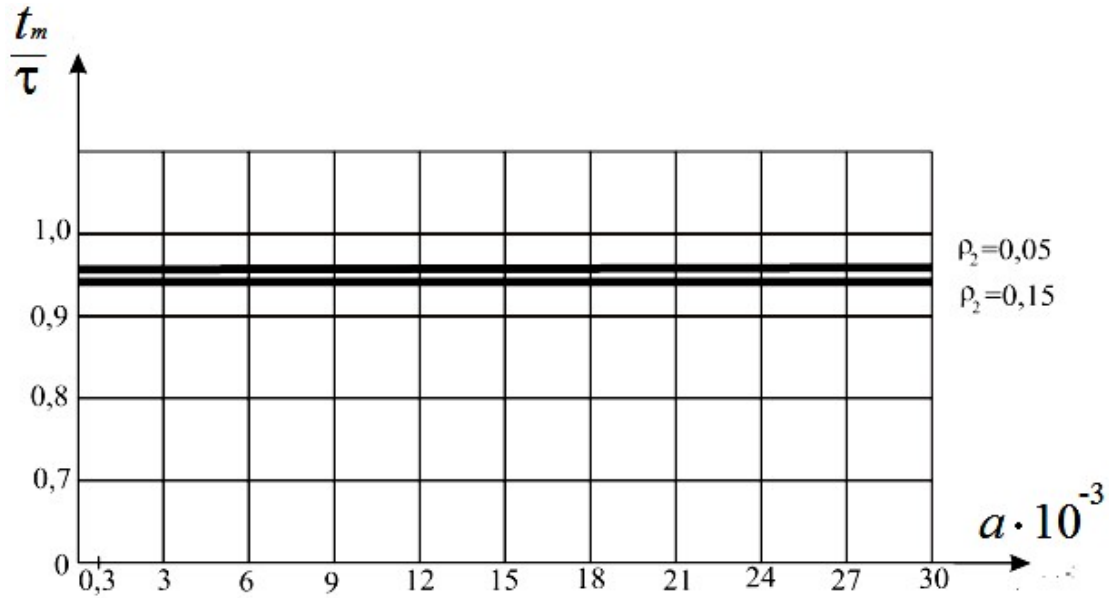


Рис. 1. Значения критерия $\frac{t_m}{\tau}$ при различных значениях ускорения и коэффициента затухания роторной обмотки

Таким образом, при практически возможных значениях параметров машин критерий динамической устойчивости приобретает следующий вид:

$$t_m = 0,94 \sqrt{\frac{\pi}{a}}. \quad (5)$$

Из полученного выражения следует, между прочим, что с увеличением ускорения точка максимального момента смещается в сторону больших скольжений.

На основании изложенного нетрудно получить выражение для максимального значения момента. Подставляя вместо $F'_s(t)$ и $F''_s(t)$ их значения согласно зависимостям (2) и (3) и учитывая формулу (5), после ряда преобразований и упрощений можно получить

$$M_m = \frac{U_{m1}^2(1-\sigma)}{x'_1(1+k^2)} \left\{ k - 0,25(1+k)e^{-\rho_2 t_m} - \frac{1,25a}{\pi \rho_2(1+k^2)} \times \right. \\ \times \left[(4k - 2(1-k^2))t_m - \frac{6(k^2+k)-2}{\rho_2(1+k^2)} + \right. \\ \left. + e^{-\rho_2 t_m} \left(\frac{6(k^2+k)-2}{\rho_2(1+k^2)} \cos(s_0 t_m) - \frac{6(k^2-k)-2}{\rho_2(1+k^2)} \sin(s_0 t_m) \right) \right] \right\}. \quad (6)$$

Соответственно, при $k = 0$ будем иметь

$$M_m = -2,5 \frac{U_{m1}^2(1-\sigma)a}{x_1' \rho_2} \left(\frac{1-e^{-\rho_2 t_m}}{\rho_2} - t_m \right) - 0,25 \frac{U_{m1}^2(1-\sigma)}{x_1'} e^{-\rho_2 t_m}. \quad (7)$$

На основании полученных формул (5) и (6) были произведены численные подсчёты максимального момента и критерия устойчивости при следующих параметрах и ускорениях ротора:

1. $r_1 = r_2 = 0,01$; $x_1 = x_2 = 3,07$; $x_{12} = 2,99$; $s_0 = 0,01$; $a = \frac{1}{12\pi}$; $a = \frac{1}{24\pi}$; $a = \frac{1}{48\pi}$;
2. $r_1 = r_2 = 0,0157$; $x_1 = x_2 = 3,07$; $x_{12} = 2,9$; $s_0 = 0,01$; $a = \frac{1}{24\pi}$; $a = \frac{1}{48\pi}$.

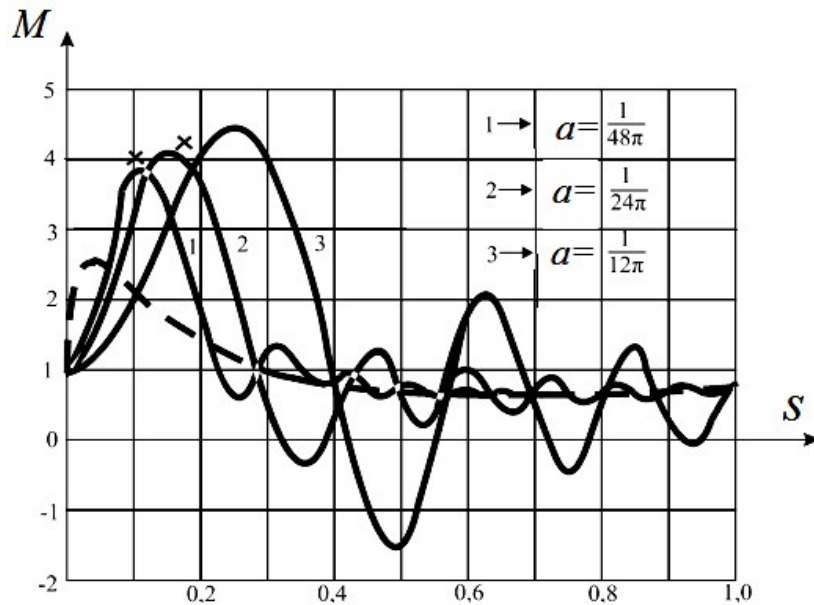


Рис. 2. Значения максимального момента и критерия устойчивости при $r_1 = r_2 = 0,01$

Результаты расчётов соответственно представлены на рис. 2 и 3 значком (x). Кроме того, на рис. 2 для сравнения даны характеристики вращающих моментов, заимствованные из литературы [7]; на рис. 3 – кривые моментов, полученные с помощью выражений [1]. Как видно, совпадение является вполне удовлетворительным.

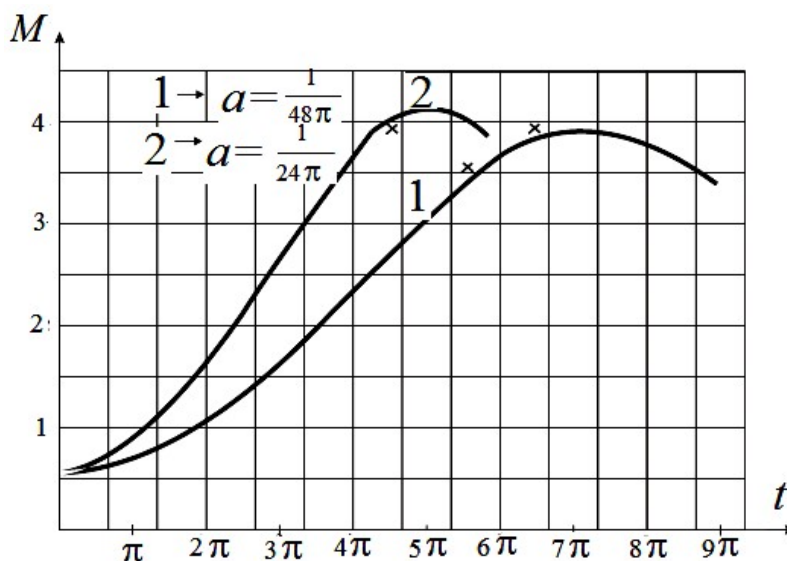


Рис. 3. Значения максимального момента и критерия при $r_1 = r_2 = 0,0157$

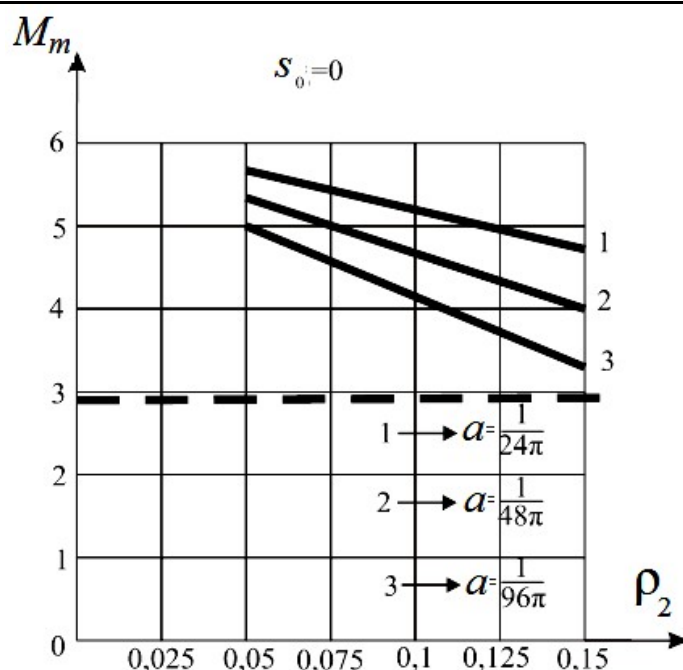


Рис. 4. Зависимость момента от коэффициента затухания роторной обмотки при $s_0 = 0$

Из выражения (6) видно, что величина максимального момента зависит не только от ускорения, но и от таких величин, как коэффициент затухания роторной обмотки и начальное скольжение. Для выяснения влияния последних на величину M_m был рассмотрен ряд конкретных примеров. Для наглядности результаты расчётов представлены в виде кривых на рис. 4–9.

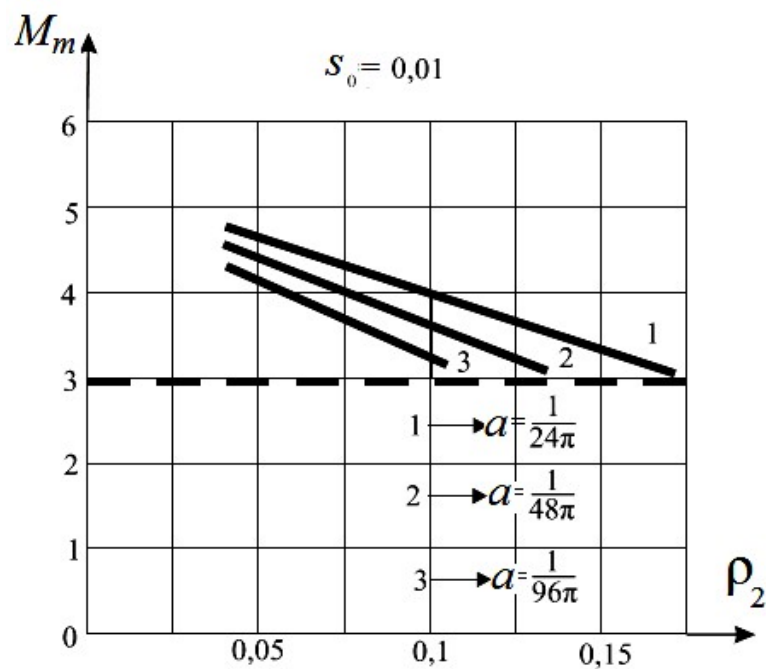


Рис. 5. Зависимость момента от коэффициента затухания роторной обмотки при $s_0 = 0.01$

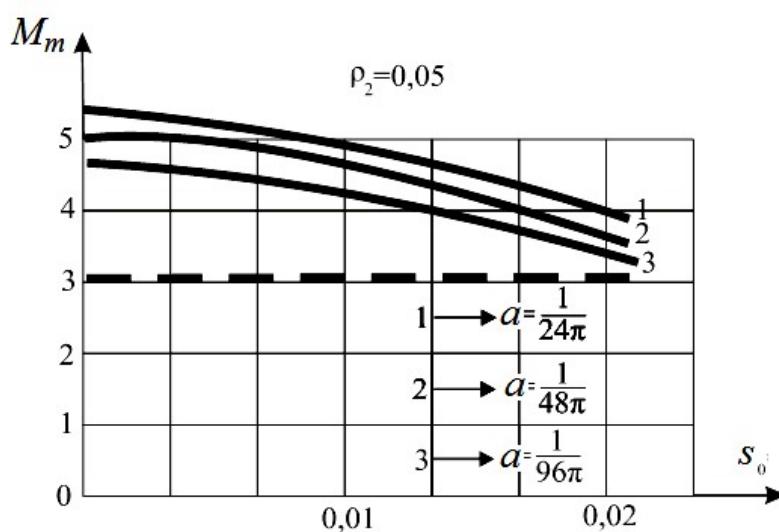


Рис. 6. Зависимость момента от скольжения при $\rho_0 = 0,05$

Из рисунков видно следующее:

1. С возрастанием активного сопротивления роторной обмотки величина максимального момента уменьшается.

2. На величину максимального момента влияет начальное скольжение, причём это влияние оказывается тем больше, чем меньше активное сопротивление ротора.

3. При малых ускорениях начальное скольжение можно не учитывать.

При прочих разных условиях с возрастанием ускорения динамическая устойчивость повышается.

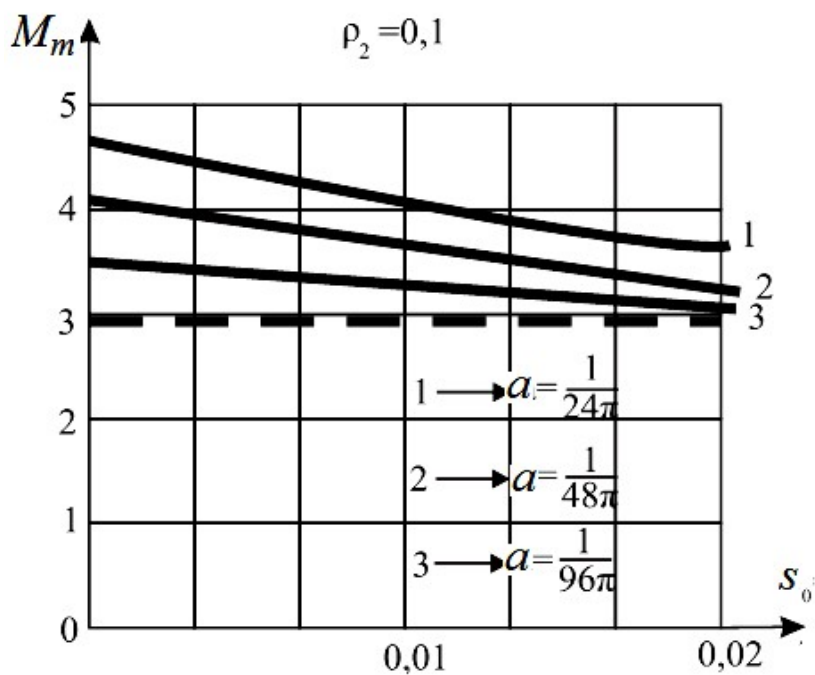


Рис. 7. Зависимость момента от скольжения при $\rho_0 = 0,1$

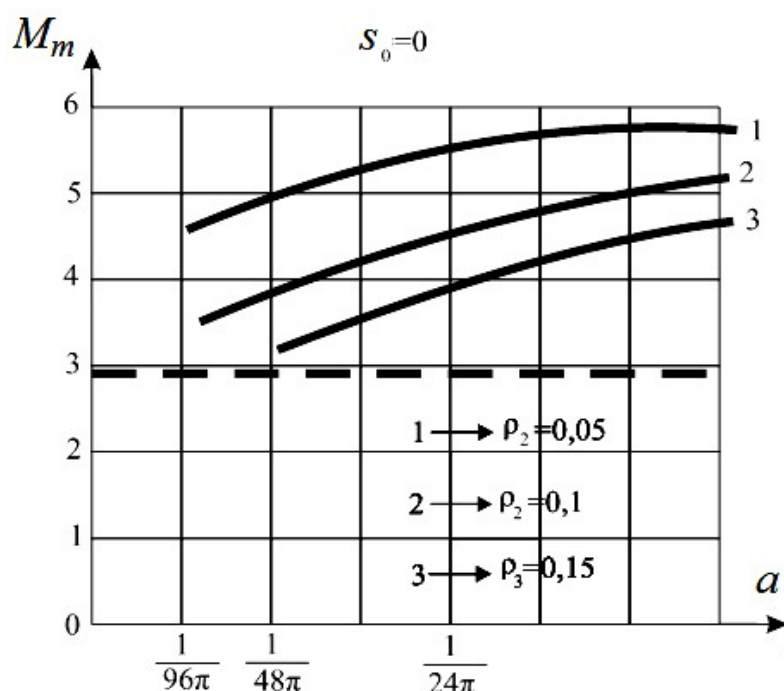


Рис. 8. Зависимость момента от ускорения при $s_0 = 0$

В заключение отметим, что приведённые выше формулы (5), (6) и (7) могут быть использованы и для ориентировочной оценки динамической устойчивости в случаях, когда ускорение ротора, строго говоря, не является постоянным. Например, допустим, что требуется определить приближённое значение максимального момента в режиме наброса нагрузки, имеющей прямоугольную форму. Причём известно, что $s_0 = 0$.

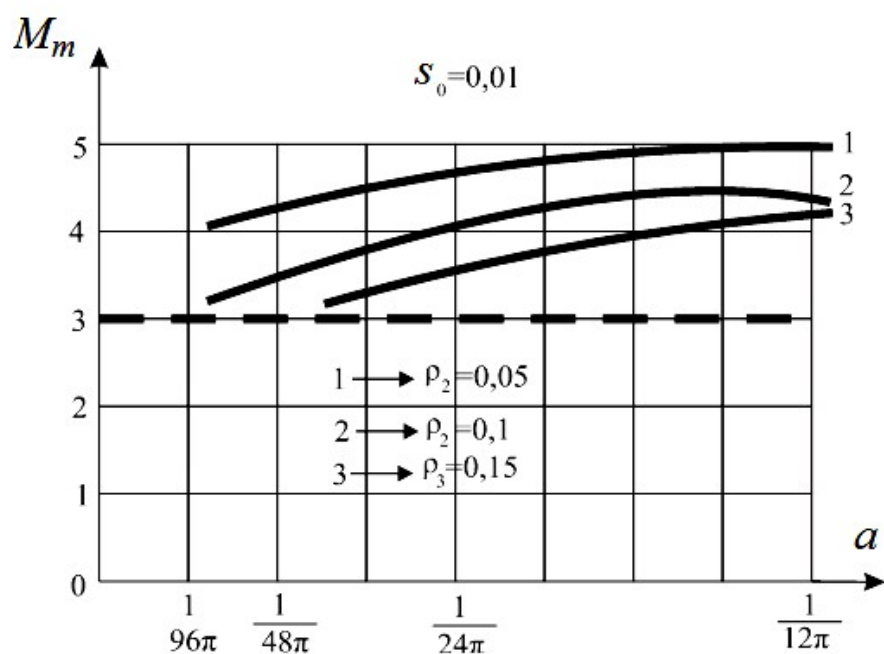


Рис. 9. Зависимость момента от ускорения при $s_0 = 0,01$

На основании уравнения

$$2,5 \frac{U_{m1}^2 (1 - \sigma) a}{x_1' \pi \rho_2} \left(\frac{1 - e^{-\rho_2 t_m}}{\rho_2} - t_m \right) + 0,25 \frac{U_{m1}^2 (1 - \sigma) a}{x_1'} e^{-\rho_2 t_m} + M_c + Ha = 0 \quad (8)$$

находим ускорение, используя для этого случая следующий способ итерации:

- задаваясь некоторым ускорением, по формуле (5) определяем критерий t_m ;
- используя указанные величины, производим подсчёт левой части уравнения (8);
- операцию продолжаем до тех пор, пока уравнение (8) не будет удовлетворено в известном смысле.

Подставляя полученное ускорение в выражение (7), находим величину максимального момента.

Заметим, что таким же путём может быть получена приближённая оценка устойчивости и в случаях, когда сообщаемая нагрузка имеет иной график.

Граничное ускорение.

В соответствии с данным выше определением, граничное ускорение должно удовлетворять следующему уравнению:

$$\Delta M = 0, \quad a = a_{гр.}, \quad (9)$$

где ΔM – дополнительный момент, равный разности переходных и статических моментов, т.е.

$$\Delta M = M - \frac{U_{m1}^2 (1 - \sigma) \rho_2}{x_1'} \frac{s}{\rho_2^2 + s^2},$$

причём M определяется по [1]; $a_{гр.}$ – граничное ускорение. Для правильного подхода к анализу уравнения (9) обратимся к приведённым на рис. 2 кривым для вращающихся моментов. Из этих кривых видно, что динамическая характеристика моментов в зависимости от величины ускорения и активного сопротивления роторной обмотки принимает весьма различный вид. При этом величина дополнительного момента зависит как от указанных параметров, так и от мгновенного значения скорости ротора. В частности, при малых скоростях дополнительный момент весьма незначителен, тогда как при больших скоростях этот момент приобретает достаточно большое значение. Причина этого лежит в том, что свободные токи, как указывалось выше, достигают наибольшей величины в области малых скольжений. Одновременно заметим, что дополнительный момент образуется главным образом за счёт взаимодействия свободных токов с установившимся током, в чём и находит объяснение колебательный характер кривой результирующих моментов при достаточно значительных скольжениях.

Таким образом, при заданных параметрах машины в зависимости от величины скорости уравнению (9) будут удовлетворять различные значения граничных ускорений, иными словами, условия равенства динамических и статических моментов в различных точках будут неодинаковы. По изложенной причине уравнение (9), вообще говоря, должно дать решение в виде

$$a_{гр.} = f(s, \rho_2),$$

поскольку все другие параметры автоматически отпадают. Здесь s – мгновенное значение скольжения.

Однако получение такого вида решения представляет достаточно сложную и в то же время не необходимую задачу.

Попытаемся выразить граничное ускорение через коэффициент затухания роторной обмотки. Для этого придётся рассмотреть по одной точке на каждой из характеристик (динамической и статической). Задача заключается в том, чтобы в качестве такой точки выбрать точку, характерную для наиболее важной части динамической характеристики. С этой целью на основании уравнения (9) производился численный подсчёт граничного ускорения при различных значениях скольжения и при $\rho_2 = 0,05$.

Результаты расчётов, представленные на рис. 10 (кривая построена в относительных единицах, причём за условную единицу принято $a_{гр.}$ при $s = s_m$), показывают, что в качестве указанной точки может быть выбрана точка s_m . Соответствующее ей граничное ускорение, как видно из рис. 10, является несколько завышенным для $s < s_m$, а для $s > s_m$ – заниженным. Необходимо заметить, что при $\rho_2 > 0,05$ получили бы аналогичную кривую $a_{гр.} = f(s)$ с той лишь разницей, что эта кривая была бы смещена в сторону больших скольжений в соответствии с величиной критерия статической устойчивости.

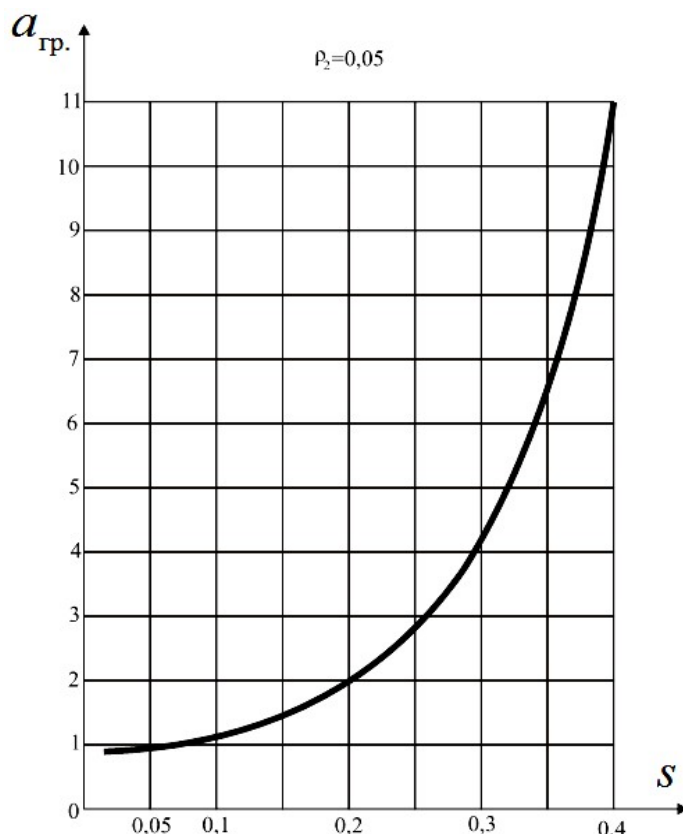


Рис. 10. Зависимость ускорения от скольжения при $\rho_0 = 0,05$

Таким образом, для определения граничных ускорений можно использовать следующее уравнение:

$$M_m = M_{m.ст.}$$

Тогда, подставляя вместо M_m его значение согласно формуле (7), получим

$$-2,5 \frac{U_{m1}^2 (1 - \sigma) a_{гр.}}{x_1' \rho_2} \left(\frac{1 - e^{-\rho_2 t_m}}{\rho_2} - t_m \right) - 0,25 \frac{U_{m1}^2 (1 - \sigma)}{x_1'} e^{-\rho_2 t_m} = M_{m.ст.}$$

Здесь величина t_m зависит от ускорения (формула (5)). Поэтому приведенное уравнение может быть решено относительно ускорения только численными методами. Результаты численных расчётов, произведённых при различных значениях коэффициента затухания роторной обмотки, представлены на рис. 11 в виде кривой $a_{гр.} = f(\rho_2)$. Координаты этой кривой представим таблицей в следующей форме

$a_{гр.}$	ζ	ζ	ζ	ζ
ρ_2	κ	κ	κ	κ

где $\zeta = 0,00015$; $\kappa = 0,025$.

Из приведённой таблицы нетрудно видеть, что $a_{гр.} = c\rho_2^2$, где $c = \frac{\zeta}{\kappa^2} = 0,24$.

Таким образом, для граничного ускорения имеем следующее выражение:

$$a_{гр.} = 0,24\rho_2^2, \quad (10)$$

т.е. с изменением коэффициента затухания роторной обмотки граничное ускорение изменяется по параболическому закону.

Для большинства типов асинхронных машин коэффициент затухания роторной обмотки лежит в пределах от 0,05 до 0,2. Причём нижний из указанных пределов относится к крупным машинам, высший – к мелким. Таким образом, совершенно очевидно, следует, что область, в которой необходимо учитывать изменение скорости, с увеличением габарита машины расширяется.

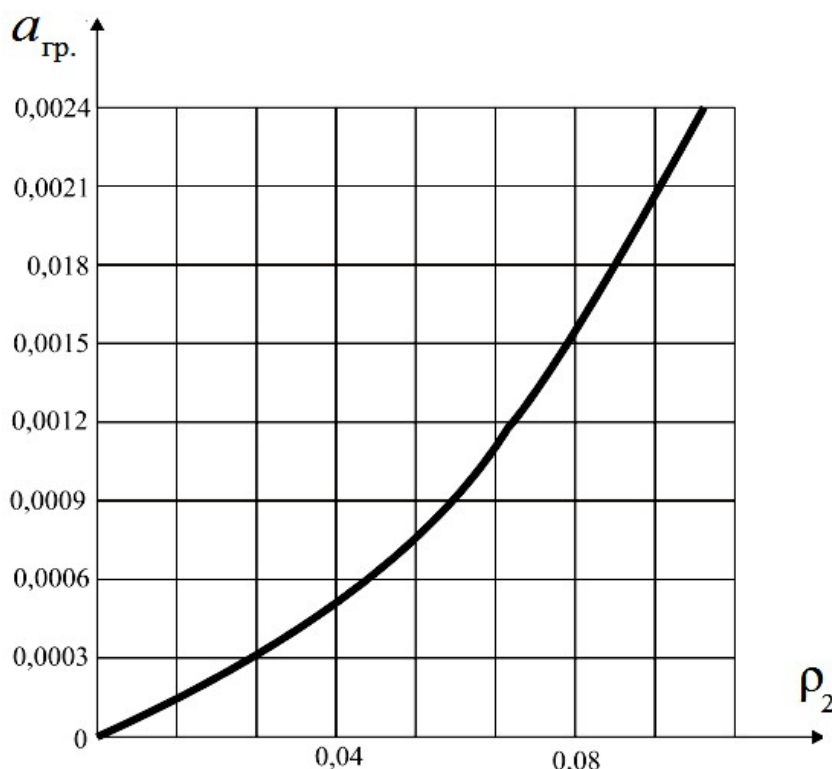


Рис. 11. Зависимость ускорения от коэффициента затухания роторной обмотки

Одновременно заметим, что коэффициент затухания роторной обмотки приблизительно равен скольжению опрокидывания по статической характеристике моментов. Таким образом, можно сказать, что граничное ускорение тем меньше, чем больше реактанс короткого замыкания при данном активном сопротивлении ротора.

Перейдём к вопросу о применении указанной формулы при расчётах переходных процессов.

Задача заключается в том, чтобы при заданном графике сообщаемой нагрузки и при известных параметрах системы, включая инерционную постоянную, выяснить вопрос о необходимости учёта ускорения. Для этого поступаем следующим образом. На основании формулы (10) определяем граничное ускорение для данной машины. Строим кривую моментов нагрузки $M_{с.гр.}$, которая вызвала бы ускорение, равное граничному, используя следующее выражение:

$$M_{с.гр.} = \frac{U_{m1}^2(1 - \sigma)\rho_2}{x_1'} \frac{s}{\rho_2^2 + s^2} + Ha_{гр.}$$

Здесь инерционная постоянная (H) выражена в электрических радианах.

Полученную кривую непосредственно сравниваем с графиком нагрузки при условии, что последний представлен в виде $M_c = f(s)$. Если же этот график дан в функции времени, то кривую $M_{с.гр.} = f(s)$ приводим в соответствие с указанным графиком с помощью выражения

$$s = s_0 - a_{гр.}t.$$

Если в результате сравнения окажется, что $M_c \gg M_{с.гр.}$, то для расчёта характеристик нужно использовать метод, рассмотренный в [1].

Некоторые замечания.

Полученное выше выражение для граничного ускорения может быть использовано и при рассмотрении режимов разгона двигателя. Покажем это, исходя из чисто физических рассуждений.

Выражение для вращающих моментов в режиме, когда $s = s_0 + at$, может быть написано следующим образом:

$$M_{д.} = Ra^2 - Qa + N.$$

В случае, когда $s = -(s_0 + at)$, указанное выражение, нетрудно заметить, приобретает такой вид:

$$M_{г.} = -[Ra^2 - Qa + N],$$

где индексы «д.» и «г.» – соответственно означают двигательный и генераторный режимы.

Таким образом, при условии равенства начальных скольжений, а также и ускорений имеем следующее соотношение:

$$M_{д.}(s) = -M_{г.}(-s),$$

т.е. характеристики двигательных и генераторных моментов симметричны относительно точки $s = 0$. Это обстоятельство позволяет утверждать, что выражение (10) сохраняет силу и в режимах, протекающих при сверхсинхронной скорости.

Теперь представим случай разгона двигателя до скорости, большей, чем синхронная. При этом очевидно, что та часть характеристики, которая лежит в области генераторных скольжений, не совпадает с характеристикой, соответствующей случаю разгона от синхронной скорости при таком же ускорении, что и в первом случае.

Причиной этому служит то обстоятельство, что возникающие при $s > 0$ свободные токи существуют и при $s < 0$. Указанные характеристики совпадут лишь при наличии одинаковых условий в точке $s_0 = 0$. Этого можно добиться либо увеличением активного сопротивления роторной обмотки, либо уменьшением ускорения. Допустим, что в процессе уменьшения ускорения указанные характеристики совпали. Это, очевидно, возможно лишь при таком ускорении, когда динамическая характеристика моментов (генераторных и двигательных) практически совпадает со статической, т.е. при граничном ускорении. Это ускорение для случаев, когда $s < 0$ определяется по формуле (10) и, следовательно, в режиме разгона имеет такое же выражение, что и в случае наброса нагрузки.

Выводы.

Полученное выражение для максимального момента и критерий устойчивости для режима внезапного наброса нагрузки в предположении постоянства ускорения ротора позволяют дать путём сравнительно простых вычислений приближённую оценку динамической устойчивости и в случаях, когда ускорение, строго говоря, не является постоянным.

Выражение для граничного ускорения позволяет в каждом конкретном случае решить вопрос о необходимости учёта изменения скорости, не прибегая к непосредственным расчётам переходных характеристик. Указанное выражение обладает значительной общностью; оно может быть использовано при анализе любых режимов, связанных с изменением скорости ротора.



ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Метод расчёта переходных процессов при управлении асинхронной машиной / К. К. Ким, К. И. Ким, В. В. Вешкин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2020. – № II-1 (43). – С. 52-59.
2. Ким, К. К. Характеристики асинхронной машины в режимах регулирования скорости / К. К. Ким, К. И. Ким, В. В. Вешкин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 25-36.
3. Казовский, Е. Я. Обобщённое рассмотрение переходных режимов в асинхронных и синхронных машинах / Е. Я. Казовский // Электросила. – 1945. – № 2-3.
4. Ким, К. К. Влияние скорости ротора асинхронной машины на характер протекания переходных электромагнитных процессов / К. К. Ким, К. И. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2019. – № IV-1 (40). – С. 28-36.
5. Иванов, С. Н. Влияние ограничивающих факторов на электромагнитную мощность электрических машин / С. Н. Иванов, К. К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2016. – № II-1(26). – С. 4-8.
6. Kim, K. K. Heat-generating electromechanical converter / K. K. Kim, S. N. Ivanov, I. M. Karpova // Russian Electrical Engineering. – September 2008. – Volume 79. – Issue 9. – P. 508-513.
7. Kim, K. K. On the problem of determining speed-torque characteristics of thermal electromechanical converters / K. K. Kim // Russian Electrical Engineering. – August 2009. – Volume 80. – Issue 8. – P. 459-465.
8. Kim, K. I. Equations of a synchronous machine with electrodynamic suspension of the rotor / K. I. Kim, K. K. Kim // Elektrichestvo. – 1989. – Issue 1. – P. 10-22.

Марченко Н. М.
N. M. Marchenko

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В MATLAB

MODEL PARAMETER CALCULATION AND SIMULATION OF 3-PHASE TRANSFORMERS IN MATLAB

Марченко Нина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, Приморский край, г. Владивосток, ул. Суханова, 8; тел. +7(924)126-81-91. E-mail: n-m-m@mail.ru.

Mrs. Nina M. Marchenko – PhD in Engineering, Associate Professor, Electrical Power Engineering and Electrical Engineering Department, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); 690091, Primorsky territory, Vladivostok, 8 Sukhanova str.; tel. +7(924)126-81-91. E-mail: n-m-m@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрены методика расчёта параметров трёхфазного трансформатора, необходимых для настройки модели в пакете программ MATLAB, и методика расчета разных видов нагрузки трансформаторов. Описаны виртуальные модели для исследования режимов холостого хода, короткого замыкания трансформатора и его работы с разными видами нагрузки. Описаны блоки, входящие в состав моделей, даны рекомендации по их настройке. Приведены результаты моделирования в виде кривых тока и напряжения в первичной и вторичной обмотках, а также показаны установившиеся значения токов и напряжений в окне блока Powergui.

Summary. The article discusses the calculation methodology for parameters of 3-phase transformers necessary to configure the model in a MATLAB software package and the calculation methodology for various transformer loads. Virtual models for research of idle speed modes, transformer short circuit and transformers' work with various types of loads are described. The article describes model blocks included into the models and gives recommendations on how to configure them. The simulation results are presented in the form of current and voltage curves both in the primary and secondary windings. Steady-state values of currents and voltages are shown in the window of the Powergui block.

Ключевые слова: трансформатор, режимы работы, холостой ход, короткое замыкание, моделирование, пакет прикладных программ MATLAB, нагрузка.

Key words: transformer, modes, the idle speed, short circuit, simulation, MATLAB software package, load.

УДК 621.314.21.025.3:004.942

Трёхфазные силовые высоковольтные трансформаторы широко используются при передаче электрической энергии на большие расстояния, так как в этом случае до поступления её потребителю она подвергается многократному преобразованию с низкого напряжения в высокое и наоборот. Номинальные мощности таких трансформаторов варьируются в очень широких пределах от нескольких сотен вольт-ампер до миллионов вольт-ампер при напряжении от 6 кВ до 1150...1500 кВ. Они являются основным оборудованием электрических подстанций.

Исследование режимов работы силовых трансформаторов на этапе проектирования новых объектов либо реконструкции имеющихся целесообразно проводить на моделях. Для этого можно использовать библиотеку SimPowerSystems пакета прикладных программ MATLAB, имеющую большой набор инструментов для моделирования электроэнергетических объектов, в том числе трёхфазных трансформаторов.

В известных источниках, к сожалению, не всегда чётко изложена методика расчёта параметров трансформатора и видов его нагрузки, необходимых для моделирования. Поэтому в данной статье рассматривается расчёт таких параметров и делается акцент на методике проведения соответствующих экспериментов.

Начинать расчёт надо с определения параметров схем замещения трансформатора в режиме холостого хода и короткого замыкания.

В режиме холостого хода ток во вторичной цепи трансформатора равен нулю, а в первичной – току холостого хода. Схема замещения трансформатора в этом режиме показана на рис. 1.

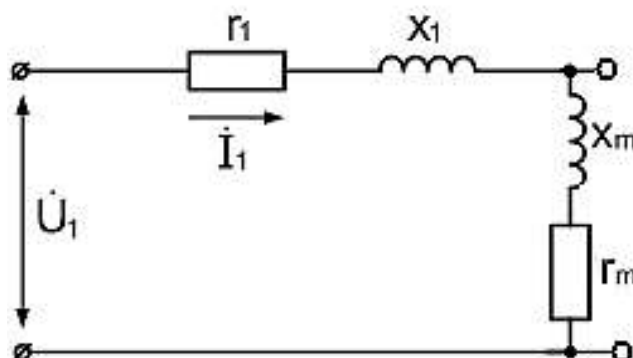


Рис. 1. Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода:

- r_1 – активное сопротивление первичной обмотки;
- x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки;
- r_m – активное сопротивление цепи намагничивания;
- x_m – индуктивное сопротивление цепи намагничивания

Из схемы замещения трансформатора (см. рис. 1) следует, что параметры холостого хода z_0 , r_0 , x_0 представляют собой суммы следующих сопротивлений:

$$z_0 = |z_1 + z_m|; \quad r_0 = r_1 + r_m; \quad x_0 = x_1 + x_m.$$

Для определения параметров схемы замещения трансформатора необходимо рассчитать:

- номинальный линейный ток первичной обмотки трансформатора:

$$I_{1\text{НЛ}} = \frac{S_{\text{H}}}{\sqrt{3}U_{1\text{НЛ}}},$$

где S_{H} – номинальная мощность трансформатора, В·А; $U_{1\text{НЛ}}$ – номинальное линейное напряжение первичной обмотки, В;

- номинальный фазный ток первичной обмотки трансформатора при соединении по схеме «звезда»

$$I_{1\text{НФ}} = I_{1\text{НН}};$$

- номинальный фазный ток первичной обмотки трансформатора при соединении по схеме «треугольник»

$$I_{1\text{НФ}} = \frac{I_{1\text{НЛ}}}{\sqrt{3}};$$

- фазное номинальное напряжение первичной обмотки при соединении по схеме «звезда»

$$U_{1\text{НН}} = \frac{U_{1\text{НЛ}}}{\sqrt{3}};$$

- фазное номинальное напряжение первичной обмотки при соединении по схеме «треугольник»

$$U_{\text{IHH}} = U_{\text{IHL}} ;$$

– фазный ток холостого хода трансформатора:

$$I_{0\Phi} = I_{\text{IHF}} \frac{I_{10}}{100},$$

где I_{10} – ток холостого хода, %;

– полное сопротивление цепи намагничивания схемы замещения трансформатора при холостом ходе

$$z_0 = \frac{U_{\text{IHH}}}{I_{0\Phi}} ;$$

– активное сопротивление ветви намагничивания

$$r_0 = \frac{P_0}{3I_{0\Phi}^2},$$

где P_0 – мощность холостого хода трансформатора, Вт;

– реактивное сопротивление цепи намагничивания

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

В режиме короткого замыкания вторичная обмотка трансформатора замкнута накоротко, а подводимое к первичной обмотке напряжение равно напряжению короткого замыкания. Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания представлена на рис. 2.

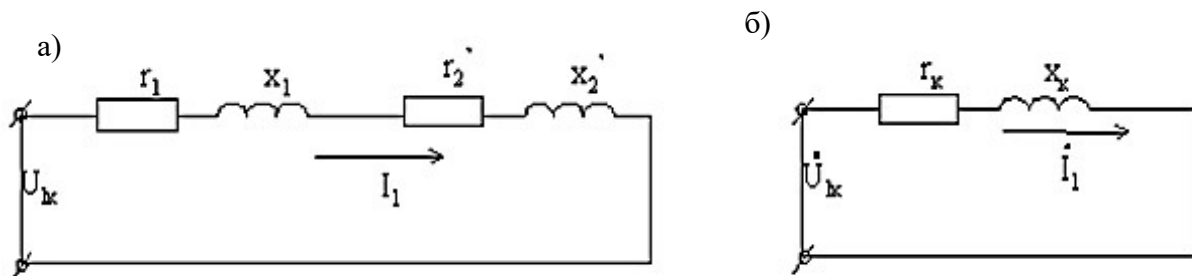


Рис. 2. Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания:

- а – полная схема замещения (r_1 – активное сопротивление первичной обмотки; x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки; r'_2 – приведённое активное сопротивление вторичной обмотки; x'_2 – приведённое индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки; б – упрощённая схема замещения ($r_k = r_1 + r'_2$ – активное сопротивление короткого замыкания; $x_k = x_1 + x'_2$ – реактивное сопротивление короткого замыкания)

Для определения параметров схемы замещения трансформатора (см. рис. 2) необходимо рассчитать:

1. фазное напряжение короткого замыкания

$$U_{\text{к.ф.}} = U_{\text{IHH}} \frac{u_{\text{к}}}{100},$$

где $u_{\text{к}}$ – напряжение короткого замыкания, %;

2. полное сопротивление короткого замыкания

$$z_k = \frac{U_{к.ф.}}{I_{к.ф.}},$$

где $I_{к.ф.}$ – фазный ток короткого замыкания:

- при соединении по схеме «звезда»:

$$I_{к.ф.} = I_{1\Phi} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{1\Phi}};$$

- при соединении по схеме «треугольник»:

$$I_{к.ф.} = \frac{I_{1\Phi}}{\sqrt{3}} = \frac{S_H}{3U_{1\Phi}};$$

3. активное сопротивление короткого замыкания

$$r_k = \frac{P_k}{3I_{к.ф.}^2},$$

где P_k – мощность короткого замыкания трансформатора, Вт;

4. индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Обычно принимают схему замещения симметричной, полагая

$$r_1 \approx r'_2 = \frac{1}{2}r_k; \quad x_1 \approx x'_2 = \frac{1}{2}x_k.$$

В полях окна настройки параметров модели трансформатора в пакете MATLAB лучше задать значения сопротивлений и индуктивностей цепей в абсолютных единицах – SI (в окне настройки параметров модели есть возможность задания параметров и в относительных единицах – р. у.), которые рассчитываются по формулам:

- активное сопротивление первичной и приведённое активное сопротивление вторичной обмоток трансформатора

$$R_1 \approx R'_2 = \frac{r_k}{2};$$

- активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$R_2 = \frac{R'_2}{k^2},$$

где $k = \frac{U_{1\Phi}}{U_{2\Phi}}$ – коэффициент трансформации;

- индуктивность рассеяния первичной и приведённая индуктивность вторичной обмоток трансформатора

$$L_1 \approx L'_2 = \frac{x_k}{2 \cdot 2\pi f},$$

где $f = 50$ Гц – частота питающего напряжения;

- индуктивность рассеяния вторичной обмотки

$$L_2 = \frac{L'_2}{k^2};$$

- потери мощности холостого хода

$$P_0 = 3E_{1\Phi} I_{0\Phi a} \approx 3U_{1\Phi} \frac{U_{1\Phi}}{R_m},$$

откуда активное сопротивление ветви намагничивающего контура схемы замещения

$$R_m = \frac{U_{1\Phi}^2}{P_0};$$

- активная составляющая тока холостого хода

$$I_{0\Phi a} = \frac{U_{1\Phi}}{R_m};$$

- реактивная (намагничивающая) составляющая тока холостого хода

$$I_{0\Phi r} = \sqrt{I_{0\Phi}^2 - I_{0\Phi a}^2};$$

- взаимная индуктивность обмоток

$$L_m = \frac{U_{1\Phi}}{2\pi f I_{0\Phi r}}.$$

Проверка правильности расчёта параметров трансформатора осуществляется на моделях в режимах холостого хода и короткого замыкания.

На рис. 3 представлена виртуальная модель установки для исследования трёхфазного двухобмоточного трансформатора в режиме холостого хода.

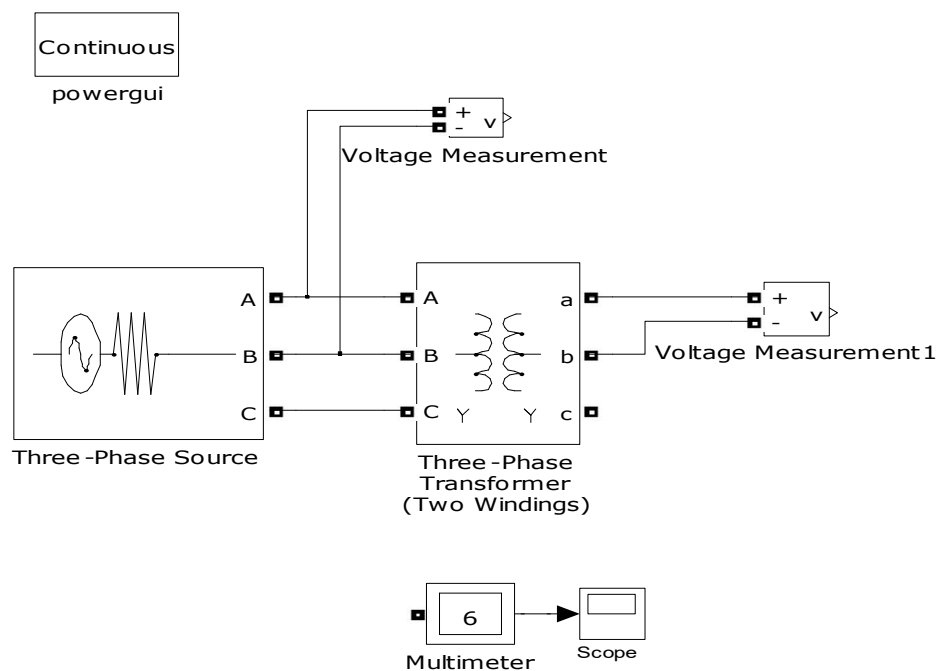


Рис. 3. Виртуальная модель установки для исследования трехфазного двухобмоточного трансформатора в режиме холостого хода

Модель содержит:

- трёхфазный источник питания Three-Phase Source, в окне настройки которого установлено действующее значение линейного напряжения Phase-to-phase rms voltage V (В); начальная фаза напряжения в фазе A Phase angle of phase A – 0 deg (град); частота источника Frequency – 50 Hz (Гц); соединение фаз источника Internal connection – Y (звезда); собственное сопротивление источника Source resistance – $1 \cdot 10^{-9}$ Ohms (Ом); собственная индуктивность источника Source inductance – 0 H (Гн);

- трёхфазный двухобмоточный трансформатор Three-Phase Transformer (Two Windings), в окне настройки которого установить схемы соединения обмоток («звезда» либо «треугольник») и измеряемые параметры Measurements (токи – Winding currents, напряжения – Winding voltages, токи и напряжения – All measurements);

- измерители напряжения в цепях Voltage Measurement и Voltage Measurement 1;

- мультиметр Multimeter, в окне настройки которого перенести обозначения измеряемых параметров из области Available Measurements в область Selected Measurements. Для задания автоматического построения графиков зависимостей тока и напряжения от времени активизировать переключатель Plot selection measurements;

- осциллограф Scope;

- блок пользователя Powergui, который измеряет значения напряжений и токов в обмотках трансформатора. В разделе Analysis tools (инструменты анализа) этого блока необходимо войти в область Steady-State Voltages and Currents (установившиеся значения напряжения и тока) и зафиксировать амплитудные и средние значения напряжений, токов и сдвиги между фаз [Units: **Peak values** (амплитудные значения) либо **RMS values** (средние значения)].

По результатам моделирования (значениям измеряемых величин блоков Powergui, Multimeter, Scope) оценить правильность расчёта параметров трансформатора.

Параметры трёхфазного двухобмоточного трансформатора, подлежащего исследованию, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры трансформатора

Серия трансформатора	S_n , кВА	$U_{1нл}$, кВ	$U_{2нл}$, кВ	P_0 , Вт	P_k , Вт	I_{10} , %	u_k , %
ТМ	35	10	0,525	222	785	2,0	4,5

На рис. 4 показаны графики фазных токов в первичной обмотке на холостом ходу, снятые мультиметром.

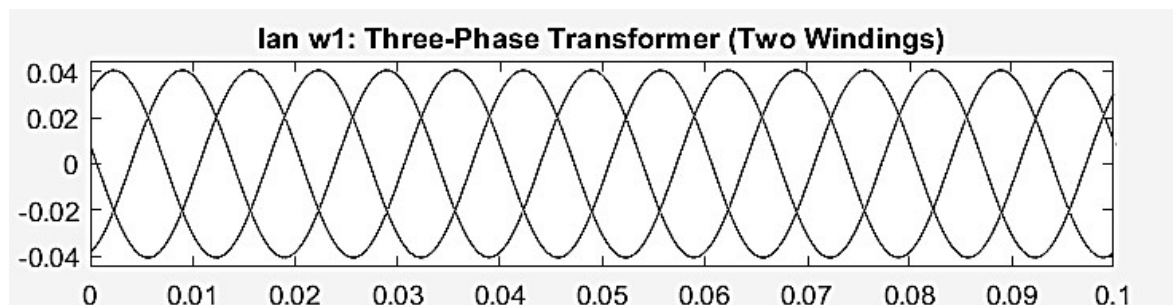


Рис. 4. График фазных токов в первичной обмотке на холостом ходу

На рис. 5 показаны графики фазных токов во вторичной обмотке на холостом ходу, снятые мультиметром.

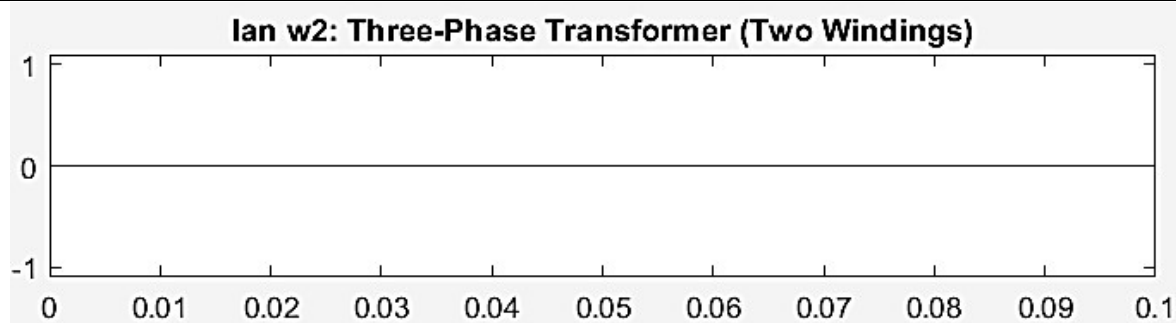


Рис. 5. График фазных токов во вторичной обмотке на холостом ходу

На рис. 6 представлено окно блока Powergui с измеренными действующими значениями токов и напряжений в первичной и вторичной обмотках в режиме холостого хода.

Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool. model: RezhimHH

Steady state values:

MEASUREMENTS:

1:	'U_Voltage Measurement1	' =	524.77 Vrms
2:	'U_Voltage Measurement	' =	10000.00 Vrms
3:	'Iexc_A: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.04 Arms
4:	'Iexc_B: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.04 Arms
5:	'Iexc_C: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.04 Arms
6:	'Uan_w1: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	5773.50 Vrms
7:	'Ubn_w1: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	5773.50 Vrms
8:	'Ucn_w1: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	5773.50 Vrms
9:	'Uan_w2: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	302.98 Vrms
10:	'Ubn_w2: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	302.98 Vrms
11:	'Ucn_w2: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	302.98 Vrms
12:	'Ian_w1: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.04 Arms
13:	'Ibn_w1: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.04 Arms
14:	'Icn_w1: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.04 Arms
15:	'Ian_w2: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.00 Arms
16:	'Ibn_w2: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.00 Arms
17:	'Icn_w2: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.00 Arms

Рис. 6. Результаты моделирования в режиме холостого хода (RMS-величины)

На рис. 7 представлена виртуальная модель установки для исследования трёхфазного двухобмоточного трансформатора в режиме короткого замыкания.

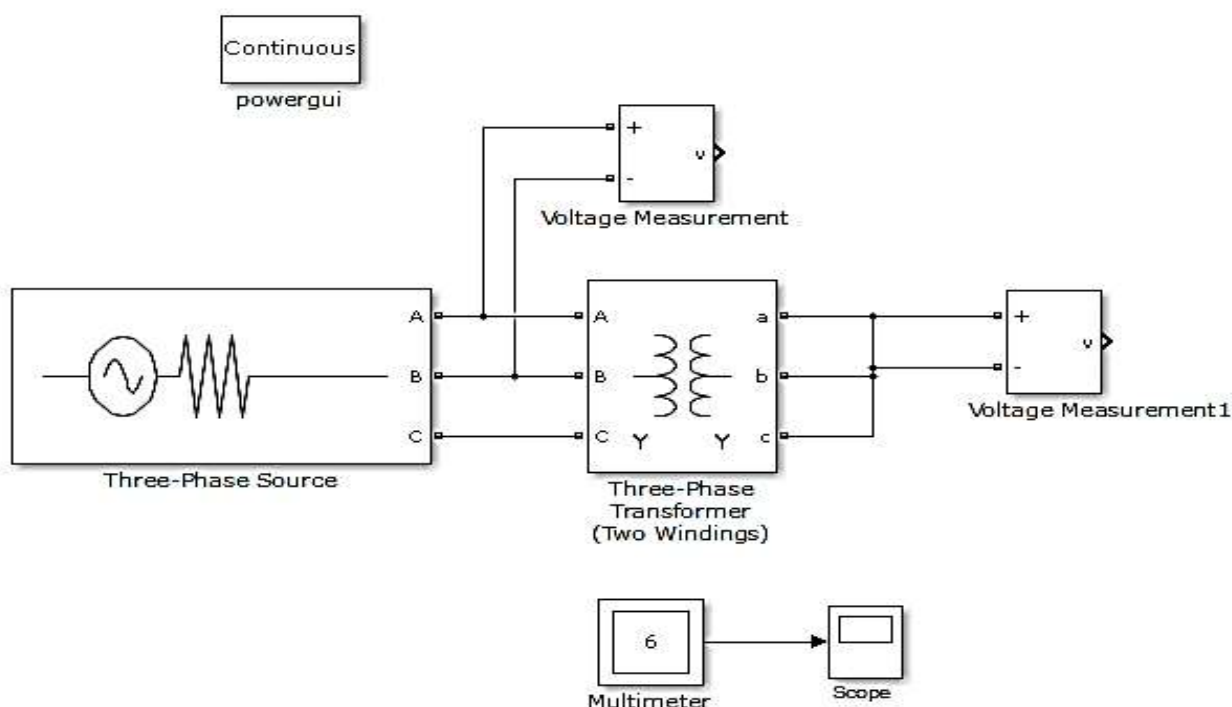


Рис. 7. Виртуальная модель установки для исследования трёхфазного двухобмоточного трансформатора в режиме короткого замыкания

Параметры настройки блоков остаются прежними, кроме одного параметра блока Three-Phase Source – действующее значение линейного напряжения Phase-to-phase rms voltage V (B). Здесь необходимо задать линейное напряжение короткого замыкания – $\sqrt{3}U_{к.ф.}$ (для соединения обмоток по схеме «звезда») и $U_{к.ф.}$ (для соединения обмоток по схеме «треугольник»).

На рис. 8 показаны графики напряжений в первичной обмотке трансформатора, снятые мультиметром.

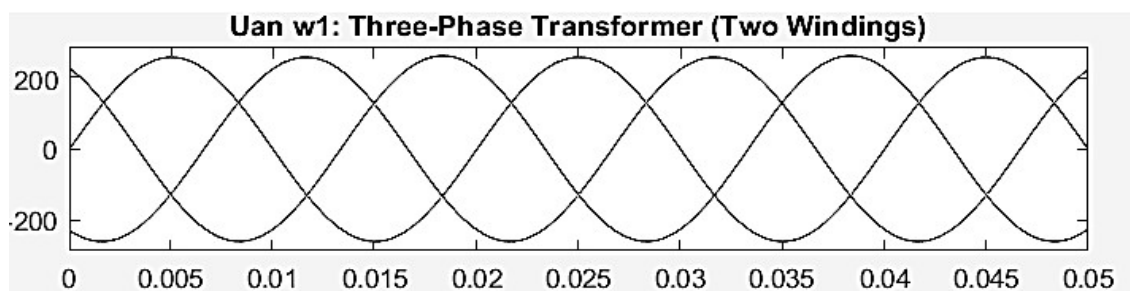


Рис. 8. График фазных напряжений в первичной обмотке при коротком замыкании

На рис. 9 показаны графики напряжений во вторичной обмотке трансформатора, снятые мультиметром.

На рис. 10 представлено окно блока Powergui с измеренными действующими значениями токов и напряжений в первичной и вторичной обмотках в режиме короткого замыкания.

Снятие характеристик трансформатора при работе на различные нагрузки можно осуществить на виртуальной модели, представленной на рис. 11.

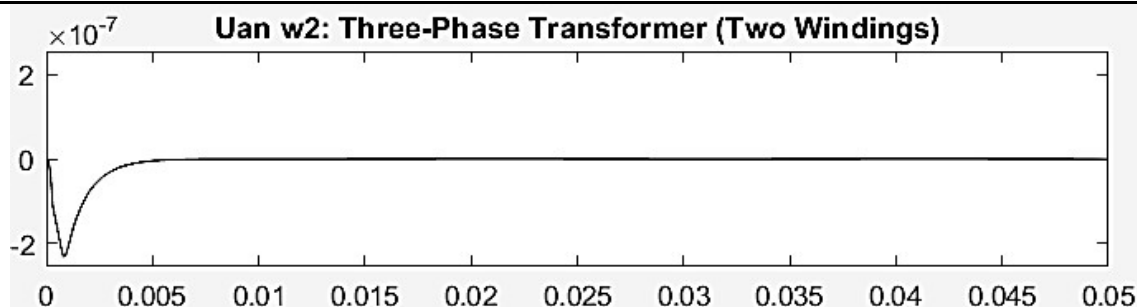


Рис. 9. График фазных напряжений во вторичной обмотке при коротком замыкании

Параметры блока Three-Phase Source установить такие же, как указано выше для режима холостого хода.

Для измерения тока вторичной обмотки служит блок Current Measurement. Блок Three-Phase Series RLC Branch моделирует симметричную последовательную трёхфазную нагрузку трансформатора. В окне настройки параметров блока Three-Phase Transformer (Two Windings) в разделе Configuration установить необходимые измеряемые параметры.

Численные установившиеся значения измеряемых параметров можно увидеть в блоке Powergui в разделе Analysis tools (инструменты анализа) в области Steady-State Voltages and Currents (установившиеся значения напряжения и тока).

В зависимости от требуемого характера нагрузки в блоке Three-Phase Series RLC Branch необходимо установить параметр Branch Type (R – активная, L – индуктивная, C – ёмкостная, RL – активно-индуктивная, RC – активно-ёмкостная, RLC – активно-индуктивно-ёмкостная).

Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool. model: RezhimKZ

Steady state values:

MEASUREMENTS:

1:	'U_Voltage Measurement1	' =	0.00
2:	'U_Voltage Measurement	' =	450.00
3:	'Iexc_A: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.00
4:	'Iexc_B: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.00
5:	'Iexc_C: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.00
6:	'Uan_w1: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	259.81
7:	'Ubn_w1: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	259.81
8:	'Ucn_w1: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	259.81
9:	'Uan_w2: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.00
10:	'Ubn_w2: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.00
11:	'Ucn_w2: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	0.00
12:	'Ian_w1: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	2.02
13:	'Ibn_w1: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	2.02
14:	'Icn_w1: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	2.02
15:	'Ian_w2: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	38.48
16:	'Ibn_w2: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	38.48
17:	'Icn_w2: Three-Phase Transformer (Two Windings)	' =	38.48

Рис. 10. Результаты моделирования в режиме короткого замыкания (RMS-величины)

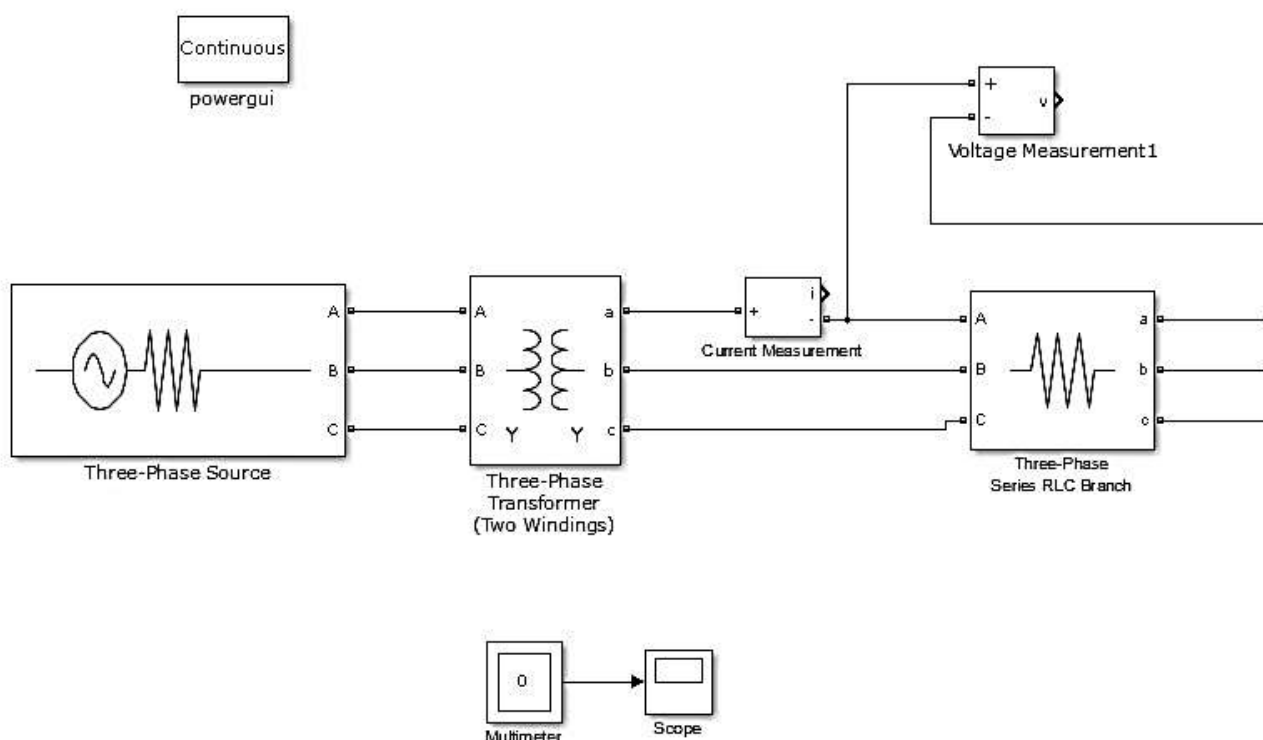


Рис. 11. Виртуальная модель для снятия характеристик при различных нагрузках трансформатора

Для каждого вида нагрузки (активной, индуктивной, ёмкостной, активно-индуктивной, активно-ёмкостной) по данным соответствующей внешней характеристики рассчитывается полное сопротивление нагрузки $z_{\text{НАГР}}$:

$$z_{\text{НАГР}} = \frac{U_2}{I_2},$$

где U_2 – напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = U_{20}(1 - \Delta U_2),$$

здесь U_{20} – напряжение холостого хода вторичной обмотки трансформатора ($U_{20} = U_{2\text{НФ}}$); ΔU_2 – изменение напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Изменение напряжения вторичной обмотки трансформатора ΔU_2 зависит не только от величины, но и от характера нагрузки (активной, индуктивной, ёмкостной, активно-индуктивной и активно-ёмкостной):

$$\Delta U_2 = k_{\text{НГ}}(U_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}} \sin \varphi_2),$$

где $k_{\text{НГ}} = \frac{I_2}{I_{2\text{НН}}}$ – коэффициент нагрузки; $U_{\text{ка}}$, $U_{\text{кр}}$ – соответственно активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания трансформатора

$$U_{\text{ка}} = \frac{(u_{\text{к}} \%) r_{\text{к}}}{(100\%) z_{\text{к}}}, \quad U_{\text{кр}} = \frac{(u_{\text{к}} \%) x_{\text{к}}}{(100\%) z_{\text{к}}},$$

φ_2 – угол сдвига между векторами приведённых напряжения и тока вторичной обмотки трансформатора ($\varphi_2 = 0$ при активной нагрузке, $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$ – при индуктивной, $\varphi_2 = -\frac{\pi}{2}$ – при ёмкостной нагрузке, $\varphi_2 = \frac{\pi}{4}$ – при активно-индуктивной нагрузке, $\varphi_2 = -\frac{\pi}{4}$ – при активно-ёмкостной нагрузке); I_2 – ток во вторичной обмотке трансформатора, который следует задавать в пределах от 0 до $1,2 I_{2\text{НФ}}$.

Параметры нагрузок рассчитываются следующим образом:

– для активной нагрузки

$$R = z_{\text{НАГР.АКТ.}};$$

– для индуктивной нагрузки

$$L = \frac{z_{\text{НАГР.ИНД.}}}{2\pi f};$$

– для ёмкостной нагрузки

$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot z_{\text{НАГР.ЕМК.}}}.$$

Значение ёмкости вносить в окно настройки параметров блока необходимо в экспоненциальной форме и по модулю:

– для активно-индуктивной нагрузки

$$R = z_{\text{НАГР.АКТ-ИНД.}} \cos \frac{\pi}{4}; \quad L = \frac{z_{\text{НАГР.АКТ-ИНД.}}}{2\pi f} \sin \frac{\pi}{4};$$

– для активно-ёмкостной нагрузки

$$R = z_{\text{НАГР.АКТ-ЕМК.}} \cos \left(-\frac{\pi}{4} \right); \quad C = \frac{1}{2\pi f \cdot z_{\text{НАГР.АКТ-ЕМК.}} \sin \left(-\frac{\pi}{4} \right)}.$$

Значение $z_{\text{НАГР}}$ для каждого вида нагрузки рассчитывается с учётом соответствующего значения ΔU_2 .

Для получения $k_{\text{НГ}} = 0$ значения $R = \infty$ Ом, $L = \infty$ Гн, $C = 0$ мкФ заменяются на $R = 1\,000\,000$ Ом, $L = 1\,000\,000$ Гн, $C = 0,000\,001$ мкФ соответственно ввиду невозможности внесения первых в параметры модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек, А. И. Электрические машины: учеб. для студентов вузов / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Герман-Галкин, С. Г. MATLAB & SIMULINK. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-БЕК, 2008. – 368 с.
3. MATLAB, Simulink и SimPowerSystems в электроэнергетике: учеб. пособие / А.-З. Р. Джендубаев [и др.]. – Черкесск: Библиотечно-издательский центр СевКавГГТА, 2014. – 137 с.
4. Новаш, И. В. Расчёт параметров модели трёхфазного трансформатора из библиотеки MATLAB-SIMULINK с учётом насыщения магнитопровода / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2015. – № 1. – С. 12-24.
5. Семенов, А. С. Исследование режимов работы однофазного трансформатора путём математического моделирования / А. С. Семенов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 5. – С. 391-395.
6. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.



Подшивалова К. А.
K. A. Podshivalova

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ В ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ

REVIEW OF MODERN APPROACHES TO WOOD-BASED STRUCTURE MODELING IN SOFTWARE AND COMPUTING SYSTEMS

Подшивалова Кристина Александровна – аспирант Иркутского национального исследовательского технического института (Россия, Иркутск); тел. 8(950)129-55-36. E-mail: 1295536@mail.ru.

Mrs. Kristina A. Podshivalova – Post-Graduate Student, Irkutsk National Research Technical Institute (Russia, Irkutsk); tel. 8(950)129-55-36. E-mail: shalomov2012@yandex.ru.

Аннотация. Приведён анализ современного положения вопросов, связанных с построением расчётных и оптимизационных моделей конструкций на основе древесины при статических и динамических воздействиях. Отдельное внимание уделено вопросам построения адекватных расчётных моделей с учётом анизотропного строения древесины. Выявлена необходимость разработки методов поиска оптимальных проектов для конструкций такого типа, которые позволили бы получать рациональные технические решения с учётом заданного критерия оптимальности и всех требований к их напряжённо-деформированному состоянию.

Summary. The analysis of the modernized state of the issues is related to the construction of design and optimization models of structures based on wood under static and dynamic impacts. Special attention is paid to the issues of constructing adequate computational models taking into account the anisotropic structure of wood. The necessity of developing methods for finding optimal designs for structures of this type, which would make it possible to obtain rational technical solutions, taking into account the given criterion of optimality and all the requirements for their stress-strain state, is revealed.

Ключевые слова: деревянные конструкции, оптимизация проектирования, строительство, пространственные конструкции, стержневые конструкции, конечно-элементная модель, метаэвристические алгоритмы.

Key words: wooden structures, design optimization, construction, spatial structures, bar structures, finite element model, metaheuristic algorithms.

УДК 519.85

Введение

Важным приоритетом строительной отрасли является снижение себестоимости продукции и сокращение сроков ввода объектов в эксплуатацию. Эта цель выдвигает требования понижения материалоемкости, а также трудоёмкости изготовления и монтажа конструкций в зданиях и сооружениях. Одним из путей обеспечения этих требований является разработка методов оптимального проектирования зданий и сооружений. В число важнейших направлений теории оптимизации входит обоснование методологических принципов постановки, существования и адекватности решений задач оптимальности типовых и индивидуальных конструктивных решений.

Задачи такого вида многофакторны, они включают в себя оценку природно-климатических условий, учёт законов распределения напряжений, характера действия нагрузок, связь соотношения усилий с пространственными формами элементов, зданий и сооружений. С другой стороны, эти задачи должны учитывать экономические законы, регулирующие меру расхода и соотношение ресурсов, необходимых для реализации конструктивных решений (стоимость материалов, услуг, эксплуатационные затраты, экономические последствия отказов конструкций, затраты на реконструкцию).

Для конструкций на основе древесины анализ факторов, влияющих на их напряжённо-деформированное состояние, затруднен тем, что дерево как конструкционный материал в силу природного происхождения имеет большой разброс механических характеристик, существенно

большой по сравнению с такими материалами, как сталь и бетон. Особенности влияния на механические характеристики древесины различных условий работы конструкционного элемента учитываются специальными коэффициентами [1]. Расчётные механические характеристики древесины, так же как и для других конструкционных материалов, определяются статистическими методами с использованием функций распределения.

Основные характеристики работы деревянных конструкций в сейсмических условиях

В целом, деревянные конструкции можно спроектировать так, чтобы они соответствовали критерию безопасности жизнедеятельности и неупруго деформировались, не вызывая разрушения при сильных землетрясениях.

Вместе с тем структурные и неструктурные повреждения, связанные с неупругими реакциями, обычно очень дорогостоящие для ремонта, что даёт толчок к исследованиям в области повышения сейсмостойкости сооружений с применением деревянных конструкций. В [2] рассмотрены вопросы численных исследований сейсмических характеристик гибридной амортизирующей конструкции из древесины и стали. Здесь демпферы трения используются для улучшения сейсмических характеристик гибридной конструкции из древесины и стали, которая была предложена в качестве альтернативного конструктивного решения для многоэтажных зданий. Была исследована эффективность различных конструктивных решений, применяемых к большепролётным деревянным строениям в качестве средства снижения сейсмических ускорений [3]. В [4] даётся описание разработки, экспериментальных испытаний и численного моделирования нового гибридного соединения, которое разработано для улучшения сейсмических характеристик каркасов.

Деревянные конструкции традиционно имели хорошие сейсмические характеристики благодаря множеству известных особенностей. Тем не менее последствия последних крупных землетрясений ясно доказали, что сейсмические свойства древесины должны быть улучшены. Кроме того, в настоящее время деревянные конструкции ориентированы на высотное строительство, и поэтому к ним предъявляются повышенные сейсмические требования. Всё вместе это привело к тому, что технологии сейсмической защиты приобрели большую значимость в исследованиях, касающихся деревообработки, чему посвящено более 80 публикаций только в последнее десятилетие [5].

Реализованные принципы оптимизации строительных конструкций в ПК

Многие проблемы структурной инженерии, такие как рациональный подбор сечений либо топологии конструкций, предполагают использование алгоритмов оптимизации. Интерес к проблеме оптимального проектирования и разработка соответствующих алгоритмов приходятся на вторую половину XX века, где большинство задач было сформулировано в форме нелинейного программирования. Впервые наиболее общую постановку задачи оптимизации предложил Л. Шмит [6]. Он совместил конечно-элементный расчёт конструкций с методами нелинейного программирования. В 1979 г. издана монография американских учёных Э. Хога и Я. С. Ароры [7], которая дала серьёзный толчок развитию прикладного направления оптимизации. Здесь были изложены общие подходы к решению задач анализа и синтеза механических систем. На данный момент выполнено достаточно много исследований, связанных с разработкой алгоритмов численной оптимизации конструкций. Однако эти исследования не нашли практического применения в российских ПК. Наиболее часто используемые в российском проектировании ПК не содержат модули проекторночного расчёта соответственно заданному критерию оптимальности.

Формулировка задачи оптимального проектирования строительных конструкций (ОПСтК) в форме задачи нелинейного программирования (НЛП) может быть выражена следующим образом:

$$\text{найти } \min f(x), \quad x \in E^{nx}, \quad (1)$$

$$\text{при ограничениях } g_j(x) \leq 0, \quad j=1,2,\dots,m, \quad (2)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (3)$$

где $f(x)$ – целевая функция, зависящая от искоемых (варьируемых) параметров x ; $\{X\}$ – вектор этих параметров на интервале $\{x^L\}$ – $\{x^U\}$ размерностью nx ; $g_i(x)$ – функция ограничения; m – множество заданных функций ограничений $g_i(x)$.

В качестве целевой функции $f(x)$ используется объём или вес рассматриваемых конструкций. Параметрические ограничения $\{x^L\}$, $\{x^U\}$ учитываются отдельно.

Задачи ОПСтК в форме задачи НЛП разделяются на две основные группы: задачи условной и безусловной оптимизации.

Основу методов оптимизации строительных конструкций составляют исследования на экстремум функции цели, которая связана с параметрами сечений этих конструкций, а также с характером их напряжённо-деформированного состояния, где возможен учёт вязкого, хрупкого, усталостного разрушения, потери устойчивости или разрушения от других факторов. Количественные данные целевой функции определяются двумя показателями: единичной стоимостью ресурсов и объёмом ресурсов.

Начиная с 90-х годов появилось большое количество исследований в области оптимизации инженерных систем, где используются метаэвристические алгоритмы, которые исследуют пространство поиска, используя случайный подбор, комбинирование и вариации искоемых параметров на основе механизмов, напоминающих биологическую эволюцию, либо физические процессы, происходящие в природе.

Постановка задачи метаэвристических алгоритмов

Дана целевая функция

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (4)$$

определённая на множестве допустимых решений $D \in Rn$.

Требуется найти глобальный условный максимум функции $f(x)$ на множестве D , т.е. такую точку $x^* \in D$, что

$$f(x^*) = \max_{x \in D} f(x), \quad (5)$$

где
$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T, D = \{x | x_i \in [a_i, b_i], \quad i = 1, 2, \dots, n\}. \quad (6)$$

Задача поиска минимума целевой функции $f(x)$ сводится к задаче поиска максимума путём замены знака перед функцией на противоположный:

$$f(x^*) = \max_{x \in D} f(x) = -\max_{x \in D} [-f(x)]. \quad (7)$$

Приведём некоторые примеры эвристических алгоритмов: генетические алгоритмы (GA) [8], муравьиный алгоритм (ACO) [9], алгоритм пчелиной колонии (ABC) [10], метод роя частиц (PSO) [11], алгоритм пожара (FA) [12], алгоритм поиска ворон (CSA) [13], алгоритм серых волков (AGW) [14], алгоритмы летучих мышей (BA) [15] и другие. В [16-19] представлены практические задачи оптимизации строительных конструкций с использованием метаэвристических алгоритмов. Генетические алгоритмы, в частности, оказались эффективной основой для задач общего вида, которые моделируют самые разнородные проблемы инженерной практики. В [20] описан код TOSCA, который использует генетические алгоритмы при решении ряда задач оптимизации, возникающих в проектировании конструкций.

Вопросы моделирования в задачах конечно-элементного анализа

При расчётах металлических и железобетонных конструкций сдвиговыми деформациями пренебрегают, что вполне оправдано, так как для металла и железобетона они ничтожно малы, чего нельзя сказать о древесине. Игнорирование этого вопроса ведёт к неточности результатов расчёта. Следовательно, определение напряжённо-деформированного состояния при расчёте деревянных конструкций необходимо выполнять с учётом сдвиговых деформаций.

В настоящее время проектирование сложных технических объектов невозможно без использования автоматизированных программных комплексов (ПК). Применительно к конструкци-

ям из дерева здесь следует отметить, что в современном проектировании существует потребность в программном обеспечении, позволяющем адекватно моделировать сложное поведение системы древесины и доступном для практиков.

Для оценки напряжённо-деформированного состояния строительных конструкций среди численных методов широкое распространение получил метод конечных элементов (МКЭ). Большинство компьютерных систем и комплексов программ, связанных с конечно-элементным анализом строительных конструкций, включают библиотеку изотропных материалов либо анизотропных с допущением об их изотропии. Однако, как показано в [21], такой подход неприменим к решению пространственных задач. Изучению различных аспектов проблемы моделирования деревянных конструкций посвящён ряд публикаций российских и зарубежных исследователей. В монографии В. Н. Волынского [22] основными факторами, оказывающими влияние на прочность древесины, являются температура, влажность и скорость нагружения. В то же время турецкие учёные [23] моделируют древесину как изотропный материал. Результаты исследований упругой деформативности древесины поперёк волокон, выполненные В. Н. Глухих [24], позволяют с высокой точностью определить взаимосвязь между физико-механическими характеристиками древесины и параметрами окружающей среды. В научной работе [25] были разработаны новые строительные системы, такие как древесина после натяжения (ПН). Несколько числовых моделей испытаний пучка древесины ПН разработаны и утверждены с использованием программного обеспечения FEM общего назначения ABAQUS. Эта исследовательская программа предназначена для оценки текущих возможностей или недостатков моделирования ПН древесины как в нормальных условиях, так и в условиях пожара, а также для разработки методологии анализа производительности системы.

Пример создания расчётной схемы в программном комплексе SCAD Office

Рассмотрим деревянный купол диаметром 90,7 м и высотой 40,88 м. По геометрической схеме каркаса купол является ребристо-кольцевым. Состоит каркас из 20 меридиональных рёбер (МР) в виде серповидных арок и 40 промежуточных меридиональных рёбер (ПМР) сплошного сечения (см. рис. 1).



Рис. 1. Реальная конструкция деревянного купола

Решётка, верхний и нижний пояса замоделированы с помощью стержневых элементов (см. рис. 2), опорный и коньковый узлы – пластинчатыми элементами. Как известно, древесина является ортотропным материалом. Модуль упругости вдоль волокон $E = 10\,000$ МПа, поперёк волокон $E_{90} = 400$ МПа. Модуль сдвига относительно осей, направленных вдоль и поперёк волокон, $G_{90} = 500$ МПа. Коэффициент Пуассона поперёк волокон при напряжениях, направленных вдоль

волокон, равен $\nu_{90} = 0,45$; вдоль волокон при напряжениях, направленных поперек волокон, $\nu_{0,90} = 0,018$, согласно [1]. Благодаря элементам в виде пластин появляется возможность учитывать сдвиговые деформации, которые происходят в материале, но недостаточно явно. При этом стержневые элементы совсем не учитывают данный вид деформаций.

Жёсткостные характеристики верхнего стального кольца выше, чем у деревянных элементов, следовательно, его можно замоделировать с помощью твёрдого тела, чтобы убрать дисбаланс жесткостей. Деревянные серповидные арки жёстко присоединяются к верхнему стальному кольцу. Опираие МР и ПМР на фундаментную плиту шарнирное.

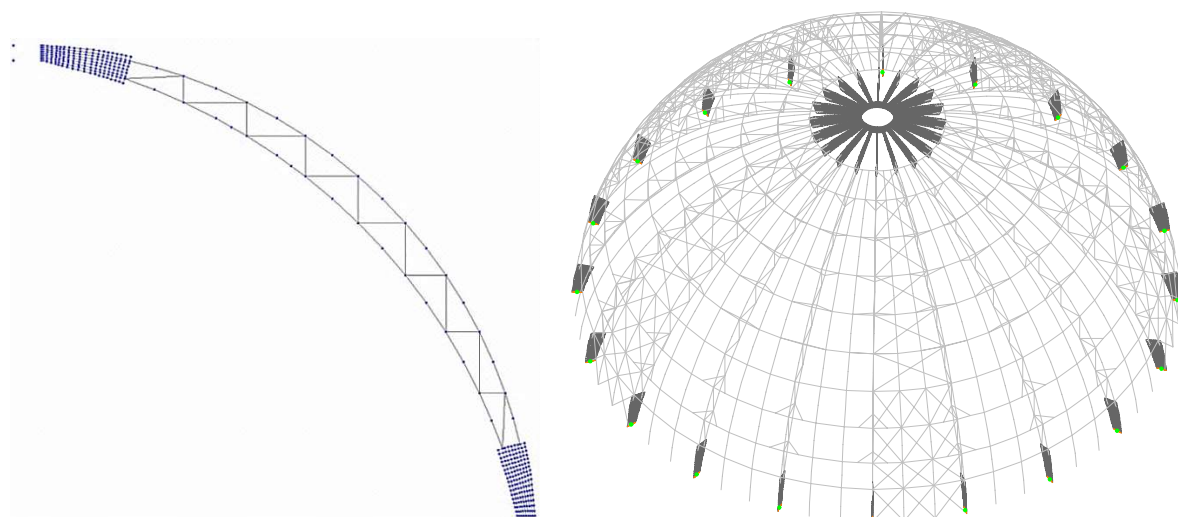


Рис. 2. Расчётная схема купола

При опирании стержней МР на пластины передача усилий происходит некорректно, что приводит к неверному НДС (см. рис. 3, а). В данной модели были внесены корректировки и заведены на некоторое расстояние стержни в пластины (см. рис. 3, б). Как альтернативный вариант было также смоделировано опирание стержней на пластины твёрдым телом (см. рис. 3, в).

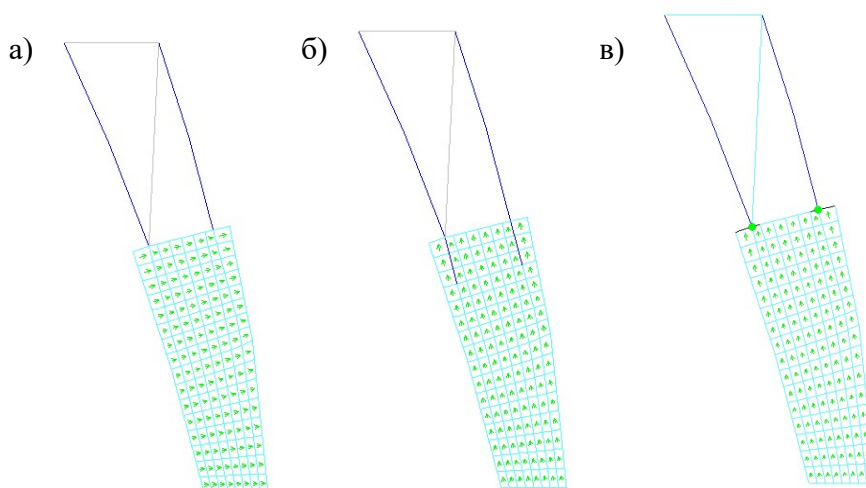


Рис. 3. Моделирование нижнего узла меридионального ребра

Но в ходе расчёта, в том числе и по схемам на рис. 3, б и в, была установлена неточная работа модели, что выражалось в несоответствии усилий.

Следовательно, программный комплекс SCAD Office несовершенен для моделирования и расчёта пространственных деревянных конструкций, хоть и является самым доступным ПК.

При моделировании материала древесины как изотропного происходит значительное снижение точности расчётов вплоть до полной недостоверности. Ввиду указанного факта отсутствует возможность корректного моделирования процессов изготовления, монтажа и эксплуатации строительных конструкций из древесины.

Частные примеры оптимизации некоторых конструктивных элементов в составе сооружений

Отметим некоторые примеры оптимального конструирования отдельных элементов и соединений из древесины.

В работах зарубежных и российских авторов выполнены множественные исследования, касающиеся различных элементов соединений деревянных конструкций. Проведена серия вычислительных экспериментов в программном комплексе ANSYS по определению несущей способности и оптимальной схемы расположения углепластиковых нагелей в соединениях деревянных конструкций на углепластиковых накладках [26]. Проведено экспериментальное и численное исследование поведения соединений балки со сталью при циклических нагрузках [27].

Анализ работы натуральных конструкций куполов из клееной древесины и многочисленные предварительные расчёты показали возможность экономии материалов за счёт уменьшения высоты сечения меридиональных рёбер. Это особенно эффективно при проектировании обшивок, выполняющих роль ограждающих конструкций, которые включены в совместную работу с элементами каркаса (кольцевыми и меридиональными рёбрами) [28].

Выводы

В связи с тем, что деревянные конструкции в настоящее время всё более ориентированы на высотное строительство, к ним предъявляются требования улучшения сейсмозащитных характеристик, что, безусловно, должно быть учтено при проектировании конструкций на основе древесины в сейсмически активных районах.

Современные подходы к автоматизированному проектированию конструкций, в том числе и деревянных, выдвигают требования обеспечения их несущей способности при заданном уровне надёжности, а также необходимо выполнение всех архитектурных и конструктивных требований при условии, что стоимость проекта достигает минимальных значений. Такая задача может быть решена на основе алгоритмов оптимизации. Отсюда возникает необходимость в разработке методов оптимизации строительных конструкций на основе древесины, которые позволяли бы быстро и с минимальными затратами времени и средств получать рациональные технические решения.

В ходе приведённого выше анализа выявлена потребность в алгоритмическом и программном обеспечении, способном адекватно моделировать сложное поведение конструкций на основе древесины с учётом таких факторов, как анизотропное строение древесины и сдвиговые деформации.

Дальнейшие исследования в направлении оптимизации и моделирования конструкций на основе древесины могут получить эффективную реализацию путём построения оптимизационных моделей ещё не реализованных проектных решений с использованием методов нелинейного программирования и метаэвристических алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 (с Изменениями № 1, 2).
2. Zheng Li, Hanlin Dong, Xijun Wang and Minjuan He 2017 Experimental and numerical investigations into seismic performance of timber-steel hybrid structure with supplemental dampers. Engineering Structures. Elsevier 151, 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.011>.
3. Poh'sie G. H., Chisari C., Rinaldin G., Amadio C. and Fragiaco M. 2016 Optimal design of tuned mass dampers for a multi-storey cross laminated timber building against seismic loads. Earthquake Engng Struct. Dyn. 45: 1977–1995. doi: 10.1002/eqe.2736.
4. Gohlich Ryan, Erochko Jeffrey and Woods Joshua E. 2018 Experimental testing and numerical modelling of a heavy timber moment-resisting frame with ductile steel links. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 47-6, 1460-1477.
5. Ugalde D., Almazán J. L., Santa María H. et al. 2019 Seismic protection technologies for timber structures: a review. Eur. J. Wood Prod. 77, 173–194. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01389-9>.

6. Schmit L. A. Structural design by systematic synthesis. Proceedings of second ASCE conference of electronic computation. 1960, Pp. 105-122.
7. Haug Edward J. and Jasbir S. Arora. Applied Optimal Design: Mechanical and Structural Systems. New York: Wiley, 1979. Pp. 487-498.
8. Dao S. D., Abhary K., and Marian R. 2017 An innovative framework for designing genetic algorithm structures Expert Systems with Application 90, 196-208. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.08.018>.
9. Kaveh A. and M. H. Ghafari 2015 Plastic analysis of planar frames using CBO and ECBO algorithms. International journal of optimization in civil engineering. 4(5), 479-492.
10. Dogan A., Gürcan Y., Thomas S. 2017 ABC-X: a generalized, automatically configurable artificial bee colony framework. Swarm Intelligence 11(1), 1-38. <https://doi.org/10.1007/s11721-017-0131-z>.
11. Bonyadi M. R. and Michalewicz Z. 2017 Particle Swarm Optimization for Single Objective Continuous Space Problems. A Review. Evolutionary Computation. 25(1), 1-54. https://doi.org/10.1162/evco_r_00180.
12. Nekouie N. and Yaghoobi M. 2016 A new method in multimodal optimization based on firefly algorithm. Artificial Intelligence Review 46(2), 267-287. <https://doi.org/10.1007/s10462-016-9463-0>.
13. Alireza A. A. 2016 Novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm. Computers & Structures. 169, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.03.001>.
14. Mirjalili S., Mirjalili S. M. and Lewis A. 2014 Grey Wolf optimizer. Advances in Engineering Software. 69, 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
15. Cai X., Wang H., Cui Z., Cai J., Xue Y. and Wang L. 2017 Bat algorithm with triangle-flipping strategy for numerical optimization. International Journal of Machine Learning and Cybernetics. 9(2), 199-215. <https://doi.org/10.1007/s13042-017-0739-8>.
16. Rao R. V. and Saroj A. 2018 Multi-objective design optimization of heat exchangers using elitist-Jaya algorithm. Energy Systems. 9, 305-341. <http://dx.doi.org/10.1007/s12667-016-0221-9>.
17. Lieu Q. X., Do D. T. T. and Lee J. 2018 An adaptive hybrid evolutionary firefly algorithm for shape and size optimization of truss structures with frequency constraints. Computers & Structures. 195, 99-112. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.06.016>.
18. Degertekin S. O., Hayalioglu M. S. 2009 Optimum design of steel space frames: tabu search vs. simulated annealing and genetic algorithms. International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS). 1(2), 34-45.
19. Kaveh A. and Zakian P. 2017 Improved GWO algorithm for optimal design of truss structures, Engineering with Computers. 34(4), 685-707. <https://doi.org/10.1007/s00366-017-0567-1>.
20. Chisari C. and Amadio C. 2018 TOSCA: a Tool for Optimisation in Structural and Civil engineering Analyses. Int J Adv Struct Eng 10, 401-419. <https://doi.org/10.1007/s40091-018-0205-1>.
21. Kotlov V. G. and Sharynin B. E. 2018 Development of a model of the wood material for the finite element analysis of building structures (Part 1) Vestnik. Volga State Technological University. Ser.: Materials. Constructions. Technology -2 (6), 58-63.UDC 624.01.
22. Volynsky V. N. 2012 Vzaimosvyaz' i izmenchivost' fiziko-mekhanicheskikh svoystv drevesiny: monografiya [Interrelation and variability of physical and mechanical properties of wood: monograph], 2-nd ed., ISPR, Saint-Petersburg: LAN Publishing House, 224.
23. Bulent Kaygin, Huseyin Yorur, Burhanettin Uysal 2016 Simulating Strength Behaviors of Corner Joints of Wood Constructions by Using Finite Element Method. Drvna Industrija. 67(2), 133-140. DOI: 10.5552/drind.2016.1503.
24. Gluhik V. N. 2007 Uprugaya deformativnost' drevesiny poperek volokon [Elastic deformation of wood across the fibers], IVUZ. «Lesnoj zhurnal» [IVUZ. «Forest journal»], 5.
25. Quiquero H., Gales J., Abu A. et al. 2020 Finite Element Modelling of Post-tensioned Timber Beams at Ambient and Fire Conditions. Fire Technol 56, 737-767. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00901-0>.
26. Vodiannikov M. A. 2018 Results of numerical modeling of the stressed-deformed state of the joint connection of wood constructions with cfrp dowel pins. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 14(2), 48-56. DOI:10.22337/2587-9618-2018-14-2-48-56.
27. Sirumbal-Zapata L. F., Málaga-Chuquitaype C. and Elghazoul A. Y. 2019 Experimental assessment and damage modelling of hybrid timber beam-to-steel column connections under cyclic loads, Engineering Structures, 200. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109682>.
28. Pyatikrestovsky K. P. and Sokolov B. S. 2018 Nonlinear analysis of statically indeterminate wooden structures and optimization of cross section dimensions of dome ribs. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 14(4), 130-139 DOI:10.22337/2587-9618-2018-14-4-130-139.
29. Ким, К. К. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы / К. К. Ким, С. Н. Иванов, В. М. Кузьмин. – СПб.: Изд-во «ОМ-Пресс», 2009. – 347 с.

Власьевский С. В., Скорик В. Г., Супрун Д. А., Буняева Е. В., Блажнов А. И.
S. V. Vlasievsky, V. G. Skorik, D. A. Suprun, E. V. Bunjaeva, A. I. Blazhnov

**СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СИЛОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ
ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ ТЯГИ**

**DAMAGE DETECTION SYSTEM IN THE POWER CONVERTER OF THE ELECTRIC
LOCOMOTIVE ACCESS IN THE TRACTION MODE**

Власьевский Станислав Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: vlas@festu.khv.ru.

Mr. Stanislav V. Vlasievsky – Dr. Hab., Professor of the Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: vlas@festu.khv.ru.

Скорик Виталий Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: vitsk@inbox.ru.

Mr. Vitaly G. Skorik – PhD in Engineering, Associate Professor of the Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: vitsk@inbox.ru.

Супрун Демьян Андреевич – преподаватель кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: nvg@festu.khv.ru.

Mr. Demjan A. Suprun – Lecturer of the Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: nvg@festu.khv.ru.

Буняева Екатерина Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника и компьютерная графика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: nvg@festu.khv.ru.

Mrs. Ekaterina V. Bunjaeva – PhD in Engineering, Associate Professor of the Computer Engineering and Computer Graphics Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: nvg@festu.khv.ru.

Блажнов Алексей Иванович – преподаватель кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: nvg@festu.khv.ru.

Mr. Alexey I. Blazhnov – Lecturer of the Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: nvg@festu.khv.ru.

Аннотация. В статье рассмотрен способ оперативного определения повреждения в штатном выпрямительно-инверторном преобразователе магистрального электровоза переменного тока в режиме тяги при пропуске полупериода питающего напряжения одним из тиристорных плеч. В качестве критерия идентификации повреждения и перевода системы на резервный алгоритм управления предложено использование относительных значений отдельных гармонических составляющих выпрямленного напряжения преобразователя. Приводятся результаты математического моделирования, подтверждающие возможность надёжного выявления аварийного плеча с использованием данного критерия.

Summary. The article discusses a method for the rapid determination of damage in a standard rectifier-inverter converter of an AC electric locomotive in traction mode when one half-period of the supply voltage is missed by one of the thyristor arms. As a criterion for identifying damage and transferring the system to a backup control algorithm, the use of the relative values of the individual harmonic components of the rectified converter voltage is proposed. The results of mathematical modeling are presented, confirming the possibility of reliable detection of the emergency shoulder using this criterion.



Ключевые слова: электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, тиристорное плечо, аварийный режим, гармонический состав.

Key words: AC electric locomotive, rectifier-inverter converter, thyristor arm, emergency mode, harmonic composition.

УДК 629.423.32

Одним из основных требований к любой электротехнической системе, в том числе к электроприводу магистральных электровозов, является надёжность работы. Однако ввиду сложности подобных систем для обеспечения их бесперебойной работы в случае возникновения повреждения необходимо учитывать резервные способы и средства, позволяющие системе сохранить работоспособность в случае аварийной ситуации.

В Программе развития транспортной инфраструктуры Дальнего Востока предусмотрено увеличение к 2024 году пропускной способности БАМа и Транссиба не менее чем в 1,5 раза в направлении морских портов и пограничных переходов региона [5]. В связи с этим в настоящее время вопросу работоспособности электрооборудования электровозов в любых условиях эксплуатации уделяется значительное внимание.

Существующий парк грузовых электровозов переменного тока в большей степени состоит из модификаций электровозов с коллекторным приводом на основе двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением и системой плавного регулирования напряжения на них. Основу силовой части электрооборудования таких электровозов составляют тиристорные выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП), позволяющие в режиме тяги преобразовывать переменное напряжение со стороны вторичной обмотки понижающего силового трансформатора в постоянное для питания коллекторных тяговых двигателей. Упрощённая электрическая схема силовых цепей электровоза представлена на рис. 1. В состав преобразователя входит восемь тиристорных плеч, соединённых в многозонную мостовую схему с помощью секционированной вторичной обмотки тягового трансформатора. Применение тиристоров позволяет осуществлять плавное регулирование скорости вращения тяговых двигателей за счёт изменения напряжения на них по зонно-фазовому принципу. Алгоритм штатной работы ВИП даёт возможность реализовать плавное регулирование напряжения в пределах четырёх зон.

В качестве примера рассмотрим процессы на 4-й зоне регулирования, как наиболее ответственной, с токами и напряжениями, близкими к номинальным значениям. При полярности питающего напряжения, показанной на рис. 1 сплошной стрелкой, подаются импульсы управления на тиристоры плеча VS8 и, с задержкой во времени, на тиристоры плеча VS3. Тем самым после коммутации токов образуется контур протекания тока через две секции вторичной обмотки трансформатора 1-2 и 2-X₁, составляющих 3-ю зону регулирования в данном полупериоде напряжения, указанные плечи VS3 и VS8 и тяговые двигатели (ТД). В зависимости от необходимого напряжения в момент времени, соответствующий углу α_p полупериода, подаются импульсы на тиристоры плеча VS1, с помощью которого образуется 4-я зона регулирования и осуществляется так называемое фазовое регулирование. В следующем полупериоде питающего напряжения отпираются плечи VS7, VS4, которые вместе с секциями 1-2 и 2-X₁ составляют 3-ю зону регулирования в этом полупериоде напряжения, и плечо VS2, с помощью которого образуется 4-я зона регулирования и осуществляется фазовое регулирование.

Однако при воздействии внешних факторов в процессе эксплуатации возможны ситуации, когда одно из тиристорных плеч не отпирается согласно штатному алгоритму управления [1; 2]. В результате в лучшем случае происходят резкие перепады (броски) тока в силовой цепи двигателей и, как следствие, возникающие скачкообразные продольные механические силы в поезде, в худшем случае происходит срыв процесса управления, уменьшение тока тяговых двигателей до нуля и остановка всего подвижного состава на перегоне. В последней ситуации за счёт этого останавливается движение на участке железной дороги и в целом наблюдается снижение общей участковой скорости

перемещения грузов. Поэтому вопрос повышения работоспособности электроподвижного состава в случае выхода из строя одного из тиристорных плеч является актуальным.

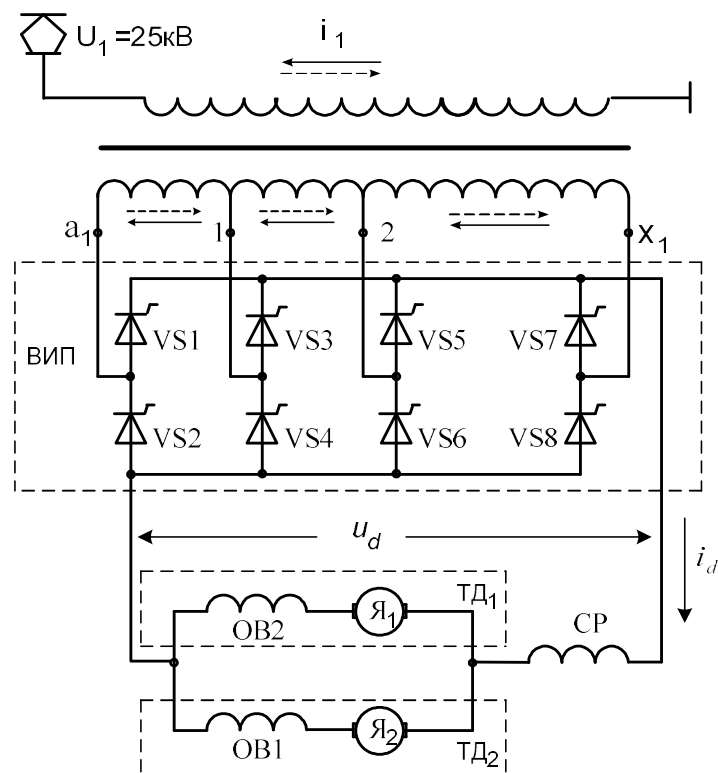


Рис. 1. Схема силовых цепей электровоза с тиристорным преобразователем и коллекторным электроприводом (один ВИП на два двигателя в тележке экипажа секции электровоза)

Основные части этой задачи – проведение функционального диагностирования и оперативное выявление повреждённого тиристорного плеча. Далее, в зависимости от результата диагностирования, следует переход на альтернативный способ управления для обеспечения плавного регулирования напряжения на тяговых двигателях.

Для исследования электромагнитных процессов, происходящих в нормальном и аварийном режимах преобразователя, была разработана математическая модель системы, включающая тяговую подстанцию, тяговую сеть, тяговый трансформатор, ВИП с системой управления и диагностики и электрические машины – тяговые двигатели [3]. Модель была реализована в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB, интерактивной среде Simulink.

Результаты моделирования показали, что одним из критериев определения наличия повреждения и выявления повреждённого плеча может быть гармонический состав напряжения на выходе ВИП. В частности, было выявлено, что в случае пропуска полупериода одним из плеч, в спектре выпрямленного напряжения кроме чётных гармоник, обусловленных мостовой структурой построения самого преобразователя, в значительной степени появляются гармоники нечётных порядков. Однако в зависимости от угла регулирования гармонический состав меняется неоднозначно, поэтому использование какой-то отдельной гармоники в качестве критерия определения повреждённого плеча не даёт достаточной точности. В качестве критерия предлагается рассматривать отношение конкретной нечётной гармоники к нулевой гармонике (постоянной составляющей) напряжения.

В целом, систему выявления факта повреждения и номера повреждённого плеча условно можно разделить на несколько блоков по их функциональному назначению:

1. блок разложения кривой выпрямленного напряжения ВИП в тригонометрический ряд Фурье;

2. блок вычисления относительных величин гармонических составляющих напряжения;
3. блоки формирования пусковых сигналов по факту превышения пороговых значений параметров срабатывания относительных величин гармонических составляющих напряжения.

Используя встроенную функцию Simulink MATLAB [4], сигнал $Unagr$ раскладывается в ряд Фурье. На первом этапе был проведён полный гармонический анализ, но в дальнейшем для работы системы используются только нулевая, первая, третья и пятая гармоники, остальные же применяются для эмпирической оценки протекающих электромагнитных процессов. Выбор перечисленных гармоник основан на результатах анализа получаемых значений на всём диапазоне углов фазового регулирования. Было выявлено, что именно данные гармоники наиболее контрастно и закономерно изменяются при появлении пропуска полупериода плечом ВИП.

Функция блока вычисления относительных величин гармонических составляющих (см. рис. 2) состоит в определении отношений первой, третьей, пятой гармоник к постоянной составляющей напряжения и передаче полученных значений в память по факту приёма синхронизирующих импульсов. В зависимости от полярности полупериода напряжения тяговой сети цепочки срабатывают поочерёдно.

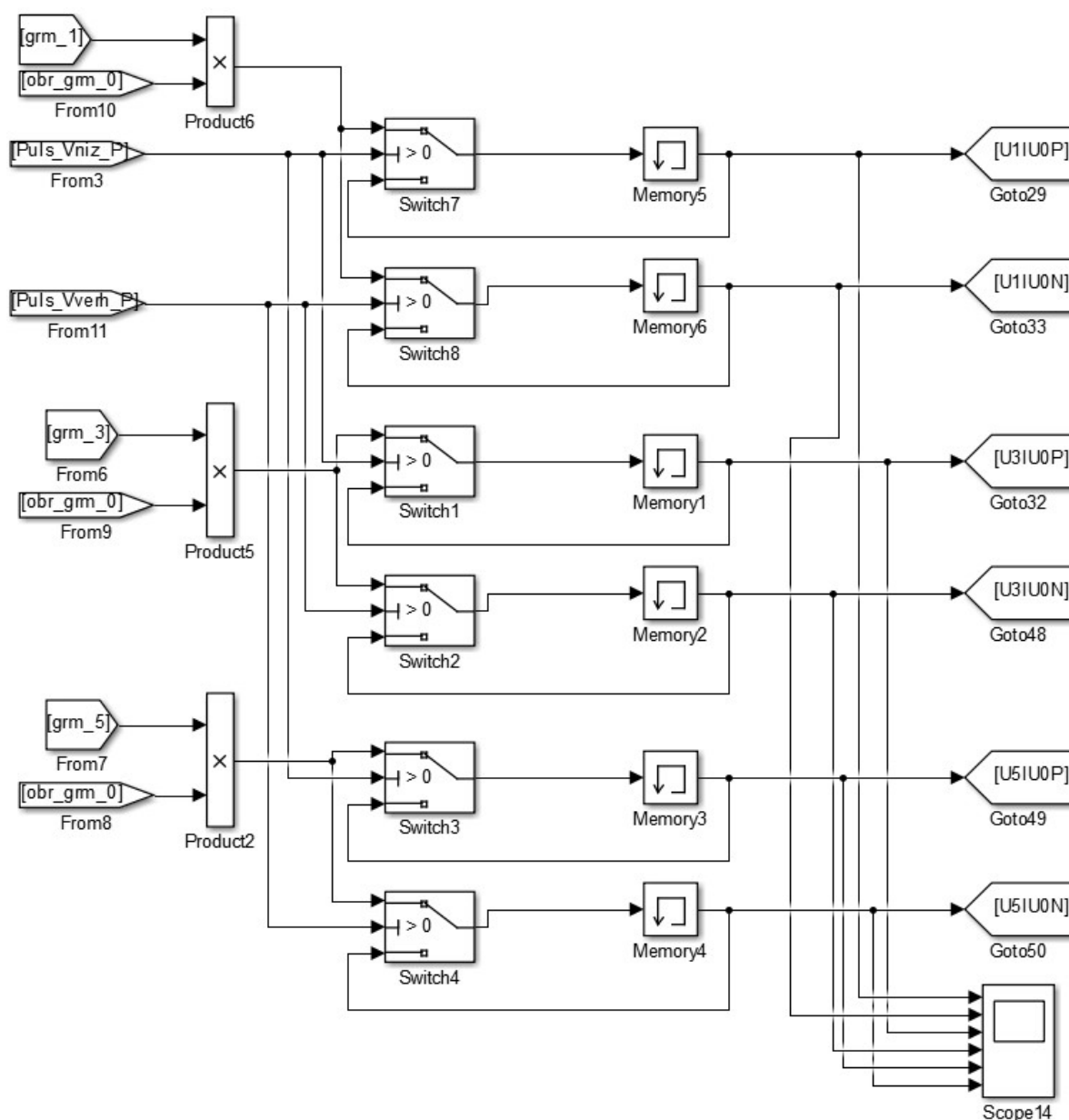


Рис. 2. Блок вычисления относительных величин гармонических составляющих

Блоки формирования пусковых сигналов, получая относительные значения нечётных гармоник из памяти блока вычисления относительных величин, сравнивают их с заданными уставками на срабатывание. По факту превышения каждой из них формируется соответствующий пусковой сигнал. В качестве примера на рис. 3 показан блок формирования пусковых сигналов по уровню первой гармоники.

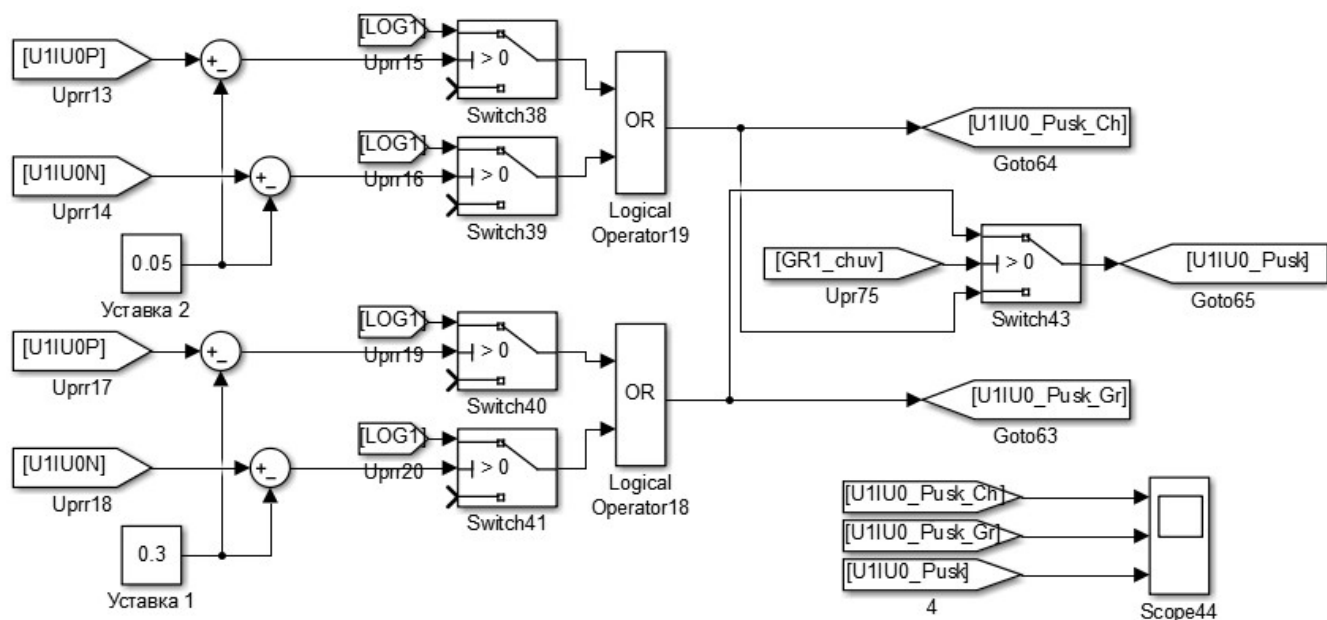


Рис. 3. Блок формирования пусковых сигналов по относительной величине первой гармоники

По результатам моделирования для различных углов фазового регулирования (α_p) (от 20 до 120 градусов) выявлено, что при пропуске полупериода одним плечом наиболее характерно изменение первой, третьей и пятой гармонических составляющих. Поэтому в качестве критерия определения повреждённого плеча необходимо рассматривать значения соотношений $U_{(5)}/U_{(0)}$, $U_{(3)}/U_{(0)}$ и $U_{(1)}/U_{(0)}$ в совокупности. Величины указанных соотношений представлены на рис. 4.

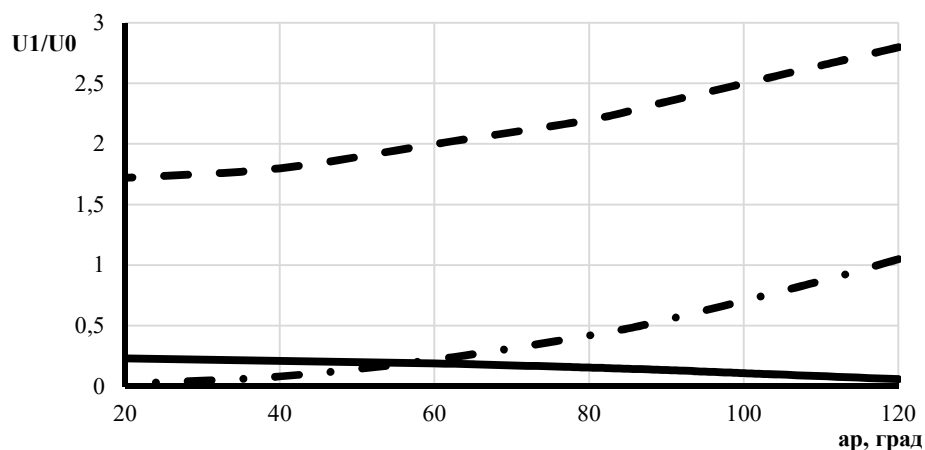
При анализе гармоник более высокого порядка явной закономерности их изменения при аварийных режимах не выявлено. Это объясняется влиянием нелинейности трансформатора, характеристик тиристорных и наличием высокочастотных колебаний в тяговой сети при коммутации тока преобразователя.

Для всех случаев выявления повреждённого плеча системой применяется очувствление порогов срабатывания при формировании общего пускового сигнала, т.к. при углах фазового регулирования порядка 120-170 градусов при повреждении плеч VS1 в одном полупериоде и VS2 – в другом гармонический состав изменяется незначительно относительно нормального режима.

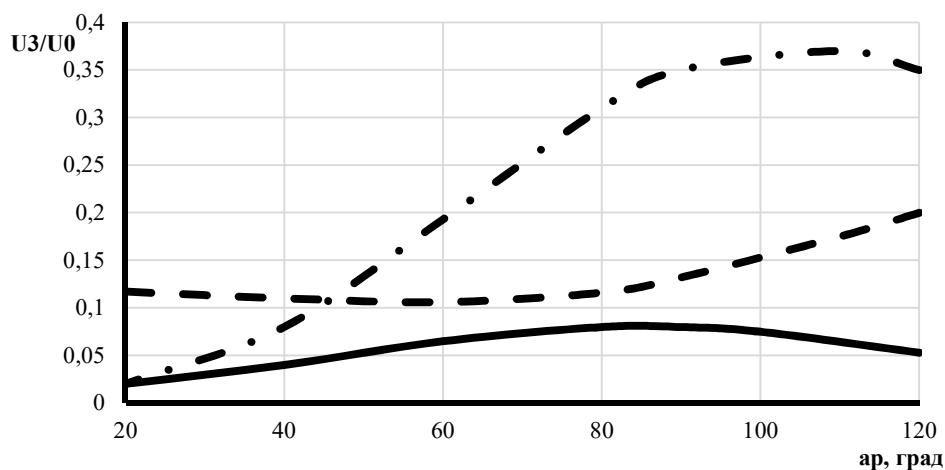
Моделирование, проведённое для более низких зон регулирования напряжения (I, II и III), также показало возможность использования амплитуд тех же гармоник для определения не открывшегося плеча преобразователя.

Таким образом, за счёт функционального диагностирования и оперативного выявления повреждённого тиристорного плеча на основании относительных значений гармоник, а также последующего быстрого перехода на резервный алгоритм управления в аварийном режиме возможно повышение работоспособности электровагона из-за неотпирания одного из тиристорных плеч или пропуска импульса управления со стороны системы формирования импульсов.

а)



б)



в)

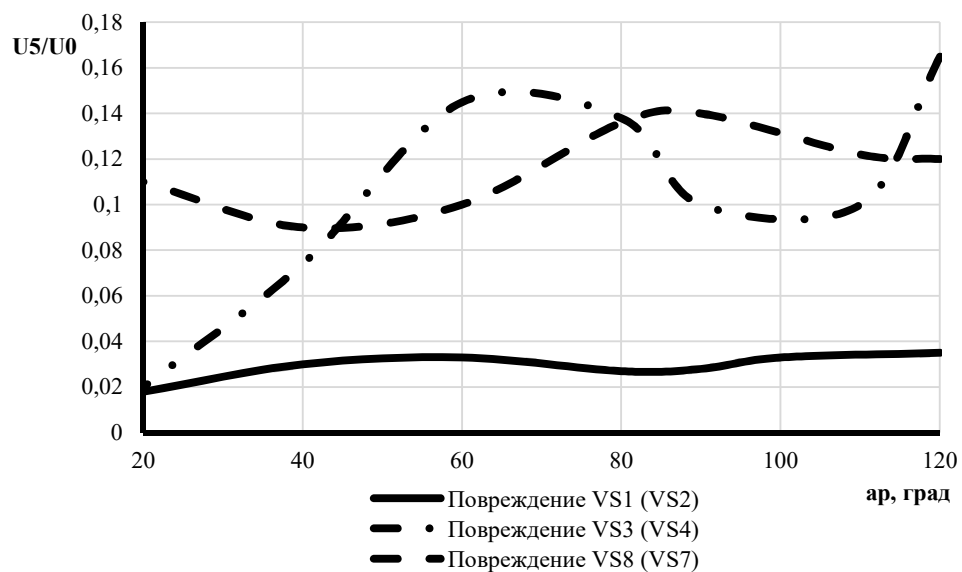


Рис. 4. Относительные значения первой (а), третьей (б) и пятой (в) гармоник при различных видах повреждений на четвёртой зоне регулирования

Созданная математическая модель и её реализация в MATLAB позволяют проводить дальнейшие исследования, направленные на повышение чувствительности работы системы выявления повреждений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богинский, С. А. Результаты эксплуатации выпрямительно-инверторных преобразователей электровазов переменного тока ВЛ80Р на Красноярской железной дороге / С. А. Богинский, В. В. Семченко // Вестник ВНИИЖТ. – 2019. – Т. 78, № 1. – С. 27-32.
2. Богинский, С. А. Технология сервисного обслуживания и анализ результатов эксплуатации электронного оборудования электровазов переменного тока на железных дорогах Восточного полигона / С. А. Богинский, В. В. Семченко, Н. Г. Шабалин // Вестник ВНИИЖТ. – 2019. – Т. 78, № 3. – С. 169-176.
3. Власьевский, С. В. Математическая модель для исследования электромагнитных процессов при аварийных режимах силового преобразователя электровазов переменного тока / С. В. Власьевский, В. Г. Скорик, Д. А. Супрун // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава: труды Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием / под ред. И. К. Лакина. – Красноярск: Изд-во АО «ДЦВ Красноярской ЖД», 2020. – С. 184-189.
4. Дьяконов, В. П. MATLAB R2006/2007/2008. Simulink 5/6/7. Основы применения / В. П. Дьяконов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2010. – 800 с.
5. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года: Указ Президента Российской Федерации № 204 от 07 мая 2018 г. [Электронный ресурс] // Президент России – официальный сайт. – Режим доступа: <http://kremlin.ru/acts/bank/43027> (дата обращения: 06.05.2020).

Столяров В. Я.
V. Y. Stolyarov

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПОДГОТОВКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИДЕНТИФИКАТОРОВ ПЕРЕД РАСПОЗНАВАНИЕМ

UNIVERSAL SOFTWARE PACKAGE FOR PREPARING IMAGES OF IDENTIFIERS BEFORE RECOGNITION

Столяров Виталий Яварович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(984)175-81-72. E-mail: stolyarov.vitalij@list.ru.

Mr. Vitalii Ya. Stolyarov – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amure); tel. 8(984)175-81-72. E-mail: stolyarov.vitalij@list.ru.

Аннотация. В настоящее время цифровая обработка изображений является одним из важнейших направлений применения современной вычислительной техники. На сегодняшний день известны следующие задачи обработки изображений: фильтрация и улучшение визуального восприятия, восстановление отсутствующих участков, обнаружение объектов и их идентификация, оценка геометрических трансформаций и совмещение изображений, оценка параметров изображений (задачи измерения различных характеристик изображения или их отдельных элементов: вероятностные характеристики изображения, положение и размеры объектов и т.д.), сжатие изображений. Проблемы распознавания изображений кроме классической задачи распознавания фигур заданной формы на изображении ставят новые задачи распознавания линий и углов на изображении, распознавания края изображения. В данной исследовательской работе автор решал проблему локализации текста на изображении при различных углах поворота. Для распознавания текста на изображении необходимо на начальном этапе локализовать область изображения, содержащую текстовые символы, затем определить угол отклонения. Задача распознавания актуальна в самых разных областях: при анализе телевизионных трансляций, поиске информации в медиабазы, административном обслуживании в банках, страховых компаниях и т.д. В статье описывается оптимизированная автором методика обнаружения текстовых областей и выделения символов на изображениях, снятых с металлических поверхностей, на которых лазерной гравировкой нанесён некоторый текст. Разработан специализированный алгоритм обработки (очистки) изображения, получаемого с USB-камеры. Подход основан на предварительном повороте изображения при помощи преобразования Хафа и применении методов математической морфологии. Цель работы заключалась в создании программного компонента, пригодного для распознавания идентификационных номеров, выполненных лазерной гравировкой на металлических деталях. В результате исследования найдено применение преобразованию Хафа для вращения изображения и получен оптимизированный алгоритм предварительной обработки текстовых изображений, снятых с металлических поверхностей с помощью USB-устройства. Практическая значимость данного алгоритма обуславливается использованием в программном обеспечении, разрабатываемом для Комсомольского-на-Амуре авиастроительного завода, в качестве программного компонента предварительной обработки изображений перед распознаванием.

Summary. Currently, digital image processing is one of the most important areas of application of modern computer technology. The following image processing tasks are known today: filtering and improving visual perception, restoring missing areas, detecting objects and identifying them, evaluating geometric transformations and combining images, evaluating image parameters (tasks of measuring various image characteristics or their individual elements: probabilistic characteristics of the image, position and size of objects, etc.), and image compression. The problems of image recognition, in addition to the classical problem of recognizing figures of a given shape in an image, pose new problems of recognizing lines and angles in an image and recognizing the edges of an image. In this research, the author solved the problem of localizing text in an image at various angles of rotation. To recognize the text in the image, at the initial stage it is necessary to localize the image area containing text characters, then determine the angle of deviation. The recognition problem is relevant in a variety of areas: in the analysis of television broadcasts, the search for information in media outlets, administrative services in banks, insurance companies, etc. The article describes a technique optimized by the author for detecting text areas and highlighting characters in images shot from metal surfaces on which some text is laser-engraved. A specialized algorithm for processing (cleaning) an image received from a USB camera has been developed. The approach is based on the pre-

liminary rotation of the image using the Hough transform and the application of mathematical morphology methods. The purpose of the work was to create a software component suitable for recognition of identification numbers made by laser engraving on metal parts. As a result of the study, the application of the Hough transform for image rotation has been found and an optimized algorithm for the preliminary processing of text images taken from metal surfaces using a USB device has been obtained. The practical significance of this algorithm is determined by the use in the software developed for the Komsomolsk-on-Amur aircraft factory as a software component for pre-processing images before recognition.

Ключевые слова: обработка изображений перед распознаванием, математическая морфология, лазерная гравировка, преобразование Хафа, динамическое определения угла поворота изображения.

Key words: image processing before recognition, mathematical morphology, laser engraving, Hough transform, dynamic determination of the angle of rotation of the image.

УДК 004.421

Введение

На предприятиях с каждым годом возрастает потребность в прикладных программах, способных считывать и распознавать идентификаторы на стандартных текстовых бирках, надписях, маркировках и шильдиках деталей, инструмента и блоков используемого при производстве оборудования. В силу того, что эти объекты подвергаются активной эксплуатации, качество изображения надписей на них, снимаемых для распознавания в компьютерных системах, имеет далеко не превосходное качество. Среди зарубежных учёных, которые внесли неоценимый вклад в развитие анализа изображений, стоит отметить Р. Дериша, Б. Хорна, К. Шапиро, Г. Финлейсона, а среди отечественных – В. Л. Арлазарова, М. М. Бонгарда, Ю. В. Визильтера, С. Ю. Желтова, Ю. И. Журавлева, Д. С. Лебедева, Б. М. Миллера, В. А. Сойфера и П. А. Чочи.

В реальном производстве большая доля надписей и маркировок выполняется лазерной гравировкой на металле. Угол поворота, тон, цвет, наличие шероховатости металлической поверхности затрудняют выделение области текстовых маркировок при их компьютерном считывании. Отсюда возникает потребность в разработке (усовершенствовании) методик предварительной обработки изображения перед передачей его в стандартный OCR (модуль распознавания текста) в автоматизированных системах машинного зрения. Одним из главных шагов предварительной обработки изображения является локализация области изображения, содержащей текст.

В связи с этим с каждым днём всё больше и больше возрастает интерес к подходам, используемым при распознавании рукописных, печатных и выполненных лазерной гравировкой текстам [1–8], существующие методы и алгоритмы регулярно пересматриваются и улучшаются с точки зрения решения задач поиска, распознавания и выявления смысла разнообразной текстовой информации на изображениях и видеозаписях [9–14; 15–17; 1]. В качестве решения к задаче детектирования местоположения текста используется большое число различных алгоритмов, которые базируются на использовании локальных особенностей изображений. Такими алгоритмами являются алгоритмы SWT [18] и MSER [19]. Методика, предложенная автором, отличается от подходов, используемых в алгоритмах SWT и MSER. Общая схема предложенной методики представлена на рис. 1.

В качестве входных параметров метода рассматривается цифровое дискретное изображение размером $M \times N$ точек, а элементы такого изображения будем называть пикселями. Важно заметить, что алгоритм работает исключительно с полутоновыми изображениями, поэтому необходимо на первом шаге преобразовать исходное цветное изображение в полутоновое.

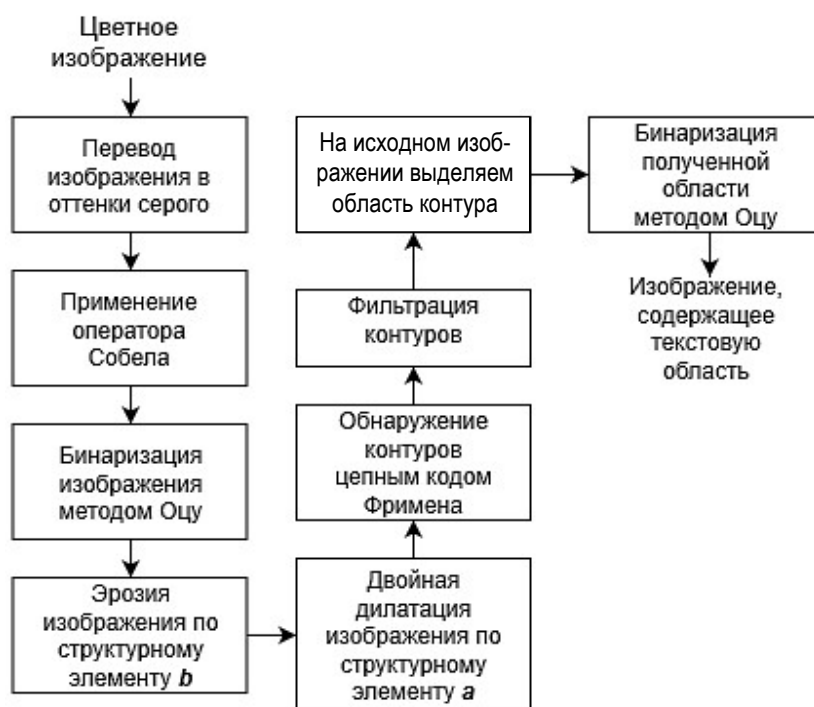


Рис. 1. Схема предложенной методики

Операции распознавания на изображениях определённых объектов, как правило, предваряются обработкой изображений для создания условий, повышающих эффективность и качество выделения и распознавания искомых или изучаемых объектов. При выделении текстовой области на изображении вышеописанным подходом было выяснено, что при повороте детали на угол более 20-25° возникают проблемы выделения текстовой области, обусловленные тем, что предложенный автором алгоритм, основанный на методах математической морфологии, не является изотропным из-за того, что дифференцирование проводится только в горизонтальном направлении (см. рис. 2).

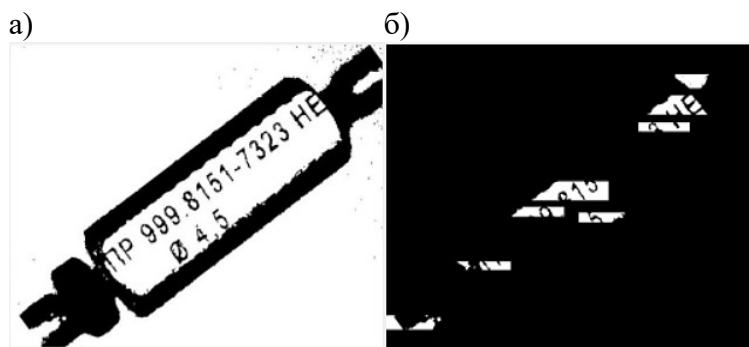


Рис. 2. Иллюстрация недостатка выделения текстовой области методами математической морфологии при повороте бирки на угол более 20°

Целью данной работы является построение программного модуля для предварительной обработки изображений перед распознаванием, основанного на предложенном автором методе математической морфологии, и в случае отклонения детали на изображении свыше 20° автор предлагает методику, которая основывается на предварительном анализе областей изображений, построении пространства Хафа, на основе которого определяется угол отклонения бирки с лазерной гравировкой от горизонтального положения на изображении.

Определение угла поворота

Общая идея преобразования Хафа для обнаружения прямых линий на изображении бирки, выполненной лазерной гравировкой на металле. Основная идея преобразования Хафа для

поиска прямых состоит в том, что любая точка бинарного изображения может принадлежать некоторому множеству прямых линий [9]. Возьмём точку (x_i, y_i) из заданного множества n точек и рассмотрим общее уравнение прямой на плоскости x, y в форме с угловым коэффициентом $y = ax + b$. Однако удобнее представить прямую с помощью двух других параметров ρ и θ . Параметр ρ – это длина перпендикуляра, опущенного на прямую из начала координат, а θ – это угол между данным перпендикуляром и осью x (см. рис. 3).

Плоскость (ρ, θ) иногда называют пространством Хафа для набора прямых в двумерном случае, или фазовым пространством [20].

Очевидно, что через точку A с координатами (x_i, y_i) проходит бесконечно много прямых, которые удовлетворяют уравнению $y_i = ax_i + b$ при различных значениях a и b . Все прямые, проходящие через точку A , соответствуют следующему уравнению [21]:

$$\rho(\theta) = x_i \cdot \cos\theta + y_i \cdot \sin\theta. \quad (1)$$

Привлекательность преобразования Хафа с точки зрения вычислений проистекает из возможности разбиения пространства параметров $\rho\theta$ на так называемые «ячейки накопления». В ячейке с координатами (p, q) накапливается значение $A(p, q)$ для прямоугольника в пространстве параметров, соответствующего точке (ρ_p, θ_q) . Исходные значения во всех ячейках накопления равны нулю. Далее для каждой точки (x_i, y_i) из заданного множества точек в плоскости x, y принимаем параметр θ равным поочередно каждому разрешённому дискретному значению на оси θ и находим соответствующее ему значение ρ путём решения уравнения (1). После этого найденное значение ρ округляется до ближайшего разрешённого дискретного значения на оси ρ . Если выбор значения θ_q приводит к решению ρ_p , увеличиваем накопленное значение в соответствующей ячейке (происходит процедура голосования): $A(p, q) = A(p, q) + 1$. После выполнения описанной процедуры для всех исследуемых точек (x_i, y_i) записанное в ячейке (p, q) значение $A(p, q) = P$ говорит о том, что в плоскости x, y имеется P точек, которые лежат на прямой $\rho_p = x \cdot \cos\theta_q + y \cdot \sin\theta_q$. Точность попадания точек на эту прямую определяется размерами ячеек накопления на плоскости (ρ, θ) . Вычислительная сложность данного метода линейна по n числу точек в заданном множестве на плоскости x, y .

Описание методики оптимизации применения преобразования Хафа к изображениям бирки, выполненной лазерной гравировкой на металле. Для того чтобы снизить время выполнения алгоритма, автор предлагает предварительно анализировать область на количество содержащихся в ней пикселей объекта. Предполагая, что цвет пикселя фона равен нулю, а цвет пикселя объекта равен единице, выведем следующую методику анализа области.

Введём фильтр-маску $w(x, y)$ размерами $m \times n$, все значения данной маски равны единице. Далее необходимо «просканировать» введённой маской исходное изображение. Сканирование заключается в поэлементном умножении области изображения и маски, если сумма произведений элементов менее 60 % от площади маски, то данная область не является интересующей и к ней не применяется преобразование Хафа. Автор считает оптимальными параметры размера маски

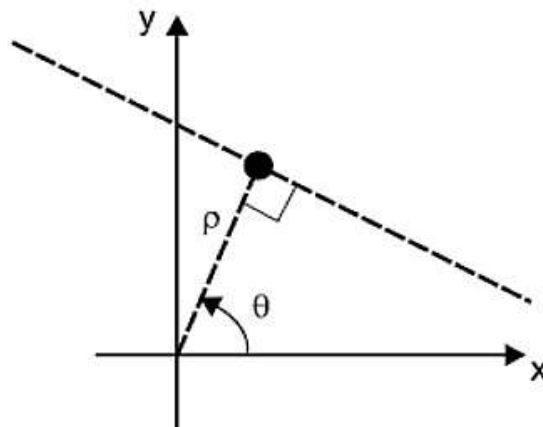


Рис. 3. Задание прямой на плоскости параметрами ρ и θ

принимать не более 7×7 за счёт узких областей вокруг текстовой области (см. рис. 2, а). Выведем формулу для описанного сканирования областей:

$$w(x, y) \bullet f(x, y) = \sum_{s=-a}^b \sum_{t=-b}^b w(s, t) \cdot f(x + s, y + t),$$

$$w(x, y) \bullet f(x, y) \geq 0,6 \cdot \sum_{x=0}^m \sum_{y=0}^n w(x, y),$$
(2)

где $a = (m - 1)/2$, $b = (m - 1)/2$.

Используем приведённую выше методику сканирования областей для построения пространства Хафа изображения, показанного на рис. 2, а. Результат проиллюстрирован на рис. 4, где по горизонтали параметр Θ , по вертикали – ρ . Области изображения с ярко выраженными всплесками говорят о том, что в соответствующих полярных точках находятся самые длинные прямые исходного изображения.

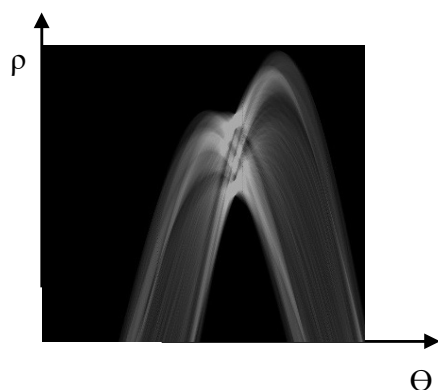


Рис. 4. Пространство Хафа для исходного изображения

Описание методики получения угла поворота с использованием преобразования Хафа к изображениям бирки, выполненной лазерной гравировкой на металле

Применительно к изображениям бирок с лазерной гравировкой автором предлагается следующий приём предварительной обработки изображений для снижения угла отклонения изображения бирки, выполненной лазерной гравировкой на металле, от горизонтальной прямой.

Все изображения бирок данного типа обладают широкой окантовкой вокруг текстовой области (см. рис. 5, а). Пользуясь этим свойством, можно определить, что самая длинная прямая (в пространстве Хафа имеет самое большое число голосов), содержащая пиксели объекта, будет проходить по или внутри линии окантовки. В качестве примера на рис. 5, б отображена самая длинная прямая, обнаруженная алгоритмом Хафа (белая линия, проходящая сквозь окантовку). Зная параметр Θ этой прямой, в дальнейшем можно применить аффинное преобразование «поворот».

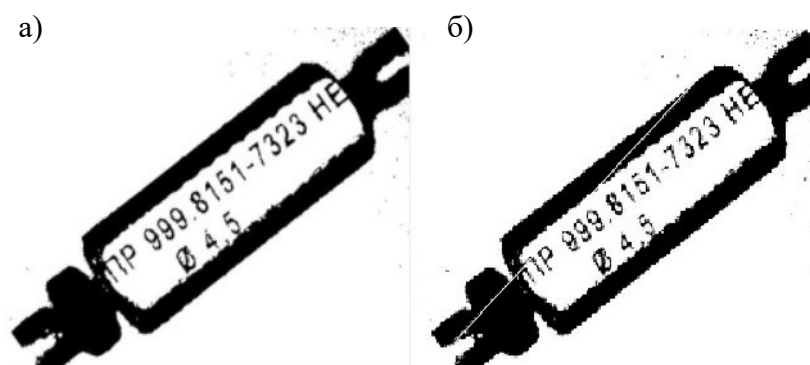


Рис. 5. Исходное изображение (а) и найденная прямая с помощью преобразования Хафа (б)

Полный алгоритм работы программного модуля, реализующий предлагаемую методику поиска угла отклонения изображения бирки, выполненной лазерной гравировкой на металле с предварительным анализом областей, состоит из следующих шагов:

1. Снять изображение.
2. Выполнить процесс бинаризации с адаптивным порогом.
3. Произвести анализ областей, используя формулу (2).

4. Выполнить цикл по всем пикселям области: если пиксель чёрного цвета, тогда выполнить процедуру голосования для $0^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ$ согласно уравнению (1).

5. Определить в пространстве Хафа точку с максимальным числом голосов.

6. По параметру Θ найденной точки на четвёртом шаге выполнить аффинное преобразование «поворот» на исходном изображении.

Результат решения проблемы, показанной на рис. 1, представлен на рис. 6.

После поворота изображения можно приступать к предложенной автором методике локализации текста способами математической морфологии.

Локализация текста

В контексте машинного зрения морфология относится к описанию свойств формы областей на изображении. Операции математической морфологии изначально были определены как операции над множествами, но скоро выяснилось, что они также полезны в задачах обработки множества точек в двумерном пространстве.

Множествами в математической морфологии представляются объекты на изображении. Легко заметить, что множество всех фоновых пикселей бинарного изображения является одним из вариантов его полного описания [14].

Входными данными для аппарата математической морфологии являются два изображения: обрабатываемое и специальное, зависящее от вида операции и решаемой задачи. Такое специальное изображение принято называть примитивом, или структурным элементом. В нашем случае мы задаём два структурных элемента:

1. Структурный элемент b для эрозии. В результате применения операции эрозии все объекты, меньшие, чем структурный элемент, стираются, объекты, соединённые тонкими линиями, становятся разъединёнными и размеры всех объектов уменьшаются. В нашем случае эрозия осуществляется в вертикальном направлении по невысокому шаблону, что позволяет очистить изображение от импульсного шума и более точно локализовать область по высоте символов идентификатора.

2. Структурный элемент a для дилатации. Дилатация увеличивает область изображения, расширяя его пиксели и тем самым способствуя объединению областей изображения, которые были разделены шумом и др. В нашем случае область текста размывается, это пригодится для выделения контура текстовой области.

Разработанная морфологическая операция является модификацией операции размыкания, которая в общем случае описывается следующим образом [6]:

$$(A \ominus b) \oplus b,$$

где A – исходное изображение; b – структурный элемент; \ominus – операция эрозии; \oplus – операция дилатация.

Предложенная автором формула имеет следующий вид:

$$((A \ominus b) \oplus a) \oplus a, \quad (3)$$

где A – исходное изображение; b – структурный элемент, применяемый при операции «эрозия»; a – структурный элемент, применяемый для операции «дилатация».

То есть автор предлагает применять двойную дилатацию для улучшения качества размытия, в результате чего получается область, которая является фоном для текста (см. рис. 7). На рис. 7, a показано изображение, полученное в результате применения дифференциального оператора Собеля и последующей его бинаризации, на рис. 7, b – результат применения выведенной автором формулы к изображению на рис. 7, a .

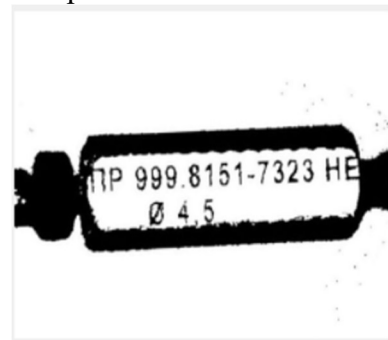


Рис. 6. Результат аффинного преобразования «поворот» на угол Θ

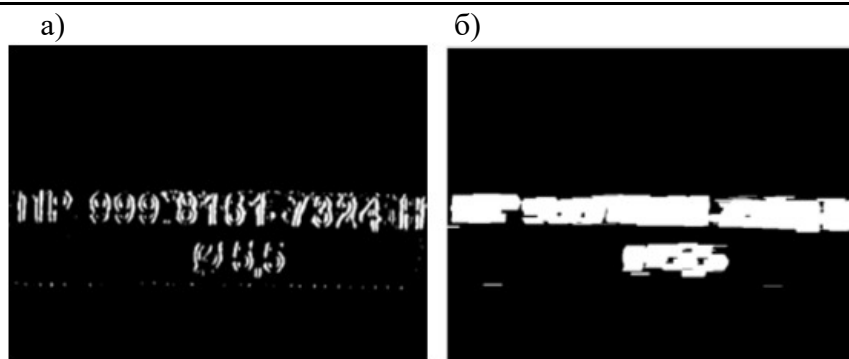


Рис. 7. Результат применения формулы (3) к предварительно обработанному изображению оператором Собеля и методом Оцу: а – исходное; б – обработанное

Далее над изображением, полученным в результате применения формулы (3), необходимо провести контурный анализ. Контурный анализ производим цепным кодом Фримена [12] с аппроксимацией Teh-Chin [12]. Обнаруженные контуры соединяются, накладываются на исходное изображение, и выполняется бинаризация полученной тестовой области.

Результат работы полного программного компонента представлен на рис. 8.

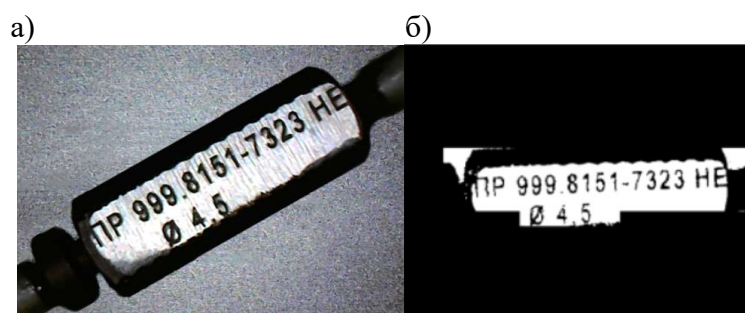


Рис. 8. Финальный результат работы программы: а – исходное изображение; б – обработанное

На рис. 8, а представлено исходное изображение, на рис. 8, б – то же изображение, пропущенное через разработанный автором программный компонент, в котором сначала было применено преобразование Хафа с предварительным анализом области, а далее полученный результат прошёл через фильтр, основанный на морфологической обработке изображений.

Результаты

Работа предложенной автором методики по обнаружению текстовых областей с предварительным поворотом изображения детали (если требуется) проверялась на реальных изображениях бирки с лазерной гравировкой (подобные рис. 8, а). Автор предлагает сравнить предложенную методику, основанную на использовании методов математической морфологии, с известными на сегодняшний день алгоритмами SWT и MSER, основная идея работы которых заключается в том, что буквы и цифры на изображении, как правило, имеют постоянную толщину штриха [10].

Для сравнения работы алгоритмов для локализации текста используются следующие метрики [10]:

1. Точность локализации. Эта метрика отражает вероятность того, что выделенные текстовые области являются корректными.
2. Полнота локализации. Эта метрика отражает вероятность того, что корректные текстовые области были выделены.
3. Время работы алгоритмов.

Результаты сравнения работы алгоритмов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты сравнения работы алгоритмов

Метод	Точность локализации, %	Полнота локализации, %	Время работы с одним изображением, с
SWT	91	83	0,23
MSER	93	88	0,21
Методика, предложенная автором	96	85	0,17

Как видно из табл. 1, предложенная автором методика показывает высокую скорость в сравнении с другими известными алгоритмами. Не самый лучший показатель полноты локализации обусловлен тем, что предложенная автором методика не изотропна, т.к. применение дифференциального оператора к изображению осуществляется только в горизонтальном направлении, но этот недостаток устраняется вышеописанным предварительным анализом областей с последующим применением алгоритма Хафа.

Заключение

Основная цель работы была достигнута. На практике был реализован программный компонент с предложенной автором методикой, оптимизированный алгоритм предварительной обработки текстовых изображений, снятых с металлических поверхностей с помощью USB-устройств. Программный компонент продемонстрировал высокое качество выделения текстовых групп из изображений, что позволило в дальнейшем при передаче этих изображений в стандартные OCR-системы получить 100 % распознавание снятых текстовых надписей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмицкий, Н. Н. Обнаружение фрагментов текста на изображениях реальных сцен на базе свёрточной нейросетевой модели / Н. Н. Кузьмицкий // Информатика. – 2015. – № 2(46). – С. 12-21.
2. Yin, X.-C. Multi-orientation scene text detection with adaptive clustering / X.-C. Yin, W.-Y. Pei, J. Zhang, H.-W. Hao // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2015. – Vol. 37, Issue 9. – P. 1930-1937. – DOI: 10.1109/TPAMI.2014.2388210.
3. Zuo, Z.-Y. Multi-strategy tracking based text detection in scene videos / Z.-Y. Zuo, S. Tian, X.-C. Yin // 13th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). – 2015. – P. 66-70. – DOI: 10.1109/ICDAR.2015.7333727.
4. Koo, H. I. Scene text detection via connected component clustering and nontext filtering / H. I. Koo, D. H. Kim // IEEE Transactions on Image Processing. – 2013. – Vol. 22, Issue 6. – P. 2296-2305. – DOI: 10.1109/TIP.2013.2249082.
5. Болотова, Ю. А. Распознавание автомобильных номеров на основе метода связанных компонент и иерархической временной сети / Ю. А. Болотова, В. Г. Спицын, М. Н. Рудомёткина // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 275-280. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-275-280.
6. Столяров, В. Я. Оценка эффективности применения контурной обработки к изображениям с лазерной гравировкой / В. Я. Столяров, В. А. Тихомиров // Актуальные научные исследования в современном мире: сборник Междунар. науч.-практ. конф., София, Болгария, 2018 (World of Sciens). – С. 84-88.
7. Epshtein B., Ofek E., Wexler Y. Detecting text in natural scenes with stroke width transform // Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2012. – P. 2963-2970.
8. Neumann, L. A method for text localization and recognition in real-world images / L. Neumann, J. Matas // 10th Asian conference on Computer vision, 2012. – P. 770-783.
9. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений: учеб. пособие / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ. Л. И. Рубанова, П. А. Чочиа; под ред. П. А. Чочиа. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
10. Otsu, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms / N. Otsu // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1979. – Vol. 9, No. 1. – Pp. 62-66.



11. Визильтер, Ю. А. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabView и Imaq Vision: учеб. пособие для вузов / Ю. А. Визильтер, В. А. Князь, С. Ю. Желтов; под ред. В. А. Мовчан. – М.: ДМК-Пресс, 2016. – 464 с.
12. Фурман, Я. А. Введение в контурный анализ; приложение к обработке изображений и сигналов: учеб. пособие для вузов / Я. А. Фурман, А. К. Передреев, А. В. Кревецкий; под ред. Я. А. Фурман. – М.: Физматлит, 2003. – 592 с.
13. Красильников, Н. А. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений: учеб. пособие для вузов / Н. А. Красильников. – СПб.: BHV, 2011. – 608 с.
14. Ghosh P., Deguchi K. Mathematics of shape description: a morphological approach to image processing and computer graphics [Wiley, 2008].
15. Jung, K. Text information extraction in images and video: a survey / K. Jung, K. Kim, A. K. Jain // Pattern Recognition. – 2004. – Vol. 5. – P. 977-997.
16. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман; пер. с англ. – М.: Бином, 2006. – 752 с.
17. Андрианов, А. И. Локализация текста на изображениях сложных графических сцен [Электронный ресурс] / А. И. Андрианов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=9311> (дата обращения: 12.05.2020).
18. Epshtein, B. Detecting text in natural scenes with stroke width transform / B. Epshtein, E. Ofek, Y. Wexler // Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2012. – P. 2963-2970.
- 19 Neumann, L. A method for text localization and recognition in real-world images / L. Neumann, J. Matas // 10th Asian conference on Computer vision. – 2012. – P. 770-783.
20. Кэлер, А. Изучаем OpenCv 3: учеб. пособие / А. Кэлер, Г. Брэдски; пер. с англ. А. А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 826 с.
21. Дегтярева, А. Преобразование Хафа [Электронный ресурс] / А. Дегтярева, В. Вежневек // Компьютерная графика и мультимедиа. – 2003. – Вып. № 1(1). – Режим доступа: <https://cgm.computergraphics.ru/content/view/36> (дата обращения: 12.05.2020).

Афанасьева Ю. И., Рыбаков А. В., Шурпо А. Н.
Yu. I. Afanasyeva, A. V. Rybakov, A. N. Shurpo

**О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
«УМНЫХ СИСТЕМ»**

ON THE POSSIBILITY OF PRODUCING FOOD USING «SMART SYSTEMS»

Афанасьева Юлия Игоревна – магистр Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (Россия, Москва); тел. +7(977)915-62-79. E-mail: julya.afan@gmail.com.

Mrs. Yulya I. Afanasyeva – Student, Moscow State Technological University «STANKIN» (Russia, Moscow); tel. +7(977)915-62-79. E-mail: julya.afan@gmail.com.

Рыбаков Анатолий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (Россия, Москва); тел. 8(499)973-34-42. E-mail: avr48@rambler.ru.

Mr. Anatoly V. Rybakov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Automated Information Processing Systems and Management, Moscow State Technological University «STANKIN» (Russia, Moscow); tel. 8(499)973-34-42. E-mail: avr48@rambler.ru.

Шурпо Александр Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории № 1 Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук (Россия, Москва); тел. +7(499)978-26-02, +7(910)451-98-12. E-mail: a-shurpo@yandex.ru.

Mr. Aleksandr N. Shurpo – PhD in Engineering, Senior Staff Scientist Laboratory № 1 of Institute of Engineering and Design Informatics of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow); tel. +7(499)978-26-02, +7(910)451-98-12. E-mail: a-shurpo@yandex.ru.

Аннотация. В данной статье рассматривается возможность применения мультиагентных систем при производстве пищевых продуктов.

Summary. This article discusses the possibility of using multi-agent systems in food production.

Ключевые слова: мультиагентные системы, умный город, пищевые производства.

Key words: multi-agent systems, smart city, food production.

УДК 004.9:664

На сегодняшний день внедрение в жизнь человечества «умных систем» является очень востребованной задачей. Большое количество учёных разрабатывают различные модели для облегчения жизни людей: мультиварки, пылесосы, отопительные системы и т.п. – а кроме этого уже разрабатываются концепции «Умного города» [7]. Опыт показывает, что в современной городской среде в связи со стремительным развитием всех социальных сфер жизни необходимо переходить от традиционных сфер к внедрению «умных систем». Однако сразу же возникает вопрос: а почему концепцию «умных систем» не применить на производствах?

Рассмотрим, на чём основаны существующие умные концепции.

Все существующие предложения основаны на мультиагентной системе. По мнению автора А. И. Микова, мультиагентная система представляет собой множество агентов, которые взаимодействуют между собой с соответствующими установленными нормами. Нормы – это порядок того, что должно выполняться. Важно отметить, что эти нормы должны предусматривать, например, поведение при нештатных ситуациях. Нормы не только будут учитывать то, как работают вычислительные устройства, но и должны управлять работой всех агентов. Само понятие «агент» подразумевает в себе программы, людей, технические устройства, которые функционируют между

собой, например, обязывают, запрещают, разрешают те или иные действия для работы всей системы, таким образом устанавливая единую нормативную систему [5].

Мультиагентные системы подразумевают то, что существует определённый агент, который выполняет свою определённую роль/функцию, которую можно с него спросить. Внедрение данных систем набирает большую популярность в таких областях, как разработка автоматизированных систем управления, управление перегрузкой в сетях связи, управление движением групп мобильных роботов, в бизнес-процессах (адаптивное планирование в реальном масштабе времени морских танкеров, таксомоторных перевозок, железнодорожных поездов, автомобильного транспорта, цепочек поставок, производственных процессов и малых космических спутников) [4].

Разработка и внедрение мультиагентных систем – новый и современный метод, имеющий более гибкую систему. При возникновении каких-либо неполадок с помощью единой базы агрегатора можно подобрать для любой из компаний такой способ, который будет осуществлять тот или иной производственный процесс, например, поставку сырья или готовых материалов в зависимости от ситуации.

Как правило, традиционная система не может среагировать на изменение ситуации. Также следует отметить, что классические модели неприемлемы для их использования в современной жизни, так как классический способ предусматривает строгий алгоритм, где происходит поиск лучшего варианта, а в мультиагентной системе решение возникает само. Тем более, как правило, в жизни людей возникают различные непредвиденные обстоятельства, которые необходимо решать в условиях ограниченного бюджета и времени. Для просчёта всех этих ситуаций необходима сложная вычислительная техника, или же данного вида расчётов может вообще не существовать.

В качестве примера можно рассмотреть следующую существующую ситуацию. Человеку необходимо доехать из одной части города в другую. В классической системе человек должен либо стоять у дороги и ловить такси, либо звонить знакомым, либо же искать другие варианты, как ему добраться до нужного места. Сейчас же при помощи мультиагентных систем достаточно иметь смартфон с выходом в интернет, куда бесплатно скачивается программа, в которой можно дистанционно заказать машину необходимого класса с возможностью выбора как таксиста, так и ближайшего к клиенту автомобиля.

К данной системе привлекаются водители, готовые работать, у которых есть свои автомобили, и благодаря данному сервису у них есть клиенты. Примером работы данной системы является компания «Uber». При этом за сделки компания получает примерно 10-15 % от совершённой услуги [13].

Помимо вышеприведённого примера, также существует другой вид концепции «Умного города». Сбербанк, Visa и «Азбука вкуса» начали осуществлять новый проект, где магазин функционирует без продавцов и касс – списание денежных средств происходит через мобильное приложение, а за покупателями следит система компьютерного зрения [6].

Данные системы позволяют экономить самые главные ресурсы – время и деньги. Денежные ресурсы вполне возможно восстановить, а вот время – нет. Данный гибкий подход не может рассматриваться как классическая рабочая система.

На рис. 1 представлены две схемы работы. Первая – классическая, где выполняется работа, которую поручают исполнителю, и зачастую человек работает менее продуктивно, так как она ему неинтересна. Во второй схеме идёт командная работа, к ней привлекаются сторонние компании или люди, которые могут разрабатывать и внедрять современные идеи.

Довольно часто мультиагентные системы рождаются из стартапов. Стартап – это временный статус, применяемый ко всем начинаниям, бизнес-предприятиям, проектам, когда осуществляется поиск жизнеспособной бизнес-модели [9; 12].

На сегодняшний день мультиагентные системы не применяются в промышленности. А почему бы не рассмотреть применение данного метода при производстве пищевых продуктов?

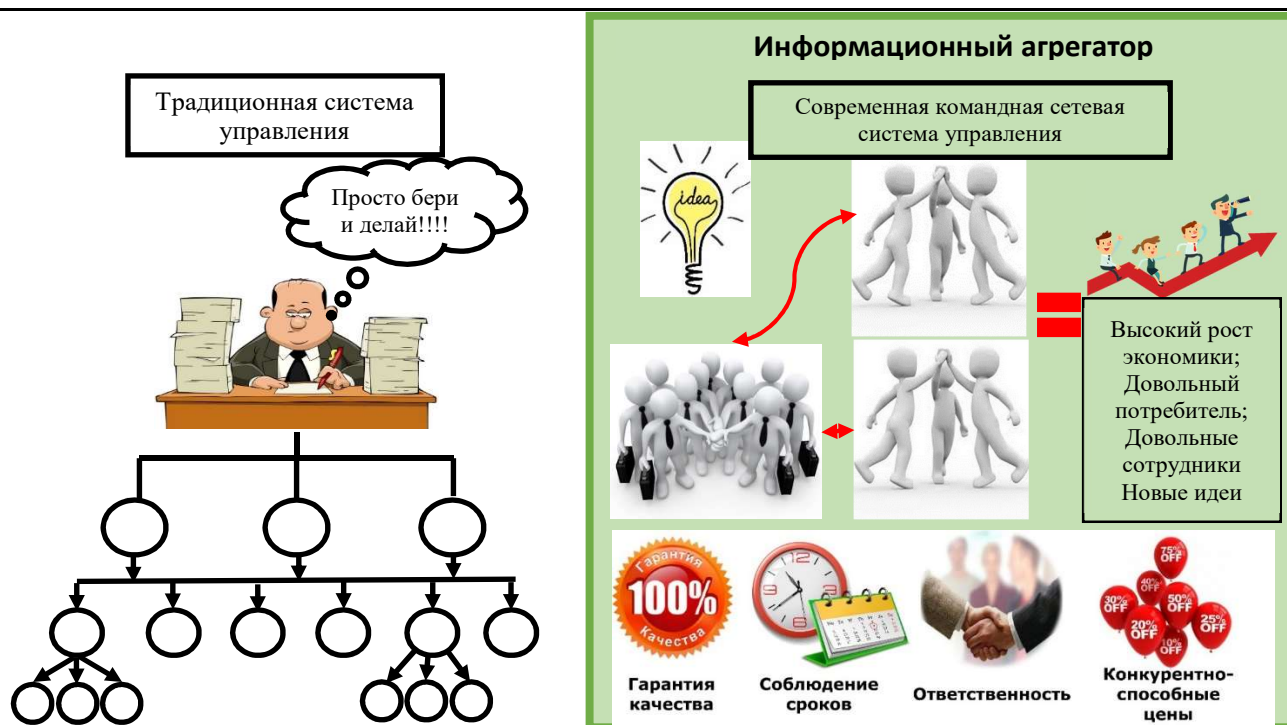


Рис. 1. Классическая и мультиагентная системы

Компания «Uber» – одна из первых, применившая мультиагентную систему [13] с требованиями, при которых цифровая платформа будет работать. К этим требованиям относятся:

- большие рыночные возможности;
- высокая частота использования;
- способность изменить положение вещей;
- фрагментация спроса и предложения;
- разработка сетевого эффекта.

Разберём каждый из них для возможного применения системы «Uber» при производстве пищевых продуктов.

Большие рыночные возможности. Пищевая промышленность не только играет важную роль в качестве питания, но и характеризует экономическое развитие страны. Питание – важный фактор, без которого люди не могут существовать, в связи с чем производство пищевых продуктов будет необходимо всегда. В качестве экономического показателя данная отрасль выступает таким образом, что люди постоянно приобретают пищевые продукты.

Согласно данным Евростата, наша страна не входит в первые 28 стран по доле расходов на пищевые продукты и безалкогольные напитки к общему объёму расходов на потребление семьи. Самый лучший показатель у Великобритании – 7,8 %, а вот жители Российской Федерации тратят 31,2 % от своего месячного заработка (см. рис. 2).

Следующим пунктом, согласно компании «Uber», является **высокая частота использования**. Согласно закону рационального питания, необходимо питаться 3-4 раза в день. Также, согласно рекомендациям Всемирной Организации Здравоохранения (ФАО/ВОЗ), питание должно быть разнообразным [10]. Следовательно, люди имеют высокую частоту использования пищевых продуктов, также необходимо отметить, что употреблять различные продукты питания очень важно.

Следующим пунктом является **способность изменить положение вещей**. Данный пункт подразумевает внедрение изменений. Он возможен, так как на сегодняшний день происходит постоянное развитие и внедрение различных решений. Компания не будет конкурентоспособной, если будет использовать устаревшие решения (см. табл. 1).

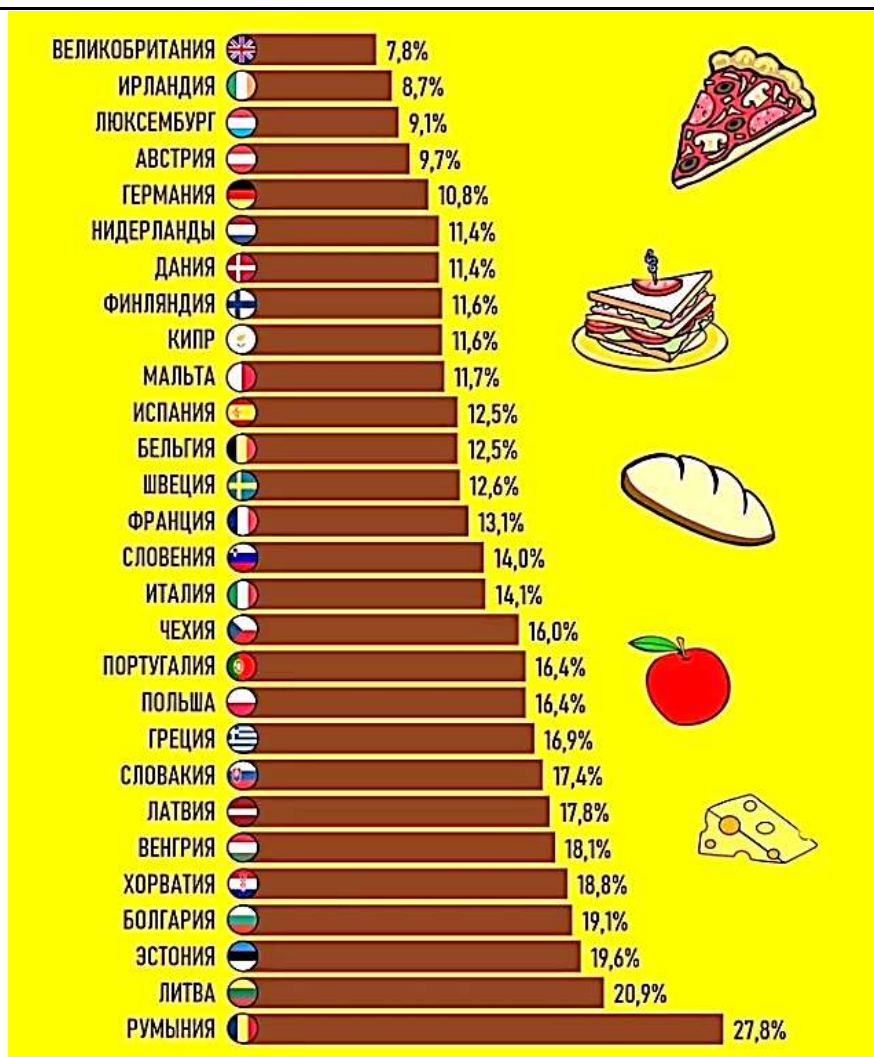


Рис. 2. Доля расходов на продукты питания и безалкогольные напитки к общему объёму расходов на потребление семьи [1; 3; 11]

Ярким примером может служить производитель шоколадной пасты «Nutella Ferrero S.p.A.», который вместе с агентством «Ogilvy & Mather Italia» разработал проект по выпуску 7 млн банок всем известной шоколадной пасты «Nutella». Все эти этикетки были созданы при помощи специального алгоритма, который наносил на этикетку десятки цветов и узоров, которые были объединены в различной последовательности. Каждая из комбинаций напечатана на этикетке с уникальным ID-кодом для её кастомизации (см. рис. 3). Согласно данным итальянских рекламных агентств, вся партия в 7 млн банок десерта была распродана за месяц [8].

Следующим пунктом является **фрагментация спроса и предложения**. Само по себе понятие «фрагментация» подразумевает разделение. По своей сути спрос и предложение – это неразделимые части, но компания «Uber» рассматривает данный момент как соотношение этих двух величин, где возможно применить динамические коэффициенты для обеспечения получения автомобиля даже в моменты пикового спроса. Платформа оповещает водителей, в каких районах отмечается повышенный спрос, таким образом клиент быстрее получает возможность воспользоваться услугой [2].

Последним пунктом компания «Uber» обозначила **разработку сетевого эффекта**.

Два последних пункта можно применить в пищевой промышленности, рассмотрев следующий пример. Аналогичная система уже существует. Она была разработана в Китае и известна во всём мире как торговая площадка, принадлежащая «Alibaba Group».

Таблица 1

Действие законов развития технологической системы применительно к организациям сельского хозяйства

<p><u>Надсистема в прошлом.</u> <u>Ручной труд</u></p> 	<p><u>Надсистема в настоящем.</u> <u>Агропромышленные комплексы</u></p> 	<p><u>Надсистема в будущем.</u> <u>Информационно-технологическое производство</u></p> 
<p><u>Система в прошлом:</u> Ручной труд, большие временные затраты, сложность обработки, недостаточное развитие техники</p>	<p><u>Система в настоящем:</u> Применение автоматизации, замена ручного труда роботами, отсутствие единства цен на продукцию; сложность систем</p>	<p><u>Система в будущем:</u> Полностью автоматизированная система; заинтересованность в производстве, командная работа; возможность сотрудничества любых производств</p>
<p><u>Подсистема в прошлом:</u> Простые изделия, сделанные руками; необходимость прикладывания большого количества сил для осуществления той или иной деятельности</p>	<p><u>Подсистема в настоящем:</u> Сложные системы, где необходимо применение автоматизации, но, к сожалению, недостаточно применяются; недостаточный контроль в управлении производством</p>	<p><u>Подсистема в будущем:</u> Возможность развиваться небольшим предприятиям; снижение количества импортных товаров; улучшение качества готовых продуктов и полный контроль производства</p>



Рис. 3. Проект компании «Ogilvy & Mather Italia»

В самом начале своего пути Джек Ма, создатель данного решения, применил эту разработку для каталога торговых предприятий, а в итоге всё это переросло во всемирную торговую площадку. На сегодняшний день это одно из самых популярных приложений и сайтов, которое насчитывало на третий квартал 2018 года 601 млн клиентов, а его оборот в 2018 финансовом году составил 2,3 млрд долларов.

Сетевой эффект работает следующим образом: разные группы товаров, объединённые в одну систему, к которой подключены различные поставщики, способные доставлять всю свою продукцию в любую точку мира.

Таким образом, можно сделать следующий вывод: концепцию мультиагентных систем можно применить в пищевой промышленности. Однако для этого необходимо: производство качественных пищевых продуктов и вспомогательных материалов; качественно выращенное сырьё; добросовестные поставщики, которые будут перевозить продукцию в соответствии с технологическими режимами. Объединение всех участников, которые производят пищевые продукты и опираются на существующий принцип Европейского союза «от поля к вилке», можно представить следующей схемой (см. рис. 4).



Рис. 4. Объединённая схема всех участников мультиагентной цепи при производстве пищевых продуктов

На данном рисунке видно, что объединение всех участников в единую систему (агрегатор) создаёт мультиагентную систему. Каждый участник сможет показывать, «на что он способен», и его смогут выбирать те, кто захочет с ним сотрудничать. К сожалению, в России крупнейшие агропромышленные комплексы «вытесняют» существующее большое количество мелких предприятий, которые в принципе не смогут «выжить» и становятся неконкурентоспособными. Данная идея – это увеличение количества небольших отечественных предприятий, которые смогут увеличить количество отечественных пищевых продуктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александрова, Л. Сколько тратят на еду в разных странах: считаем процент зарплаты [Электронный ресурс] / Электронное периодическое издание «МК.ru». – Режим доступа: <https://www.mk.ru/economics/2018/12/17/skolko-tratyat-na-edu-v-raznykh-stranakh-schitaem-procent-zarplaty.html> (дата обращения: 29.05.2020).
2. Баранова, А. Глава Uber в России рассказал, как формируется цена поездки [Электронный ресурс] / Интернет-портал «Российской газеты». – Режим доступа: <https://rg.ru/2017/06/14/stalo-izvestno-kak-formiruetsia-cena-na-poezdku-uber.html> (дата обращения: 03.06.2020).
3. Быркова, Е. Инфографика: сколько тратят на еду в Европе? [Электронный ресурс] / «ГРОШ ЖУРНАЛ», 2020. – Режим доступа: <https://grosh-blog.ru/infografika-skolko-tratyat-na-edu-v-evrope/> (дата обращения: 25.05.2020).
4. Управление на базе мультиагентных систем [Электронный ресурс] / Национальный открытый университет ИНТУИТ, 2003-2020. – Режим доступа: <https://www.intuit.ru/studies/courses/4115/1230/lecture/24081> (дата обращения: 01.06.2020).
5. Миков, А. И. Нормативные мультиагентные системы / А. И. Миков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 6 (155). – С. 123-131.
6. Чернышова, Е. Сбербанк и Visa запустят магазины без касс и продавцов. Совершать покупки позволит технология компьютерного зрения [Электронный ресурс] / АО «РОСБИЗНЕСКОНСАЛТИНГ», 1995-2020. – Режим доступа: <https://www.rbc.ru/finances/20/05/2020/5ec410b19a7947391d0f2ab7> (дата обращения: 12.06.2020).
7. Ржевский, Г. Умный город как сложная адаптивная система / Г. Ржевский, С. С. Кожевников, М. Свистек // Онтология проектирования. – 2020. – Т. 10, № 1 (35). – С. 7-21.
8. Селезнева, А. Nutella использовала алгоритм, чтобы сделать семь миллионов баночек с уникальным узором [Электронный ресурс] / vc.ru. – Режим доступа: <https://vc.ru/marketing/24240-nutella-italy> (дата обращения: 04.06.2020).
9. Титов, В. А. Реализация мультиагентной модели «стартап – инвестор – корпорация и государство» / В. А. Титов, Р. Р. Вейнберг, В. М. Савинова // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 12-1. – С. 217-222.
10. Здоровое питание [Электронный ресурс] / Всемирная организация здравоохранения, 2020. – Режим доступа: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet> (дата обращения: 05.06.2020).
11. Eurostat [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ec.europa.eu/eurostat> (дата обращения: 02.06.2020).
12. Суть стартапа, что это такое? [Электронный ресурс] / Futureinapps. – Режим доступа: https://zen.yandex.ru/media/futureinapps/sut-startapa-cto-eto-takoe-5dbbd3578f011100adbd6658?utm_source=serp (дата обращения: 05.06.2020).
13. История Uber [Электронный ресурс] / Uber Technologies Inc., 2018. – Режим доступа: <https://www.uber.com/ru/newsroom/история/> (дата обращения: 28.05.2020).



Ким К. К., Панычев А. Ю., Иванов С. Н.
K. K. Kim, A. Yu. Panychev, S. N. Ivanov

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННОЙ МАШИНЕ МАЛОИНЕРЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

TRANSIENTS IN AN ASYNCHRONOUS MACHINE OF A LOW-INERTIA ELECTRIC DRIVE

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения (Россия, Санкт-Петербург); тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Mr. Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head of Theoretical Electrical Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Панычев Александр Юрьевич – кандидат экономических наук, доцент, ректор ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Московский проспект, дом 9; тел. 8(812)310-25-21. E-mail: rector@pgups.ru.

Alexander Yu. Panychev – PhD in Economics, Associate Professor, Rector, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); 9, Moskovsky Ave., Sankt-Petersburg, Russia; tel. 8(812)310-25-21. E-mail: rector@pgups.ru.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)185-91-20. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, Professor, Department of Electromechanics, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)185-91-20. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Аннотация. В статье рассмотрен метод расчёта переходных процессов в асинхронных машинах, в том числе и в двигателях с глубоким пазом, который может быть применён при синтезе систем управления электромеханическим приводом. Вращающий момент, развиваемый машиной, рассматривается в виде суммы статической, апериодических и периодических составляющих. Приводятся выражения для их расчёта. Аналитическое представление апериодического момента имеет вид ряда затухающих составляющих, коэффициент затухания которых определяется значением электромагнитных постоянных обмоток и электромеханической постоянной системы. Периодический момент включает составляющие, изменяющиеся с частотой, близкой к частоте приложенного напряжения, и представляет собой медленно пульсирующий момент. В статье приведены результаты анализа общего выражения момента и показано, что апериодические составляющие моментов, образованные токами малой частоты, относительно невелики, как и составляющие, пульсирующие во времени с большой частотой. Основными составляющими вращающих моментов являются медленно пульсирующие и апериодические составляющие, образованные за счёт токов и потокосцеплений. Показано, что переход вращающих моментов от одного установившегося значения к другому происходит по закону, определяемому суммой экспоненциальных и синусоидальной функций. Рассмотренный метод расчёта переходных процессов представляет инженерную методику, позволяющую рассчитать механическую характеристику привода, а также смоделировать динамику его работы и решить вопрос о целесообразности учёта ускорения без подробного расчёта характеристик.

Summary. The article considers a method for calculating transients in asynchronous machines, including deep-groove motors, which can be used in the synthesis of electromechanical drive control systems. The torque developed by the machine is considered as the sum of static, aperiodic and periodic components. Expressions for their calculation are given. The analytical representation of the aperiodic moment has the form of a series of damped components, the damping coefficient of which is determined by the value of the electromagnetic constant windings and the electromechanical constant of the system. The periodic moment includes components that change with a frequency close to the frequency of the applied voltage, and is a slowly pulsating moment. The article presents the results of the analysis of the general expression of the moment and shows that the aperiodic components of moments formed by low-frequency currents are relatively small and the components pulsating in time with a high frequency. The main components of the torques are slowly pulsating and aperiodic components formed by currents

and flow couplings. It is shown that the transition of torques from one steady-state value to another occurs according to a law determined by the sum of exponential and sinusoidal functions. The considered method of calculating transients is an engineering technique that allows you to calculate the mechanical characteristics of the drive, as well as to simulate the dynamics of its operation and solve the question of the appropriateness of accounting for acceleration, without making a detailed calculation of the characteristics.

Ключевые слова: синтез системы управления, асинхронная машина, вращающий момент, ускорение.

Key words: synthesis of a control system, induction machine, torque, acceleration.

УДК 621.3.019

Введение

При синтезе систем управления малоинерционных электроприводов переменного тока переходные процессы в асинхронных машинах при необходимости определения движения ротора могут рассматриваться с использованием общеизвестных соотношений для вращающих моментов, предложенных М. Клоссом и рассмотренных авторами в [1-3]. В настоящей статье рассматриваются переходные процессы при набросе постоянной во времени нагрузки в предположении, что её величина не превышает максимального момента двигателя по статической характеристике. Это условие, как известно, всегда соблюдается в режимах ударной нагрузки в безмаховиковых электроприводах и в установках с небольшими дополнительными маховыми массами.

При рассмотрении таких режимов значительный интерес представляет расчёт переходных вращающих моментов. Этот расчёт позволяет получить более точное представление о характере движения привода, скорости привода, и, следовательно, оптимизировать процесс управления производственным процессом.

Постановка задачи исследования

Для расчёта указанной характеристики можно использовать метод расчёта переходных процессов, изложенный в [4]. Однако в данном случае эта задача решается более просто, если использовать метод последовательных приближений. Сущность этого метода в применении к рассматриваемой задаче заключается в последовательном уточнении значения величины β в выражении $e^{-\beta t}$, которое характеризует изменение скорости при набросе постоянной нагрузки.

В первом приближении с учётом принятых в [1-4] обозначений вращающий момент асинхронной машины можно представить следующим образом:

$$M = \frac{U_{m1}^2}{r_2} s. \quad (1)$$

Тогда уравнение равновесия моментов системы будет

$$H \frac{ds}{dt} + \frac{U_{m1}^2}{r_2} s = M_c, \quad H = \frac{2I\omega_s^2}{3U_{m1}I_{m1}}. \quad (2)$$

Обозначая скольжение машины, соответствующее начальной нагрузке (M_{c0}), через s_0 , а через s_k – скольжение, определяемое приложенным моментом (M_c), решение уравнения (2) примет вид

$$s = s_k - \Delta s e^{-\beta t},$$

где

$$\Delta s = |s_0 - s_k|, \quad \beta = \frac{U_{m1}^2}{r_2 H}.$$

Соответственно для скорости

$$\omega = \omega_k + \Delta \omega e^{-\beta t}, \quad (3)$$

где $\Delta \omega = |\omega_0 - \omega_k|$, здесь ω_0, ω_k – соответственно начальная и конечная скорости.

Таким образом, в первом приближении изменение скорости происходит по экспоненциальному закону, причём показатель экспоненты представляет величину, обратную механической постоянной времени системы при стационарном режиме.

Для определения второго приближения на основании соотношения (3) и двух уравнений [1]

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{l}_1}{dt} - \frac{x_{12}}{x'_1} (\rho_2 \sigma - j\omega) \bar{l}_2 + \frac{1}{\sigma} [\rho_1 + j(1 - \sigma)\omega] \bar{l}_1 &= \frac{\bar{u}_1}{x'_1}, \\ \frac{d\bar{l}_2}{dt} + \frac{1}{\sigma} (\rho_2 \sigma - j\omega) \bar{l}_2 - \frac{x_{12}}{x_2 \sigma} (\rho_1 \sigma + j\omega) \bar{l}_1 &= -\frac{(1 - \sigma)}{x_{12} \sigma} \bar{u}_1 \end{aligned} \quad (4)$$

находится выражение переходных токов с последующим переходом к выражению вращающих моментов. Последние, очевидно, будут зависеть от параметров машины и величин ω_k , $\Delta\omega$, β , то есть

$$M = f(\rho_2, x'_1, \sigma, \omega_k, \Delta\omega, \beta). \quad (5)$$

Построенная на основании приведённого уравнения характеристика моментов, вообще говоря, будет отличаться от статической. Однако вследствие монотонного изменения эта характеристика может быть аппроксимирована некоторой прямой, но с наклоном, отличным от наклона первоначальной характеристики моментов (1). Таким образом, для величины β получается новое значение, которое при подстановке в уравнение (5) даёт вращающий момент для перехода к следующему приближению.

Очевидно, этот процесс может быть ускорен, если в каждом из приближений кривую моментов аппроксимировать отрезками прямой, а величину β в уравнениях (3) и (5) рассматривать как переменный параметр.

Из изложенного нетрудно видеть, что наиболее важным вопросом, возникающим при таком способе анализа, является определение выражения для вращающих моментов (5). Это выражение можно получить в достаточно простом виде, если при рассмотрении уравнений (5) применить метод малого параметра [1].

Результаты исследования. Первоначально решаются дифференциальные уравнения переходных процессов при набросе постоянной нагрузки и производится анализ выражений токов.

В соответствии с выражением (3) уравнения (4) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{l}_1}{dt} - \frac{x_{12}}{x'_1} (\rho_2 \sigma - j\omega_k) \bar{l}_2 + \frac{1}{\sigma} [\rho_1 \sigma + j(1 - \sigma)\omega_k] \bar{l}_1 &= \frac{\bar{u}_1}{x'_1} - \Delta\omega e^{-\beta t} \left(\frac{x_{12}}{x'_1} \bar{l}_2 + \frac{1 - \sigma}{\sigma} \bar{l}_1 \right), \\ \frac{d\bar{l}_2}{dt} + \frac{1}{\sigma} (\rho_2 \sigma - j\omega_k) \bar{l}_2 - \frac{x_{12}}{x_2 \sigma} (\rho_1 \sigma + j\omega_k) \bar{l}_1 &= \frac{x_1}{x_{12}} \left[\frac{1 - \sigma}{x'_1} \bar{u}_1 - \Delta\omega e^{-\beta t} \left(\frac{x_{12}}{x'_1} \bar{l}_2 + \frac{1 - \sigma}{\sigma} \bar{l}_1 \right) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Рассматривая величину $\Delta\omega$ как малый параметр, можем получить решения приведённых уравнений в виде ряда, члены которого расположены по степеням $\Delta\omega$:

$$\bar{l} = \bar{l}^{(0)} + \sum_{n=1}^{\infty} \Delta\omega^n \bar{l}^{(n)}, \quad (7)$$

где $\bar{l}^{(0)}$ – порождающее решение; $\Delta\omega^n \bar{l}^{(n)}$ – дополняющее решение n -го порядка.

Причём эти решения должны удовлетворять следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} L_1(\bar{l}_1^{(0)}, \bar{l}_2^{(0)}) &= \frac{\bar{u}_1}{x'_1}, \quad L_2(\bar{l}_1^{(0)}, \bar{l}_2^{(0)}) = -\frac{x_1}{x_{12}} \frac{1 - \sigma}{x'_1} \bar{u}_1, \\ L_1(\bar{l}_1^{(n)}, \bar{l}_2^{(n)}) &= -e^{-\beta t} \left(\frac{x_{12}}{x'_1} \bar{l}_2^{(n-1)} + \frac{1 - \sigma}{\sigma} \bar{l}_1^{(n-1)} \right), \\ L_2(\bar{l}_1^{(n)}, \bar{l}_2^{(n)}) &= e^{-\beta t} \frac{x_1}{x_{12}} \left(\frac{x_{12}}{x'_1} \bar{l}_2^{(n-1)} + \frac{1 - \sigma}{\sigma} \bar{l}_1^{(n-1)} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где L_1 и L_2 – левые части уравнений (6).

Порождающее решение для определения выражения (7) получается из уравнений (7) в предположении, что члены их правой части, содержащие величину $\Delta\omega$, равны нулю. Тогда имеет место следующее соотношение:

$$\bar{i}^{(0)} = \left(\frac{\alpha_2 - j}{\alpha_1 - \alpha_2} e^{\alpha_1 t} - \frac{\alpha_1 - j}{\alpha_1 - \alpha_2} e^{\alpha_2 t} \right) \Delta I + I e^{jt}, \quad (9)$$

где I – установившийся ток при скорости ω_k ; ΔI – разность токов, соответствующих установившимся режимам при скоростях ω_0 и ω_k ; α_1, α_2 – корни характеристического уравнения, соответствующего режиму при конечной скорости, то есть

$$I_1 = \frac{U_{m1}}{x'_1} \frac{\rho_2 \sigma + j s_k}{(j - \alpha_1)(j - \alpha_2)}, \quad I_2 = \frac{U_{m1}(1 - \sigma)}{x_{12} \sigma} \frac{j s_k}{(j - \alpha_1)(j - \alpha_2)},$$

$$\alpha_1 = -\rho_{v_1} + j v_1 = -\frac{\rho_1 + \rho_2 - j \omega_k}{2} - \sqrt{\left(\frac{\rho_1 + \rho_2 - j \omega_k}{2} \right)^2 - \rho_1(\rho_2 \sigma - j \omega_k)},$$

$$\alpha_2 = -\rho_{v_2} + j v_2 = -\frac{\rho_1 + \rho_2 - j \omega_k}{2} + \sqrt{\left(\frac{\rho_1 + \rho_2 - j \omega_k}{2} \right)^2 - \rho_1(\rho_2 \sigma - j \omega_k)}.$$

Из формального определения выражения (9) следует, что порождающее решение характеризует процесс при скачкообразном изменении скорости от значения, определяемого начальной нагрузкой (M_{c0}), до значения, соответствующего новой нагрузке (M_c).

При указанной форме изменения скорости машина приобретает такие же свойства, что и при внезапном изменении приложенных напряжений и постоянстве скорости.

Действительный характер изменения скорости, т.е. влияние электромеханической инерции системы на протекание процесса, учитывается путём введения в рассмотрение дополняющих решений. Как видно из выражения (7), число этих решений может быть сколь угодно большим, теоретически оно равняется бесконечности.

Так как число членов, образующих дополняющее решение, увеличивается непропорционально быстро с возрастанием его порядка, то нахождение суммарного значения этих решений представляет значительные трудности. Однако при некоторых условиях-ограничениях вопрос находит относительно простое решение.

При последовательном определении дополняющих решений относительно членов, содержащих величину σ ,

$$\delta = 1 - \frac{(j - \alpha_1)(j - \alpha_2)}{(j - \alpha_{10})(j - \alpha_{20})},$$

где α_{10} и α_{20} – корни характеристического уравнения при скорости ω_0 , принимаются следующие предположения:

$$e^{(-\beta + \alpha_1)t} \approx e^{\alpha_1 t}, \quad e^{(-\beta + \alpha_2)t} \approx e^{\alpha_2 t}.$$

Физическим обоснованием этому является малое значение их по амплитуде сравнительно с членами, не включающими σ , но имеющими такую же частоту, что и указанные.

Это приводит к возможности дополнительных упрощений. Вводятся следующие обозначения:

$$P^{(n)} = \frac{(-\beta + j) \dots (-n\beta + j)}{(-\beta + j - \alpha_1)(-\beta + j - \alpha_2) \dots (-n\beta + j - \alpha_1)(-n\beta + j - \alpha_2)},$$

$$I_m = \frac{U_{m1}(1 - \sigma)}{x'_1} \frac{\rho_2}{(j - \alpha_1)(j - \alpha_2)},$$

$$b = \frac{(-\beta + \alpha_1)}{(-\beta + \alpha_1 - \alpha_2)}, \quad c = \frac{-\beta + \alpha_2}{(-\beta + \alpha_2 - \alpha_1)}, \quad d = \frac{j\Delta\omega}{\alpha_1 - \alpha_2}.$$

Решение n -го порядка представляется в виде суммы трёх составляющих:

$$\bar{i}^{(n)} = \bar{i}_j^{(n)} + \bar{i}_{\alpha_1}^{(n)} + \bar{i}_{\alpha_2}^{(n)}.$$

С учётом принятых упрощений и обозначений эти составляющие можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{i}_{1j}^{(n)} &= -(j\Delta\omega)^n I_m P^{(n)} e^{(-n\beta+j)t}; \\ \bar{i}_{1\alpha_1}^{(n)} &= \frac{(j\Delta\omega)^n}{\alpha_1 - \alpha_2} I_m \{ P^{(n)} (j - n\beta - \alpha_2) + \\ &+ \frac{P^{(n-1)}}{\alpha_1 - \alpha_2} [((1-n)\beta + j - \alpha_1)c - ((1-n)\beta + j - \alpha_2)b] + \\ &+ \frac{P^{(n-2)}}{(\alpha_1 - \alpha_2)^2} [((2-n)\beta + j - \alpha_1)c^2 - ((2-n)\beta + j - \alpha_2)cb - \\ &- ((2-n)\beta + j - \alpha_1)cb + ((2-n)\beta + j - \alpha_2)b^2] + \dots \}; \\ \bar{i}_{1\alpha_2} &= -\frac{(j\Delta\omega)^n}{\alpha_1 - \alpha_2} I_m \left\{ P^{(n)} (-n\beta + j - \alpha_1) + \frac{P^{(n-1)}}{\alpha_1 - \alpha_2} [((1-n)\beta + j - \alpha_1)c - ((1-n)\beta + \right. \\ &+ j - \alpha_2)b] \frac{P^{(n-2)}}{(\alpha_1 - \alpha_2)^2} [((2-n)\beta + j - \alpha_1)c^2 - ((2-n)\beta + j - \alpha_2)cb - \\ &- ((2-n)\beta + j - \alpha_1)cb + ((2-n)\beta + j - \alpha_2)b^2] + \dots \}. \end{aligned}$$

Уравнения (8) представляются в виде

$$\begin{aligned} L_1(\bar{i}_1^{(n)}) &= -j \frac{d}{dt} e^{-\beta t} \left[\frac{x_{12}}{x'_1} \bar{i}_2^{(n-1)} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \bar{i}_1^{(n-1)} \right], \\ L_2(\bar{i}_2^{(n)}) &= \frac{x_1}{x_{12}} \left\{ j \frac{d}{dt} e^{-\beta t} \left[\frac{x_{12}}{x'_1} \bar{i}_2^{(n-1)} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \bar{i}_1^{(n-1)} \right] + \rho_1 \sigma \left[\frac{x_{12}}{x'_1} \bar{i}_2^{(n-1)} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \bar{i}_1^{(n-1)} \right] \right\}, \\ L(\bar{i}^{(n)}) &= \frac{d^2 \bar{i}^{(n)}}{dt^2} + (\rho_1 + \rho_2 - j\omega_k) \frac{d\bar{i}^{(n)}}{dt} + \rho_1 \sigma (\rho_2 - j\omega_k) \bar{i}^{(n)}. \end{aligned}$$

Во втором из приведённых уравнений величина

$$\rho_1 \sigma \left[\frac{x_{12}}{x'_1} \bar{i}_2^{(n-1)} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \bar{i}_1^{(n-1)} \right]$$

незначительна по сравнению с другой, поэтому следует, что

$$\bar{i}_2^{(n)} \approx -\frac{x_1}{x_{12}} \bar{i}_1^{(n)}. \quad (10)$$

Составляющая основной частоты, необходимая для определения суммарного значения всех решений,

$$\bar{i}_{1j} = -I_m \sum_{n=1}^{\infty} (j\Delta\omega)^n P^{(n)} e^{(-n\beta+j)t}. \quad (11)$$

Для составляющих частоты ν_1

$$\bar{t}_{1\alpha_1} = I_m \left[-\delta \frac{(j - \alpha_2)}{\alpha_1 - \alpha_2} + \frac{\delta z_{\alpha_1}^{(0)} + \sum_1^{\infty} (j\Delta\omega)^n (PZ_{\alpha_1})^n}{j\Delta\omega} \right] e^{\alpha_1 t}, \quad (12)$$

где

$$z_{\alpha_1}^{(n)} = (-n\beta + j - \alpha_2)d + (-n\beta + j - \alpha_1)d^2c - (-n\beta + j - \alpha_2)d^2b + \\ + (-n\beta + j - \alpha_1)d^3c^2 - (-n\beta + j - \alpha_2)d^3cb - \dots$$

Составляющие частоты ν_2 дадут

$$\bar{t}_{\alpha_2} = -I_m \left[-\delta \frac{(j - \alpha_1)}{\alpha_1 - \alpha_2} + \frac{\delta z_{\alpha_2}^{(0)} + \sum_1^{\infty} (j\Delta\omega)^n (PZ_{\alpha_2})^{(n)}}{j\Delta\omega} \right] e^{\alpha_2 t}, \quad (13)$$

где

$$z_{\alpha_2}^{(n)} = (-n\beta + j - \alpha_1)d - (-n\beta + j - \alpha_2)d^2b + (-n\beta + j - \alpha_1)d^2c - \\ - (-n\beta + j - \alpha_2)d^3cb + (-n\beta + j - \alpha_1)d^3c^2 + (-n\beta + j - \alpha_2)d^3b^2 - \dots; \\ z_{\alpha_{12}}^{(n)} = z_{\alpha_{12}}^{(n)} - j\Delta\omega.$$

На основании полученных выражений (11) – (13), соотношений (9) и (10) нетрудно найти роторные токи. Последние, очевидно, выразятся таким же образом, что и токи статора.

Таким образом, при внезапном увеличении механической нагрузки решения для токов получаются в виде суммы трёх бесконечных рядов, соответственно представленных выражениями (11) – (13).

Для анализа этих выражений необходимо рассмотреть вопрос сходимости. Так как все члены любого из указанных рядов имеют одинаковые частоты, то при рассмотрении этих рядов можно исключить соответствующий частотный множитель. Кроме того, вводится допущение о неучёте затуханий. Тогда сходимость указанных выше рядов будет доказана, если может быть установлена сходимость полученных таким путём числовых рядов. С формальной стороны это означает, что рассматриваемые ряды будут сходящимися, если они сходятся при $t = 0$.

В выражениях (11) – (13) члены, содержащие величину δ , имеют конечное значение. Поэтому решение вопроса сводится к рассмотрению рядов вида

$$\sum_1^{\infty} (j\Delta\omega)^n P^n; \quad \sum_1^{\infty} (j\Delta\omega)^n (PZ_{\alpha})^n. \quad (14)$$

Модуль n -го члена последних соответственно обозначается через $N_j^{(n)}$, $N_{\alpha_1}^{(n)}$. Ряды, составленные из этих величин, будут сходящимися.

Действительно, используя известное условие сходимости Даламбера, можно получить для первого ряда

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{N_j^{(n)}}{N_j^{(n-1)}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{j\Delta\omega(-n\beta + j)}{(-n\beta + j - \alpha_1)(-n\beta + j - \alpha_2)} \right| = 0,$$

для второго ряда

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{N_{\alpha}^{(n)}}{N_{\alpha}^{(n-1)}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{j\Delta\omega(-n\beta + j)z_{\alpha}^{(n)}}{(-n\beta + j - \alpha_1)(-n\beta + j - \alpha_2)z_{\alpha}^{(n-1)}} \right| = 0,$$

так как при значительном n имеет место

$$z_{\alpha}^{(n)} = -n\beta; \quad z_{\alpha}^{(n-1)} = -(n-1)\beta.$$

Это значит, что ряды (14) сходятся, и притом абсолютно.

Степень, т.е. быстрота, сходимости их существенным образом зависит от величин $\frac{\Delta\omega}{s_k}$, β и постоянных времени обмоток.

В крупных машинах нормальной конструкции величины ρ_2 и β соизмеримы. Поэтому даже в тех случаях, когда $\frac{\Delta\omega}{s_k} \geq 1$ (режим набора нагрузки при $s_0 \cong 0$), практически достаточно ограничиться учётом первых трёх или четырёх членов.

На рис. 1 представлены зависимости изменения амплитудных значений отдельных составляющих токов при $t = 0$, выраженных в долях J_m , от порядка решения. Эти кривые получены для машины со следующими параметрами: $P = 1000$ кВт; $U = 6000$ В; $I = 136$ А; $n_c = 250$ мин⁻¹; $s_n = 1,6$ %; $r_1 = r_2 = 0,0194$; $x_{1\sigma} = x_{2\sigma} = 0,114$; $x_{12} = 2,04$; $\sigma = 0,1$; gD^2 системы = 21,202 тм²; $s_0 = 0,01$; $s_k = 8$ %.

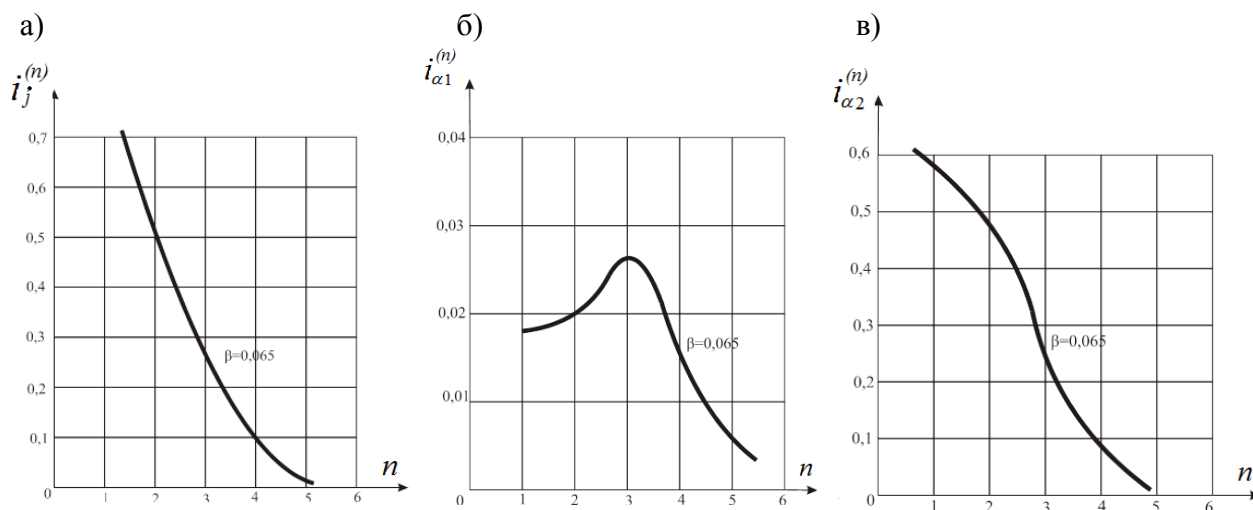


Рис. 1. Зависимости изменения амплитудных значений отдельных составляющих токов:
а – первая итерация, б – вторая итерация, в – третья итерация

Как видно из этих кривых, в данном случае четвертое приближение практически является окончательным.

Существуют другие возможные упрощения выражений (11) – (13). Из принятого выше условия ($\omega_k > \omega_m$), где ω_m – скорость опрокидывания по статической характеристике, следует, что величина δ относительно мала, так как разность корней характеристического уравнения, соответствующих начальной и конечной скорости, незначительна; также незначительны величины b и d , так как $\alpha_1 \ll \alpha_2$, следовательно, $c \approx 1$. Это позволяет в выражениях для z_{α} ограничиться первыми двумя членами, а в выражениях (12) и (13) пренебречь членами, содержащими величину δ .

Определение начальных значений отдельных составляющих токов может быть упрощено, если воспользоваться диаграммами токов основной частоты.

Выражение для величины $P^{(n)}$ в упрощённой форме может быть представлено следующим образом:

$$P^{(n)} = \prod_{j=1}^n \frac{1}{(-n\beta + j - \alpha_2)},$$

здесь Π – символ произведения.

При переменной n конец вектора величины

$$\frac{1}{(-n\beta + j - \alpha_2)} \quad (15)$$

описывает круг, проходящий через начало координат. Центр этого круга определяется радиус-вектором

$$r = -\frac{j}{2(1 - v_2)}.$$

Построенная таким образом круговая диаграмма позволяет определить величину отдельных векторов (15), следовательно, и величину $P^{(n)}$. Тогда токи основной частоты определяются путём умножения указанной величины на выражение $(j\Delta\omega)^n J_m$.

Составляющие токов с частотами v_1 и v_2 пропорциональны произведению $(Pz_\alpha)^n$. Геометрическим местом концов векторов $z_\alpha^{(n)}$ при указанных выше упрощениях является уравнение прямой

$$z_{\alpha_1}^{(n)} = (d - d^2)n\beta - d(j - \alpha_2) + d^2(j - \alpha_1),$$

где $d \cong \frac{\Delta\omega}{v_2 - v_1}$.

Таким образом, эти составляющие могут быть определены также, как и токи основной частоты.

Полученные выше выражения для переходных токов (11) – (13) позволяют получить и провести анализ уравнения вращающих моментов, для чего они представляются в виде

$$\begin{aligned} \bar{i}_1 = e^{jt} \sum_0^\infty I_j^{(n)} e^{-n\beta t + j\varphi_j^{(n)}} + e^{-(\rho_{v_1} - jv_1)t} \left[I_{\alpha_{10}} e^{j\varphi_{\alpha_{10}}} + \sum_0^1 I_{\alpha_1}^{(n)} e^{j\varphi_{\alpha_1}^{(n)}} \right] + \\ + e^{-(\rho_{v_2} - jv_2)t} \left[I_{\alpha_{20}} e^{j\varphi_{\alpha_{20}}} + \sum_0^1 I_{\alpha_2}^{(n)} e^{j\varphi_{\alpha_2}^{(n)}} \right], \\ \bar{i}_2 = e^{jt} \sum_0^\infty Y_j^{(n)} e^{-n\beta t + j\Psi_j^{(n)}} + e^{-(\rho_{v_1} - jv_1)t} \left[Y_{\alpha_{10}} e^{j\Psi_{\alpha_{10}}} + \sum_0^1 Y_{\alpha_1}^{(n)} e^{j\Psi_{\alpha_1}^{(n)}} \right] + \\ + e^{-(\rho_{v_2} - jv_2)t} \left[Y_{\alpha_{20}} e^{j\Psi_{\alpha_{20}}} + \sum_0^1 Y_{\alpha_2}^{(n)} e^{j\Psi_{\alpha_2}^{(n)}} \right], \end{aligned} \quad (16)$$

где I и Y означают амплитудные значения отдельных составляющих токов статора и ротора соответственно; φ и Ψ – их начальные фазы.

Указанные величины связаны между собой посредством следующих соотношений:

$$Y_k^{(0)} = \frac{x_2}{x_{12}} \sin \Psi_{2s} I_k^{(0)}, \quad \varphi_k^{(0)} = \Psi_k^{(0)} + \Psi_{2s} + \frac{\pi}{2} \dots (k = j, \alpha_1, \alpha_2);$$

$$Y_k^{(n)} = \frac{x_1}{x_{12}} I_k^{(n)}, \quad \varphi_k^{(n)} = \Psi_k^{(n)} - \pi \dots (\text{при } k = j, n = 1, 2 \dots;$$

при $k = \alpha_1, \alpha_2; n = 1)$.

$$\sin \Psi_{2s} = \frac{s_k}{\sqrt{(\rho_2 \sigma)^2 + s_k^2}}.$$

Вращающий момент, полученный при подстановке выражений (16) в уравнение момента в виде суммы трёх составляющих, то есть

$$M = M_{\text{ст.}} + M_{\text{ап.}} + M_{\text{п.}}$$

Первая составляющая представляет статический момент, развиваемый машиной при скольжении, соответствующем новой нагрузке.

Вторая составляющая представляет апериодические, затухающие со временем моменты. В образовании их принимают участие токи, имеющие одинаковые частоты, но различные начальные фазы.

Наконец, третья составляющая характеризует периодические, также затухающие во времени моменты. Физически эта составляющая вызывается за счёт взаимодействия токов, имеющих различные частоты.

Апериодические моменты при выражении отдельных составляющих токов в долях установившегося статорного тока, соответствующего новому значению нагрузки, могут быть представлены следующим образом:

$$M_{\text{ап.}} = \frac{M_{\text{ст.}}}{\sin \Psi_{2s}} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} I_j^{(n)} \cos(\Psi^{(0)} - \Psi^{(n)})_j e^{-n\beta t} + \sum_{n=1}^2 e^{-2\rho_n t} q_n [I_{\alpha_n}^{(1)} \cos(\Psi^{(0)} - \Psi^{(1)})_{\alpha_n} + \right. \\ \left. + q_n \sin \Psi_{2s} + I_{\alpha_{n0}} \left(\frac{\sin \Psi_{2s0}}{\sin \Psi_{2s}} + \frac{\cos \Psi_{2s0}}{\cos \Psi_{2s}} \right) \sin \Psi_{2s} \cos(\Psi^{(0)} - \Psi_0)_{\alpha_n} + \right. \\ \left. + \frac{1}{q_3} \frac{\cos \Psi_{2s0}}{\cos \Psi_{2s}} I \cos(\Psi^{(1)} - \Psi_0)_{\alpha_n} + \frac{q_n}{q_3 q_4} \frac{\cos \Psi_{2s0}}{\cos \Psi_{2s}} \sin \Psi_{2s} \right\},$$

где q_3 – отношение установившихся токов статора, соответствующих нагрузкам M_c и M_{c0} ; q_4 – то же для токов ротора;

$$q_1 = \left| \frac{\alpha_2 - j}{\alpha_1 - \alpha_2} \right|, \quad q_2 = \left| \frac{\alpha_1 - j}{\alpha_1 - \alpha_2} \right|.$$

Периодическая составляющая момента

$$M_{\text{п.}} = \frac{M_{\text{ст.}}}{\sin \Psi_{2s}} \{ e^{-\rho_1 t} [A' \cos(1 - \nu_1) t - A'' \sin(1 - \nu_1) t] +$$

$$+ e^{-\rho_2 t} [B' \cos(1 - \nu_2) t + B'' \sin(1 - \nu_2) t] e^{-(\rho_1 + \rho_3)t} [C' \cos(\nu_2 - \nu_1) t - C'' \sin(\nu_2 - \nu_1) t] \},$$

где A', B', C' означают вещественную, а A'', B'', C'' – мнимую часть следующих выражений соответственно:

$$A = q_1 \sum_1^{\infty} I_j^{(n)} e^{-n\beta t + j(\Psi_j^{(n)} - \Psi_{\alpha_1}^{(0)})} + \frac{q_1}{q_3} \sum_1^{\infty} I_j^{(n)} e^{-n\beta t + j(\Psi_j^{(n)} - \Psi_{\alpha_{10}}^{(0)})} \frac{\cos \Psi_{2s0}}{\cos \Psi_{2s}} + I_{\alpha_1}^{(1)} e^{j(\Psi_j^{(0)} - \Psi_{\alpha_1}^{(1)})} + \\ + 2q_1 \sin \Psi_{2s} e^{j(\Psi_j^{(0)} - \Psi_{\alpha_1}^{(0)})} + I_{\alpha_{10}} \left(\frac{\sin \Psi_{2s0}}{\sin \Psi_{2s}} + \frac{\cos \Psi_{2s0}}{\cos \Psi_{2s}} \right) e^{j(\Psi_j^{(0)} - \Psi_{\alpha_{10}})};$$

$$B = q_2 \sum_1^{\infty} I_j^{(n)} e^{-n\beta t + j(\Psi_j^{(n)} - \Psi_{\alpha_2}^{(0)})} + \frac{q_2}{q_3} \frac{\cos \Psi_{2s0}}{\cos \Psi_{2s}} \sum_1^{\infty} I_j^{(n)} e^{-n\beta t + j(\Psi_j^{(n)} - \Psi_{\alpha_{20}}^{(0)})} + I_{\alpha_2}^{(1)} e^{j(\Psi_j^{(0)} - \Psi_{\alpha_2}^{(1)})} + \\ + 2q_2 \sin \Psi_{2s} e^{j(\Psi_j^{(0)} - \Psi_{\alpha_2}^{(0)})} + I_{\alpha_{20}} \left(\frac{\sin \Psi_{2s0}}{\sin \Psi_{2s}} + \frac{\cos \Psi_{2s0}}{\cos \Psi_{2s}} \right) e^{j(\Psi_j^{(0)} - \Psi_{\alpha_{20}})};$$

$$C = \sum_0^1 q_{(2-n)} [I_{\alpha_{(1+n)}}^{(1)} e^{\pm j(\Psi_{\alpha_{(2-n)}}^{(0)} - \Psi_{\alpha_{(1+n)}}^{(1)})} + I_{\alpha_{(1+n)0}} \left(\frac{\sin \Psi_{2s0}}{\sin \Psi_{2s}} + \frac{\cos \Psi_{2s0}}{\cos \Psi_{2s}} \right) \times \\ \times \sin \Psi_{2s} e^{\pm j(\Psi_{\alpha_{(2-n)}}^{(0)} - \Psi_{\alpha_{(1+n)0}})} + \frac{1}{q_3} I_{\alpha_{(1+n)}}^{(1)} \frac{\cos \Psi_{2s0}}{\cos \Psi_{2s}} e^{\pm j(\Psi_{\alpha_{(2-n)0}} - \Psi_{\alpha_{(1+n)}}^{(1)})} + \\ + 2q_1 q_2 \sin \Psi_{2s} e^{j(\Psi_{\alpha_2}^{(0)} - \Psi_{\alpha_1}^{(0)})} + 2 \frac{q_1 q_2}{q_3 q_4} \frac{\cos \Psi_{2s0}}{\cos \Psi_{2s}} \sin \Psi_{2s} e^{j(\Psi_{20} - \Psi_{\alpha_{10}})}.$$

В соотношении для C верхний знак (группы \pm) соответствует $n = 0$, нижний – $n = 1$.

Полученные выражения для вращающих моментов отличаются значительной громоздкостью. Поэтому непосредственное применение их неудобно, хотя отдельные составляющие как апериодических, так и периодических моментов определяются весьма просто.

Пренебрегая малыми величинами, указанные выражения можем привести к весьма удобному для расчёта виду. Сделать это можно в предположении, что величина начальной нагрузки (M_{c0}) существенно меньше величины присоединенной нагрузки (M_c).

Тогда в выражениях для моментов возможно исключить все члены с коэффициентами $\frac{1}{q_3}$, $\frac{1}{q_4}$, $\frac{1}{q_3 q_4}$, ибо эти коэффициенты, в соответствии с изложенным выше, представляют отношение установившихся токов при M_{c0} и M_c .

Кроме того, допустимо независимое от принятого условия упрощение за счёт пренебрежения следующими составляющими:

- апериодическими, обусловленными взаимодействием токов и потокосцеплений с частотой ν_1 . Величина отдельных составляющих этих моментов в начальный момент времени меньше статического момента в отношении

$$M_{\text{ап.}} < \rho_2 q_1 s_k^{(n-1)} (n\beta - \rho_2) \frac{1}{\prod_1^n \sqrt{(n\beta - \rho_2)^2 + s_k^2}};$$

- периодическими с частотами $(1 - \nu_1)$ и $(\nu_2 - \nu_1)$. Максимальное значение отдельных составляющих с частотой $(1 - \nu_1)$ соответственно меньше статического момента в отношении

$$M_{\text{п.}} < \frac{q_1 \rho_2 s_k^{(n-1)}}{\prod_1^n \sqrt{(n\beta - \rho_2)^2 + s_k^2}}; M_{\text{п.}} < \frac{\rho_2 s_k^{(n-1)} (n\beta - \rho_2)}{\prod_1^n \sqrt{(n\beta - \rho_2)^2 + s_k^2}}$$

Для моментов с частотой $(\nu_2 - \nu_1)$ эти отношения соответственно меньше следующих величин:

$$M_{\text{п.}} < \frac{q_2 \rho_2 s_k^{(n-1)} (n\beta - \rho_2)}{\prod_1^n \sqrt{(n\beta - \rho_2)^2 + s_k^2}}; M_{\text{п.}} < \frac{q_1 \rho_2 s_k^{(n-1)}}{\prod_1^n \sqrt{(n\beta - \rho_2)^2 + s_k^2}}.$$

Таким образом, основными компонентами вращающих моментов являются апериодические составляющие, соответственно образованные токами и потокосцеплениями с частотами ν_1 , ν_2 , и медленно пульсирующие составляющие. Следовательно, выражения для отдельных составляющих моментов могут быть представлены следующим образом:

$$M_{\text{ап.}} = \frac{M_{\text{ст.}}}{\sin \Psi_{2S}} \left\{ \sum_1^\infty I_j^{(n)} e^{-n\beta t} \cos(\Psi^{(0)} - \Psi^{(n)})_j + e^{-2\rho_2 t} q_2 \left[I_{\alpha_2}^{(1)} \cos(\Psi^{(0)} - \Psi^{(1)})_{\alpha_2} + q_2 \sin \Psi_{2S} \right] \right\},$$

$$M_{\text{п.}} = \frac{M_{\text{ст.}}}{\sin \Psi_{2S}} e^{-2\rho_2 t} \{ B' \cos(1 - \nu_2) t + B'' \sin(1 - \nu_2) t \},$$

где

$$B = q_2 \sum_1^\infty I_j^{(n)} e^{-n\beta t + j(\Psi_j^{(n)} - \Psi_{\alpha_2}^{(0)})} + I_{\alpha_2}^{(1)} \cos \Psi_{2S} e^{j(\Psi_j^{(0)} - \Psi_{\alpha_2}^{(1)})} + 2q_2 \sin \Psi_{2S} e^{j(\Psi_j^{(0)} - \Psi_{\alpha_2}^{(0)})}.$$

На основании последних нетрудно перейти к окончательным выражениям для апериодических и периодических моментов:

$$M_{\text{ап.}} = M_{\text{ст.}} \left\{ \sum_1^\infty \lambda_\alpha^{(n)} e^{-n\rho t} - q_2 \sum_1^\infty \lambda_\rho^{(n)} e^{-2\rho_2 t} + q_2^2 e^{-2\rho_2 t} \right\}, \quad (17)$$

$$M_{п.} = M_{ст.} e^{-\rho_2 t} \left\{ \cos(1 - \nu_2) t \left[-q_2 \sum_1^{\infty} \lambda_{\alpha}^{(n)} e^{-n\beta t} + \sum_1^{\infty} \lambda_{\rho}^{(n)} - 2q_2 \right] - \right. \\ \left. - \sin(1 - \nu_2) t [q_2 \sum_1^{\infty} \lambda_{aj}^{(n)} e^{-n\beta t} + \sum_1^{\infty} \lambda_{\rho j}^{(n)}] \right\}. \quad (18)$$

Коэффициенты λ в формулах (24) – (25) определяются по выражениям

$$\lambda_{\alpha}^{(n)} = \frac{\Delta \omega^n \rho_2 S_K^{(n-2)} \sum_1^n (n\beta - \rho_2)}{\prod_1^n [(n\beta - \rho_2)^2 + S_K^2]}, \quad \lambda_{\rho}^{(n)} = \omega_K \lambda_{\alpha}^{(n)}, \quad (19)$$

$$\lambda_{aj}^{(n)} = \frac{\Delta \omega^n \rho_2 S_K^{(n-1)}}{\prod_1^n [(n\beta - \rho_2)^2 + S_K^2]}, \quad \lambda_{\rho j} = \omega_K \lambda_{aj}.$$

Выражения (17) – (18) отличаются значительной простотой. Расчёт вращающих моментов с помощью этих выражений не представляет особых затруднений. Так, для рассматриваемого ниже случая уже при $n = 4$ коэффициенты λ практически приближаются к нулю.

Для выяснения точности полученных соотношений применительно к машине, параметры и данные режима которой приведены выше, в первом приближении произведён численный расчёт вращающих моментов ($\beta = \frac{U_{m1}^2}{r_2 H}$).

На рис. 2 приведена механическая характеристика исследуемой машины. Сплошная кривая представляет момент, полученный в [4], значком (x) обозначены результаты расчёта по выражениям (17) – (19). Как видно, последние выражения дают достаточные для практики результаты.

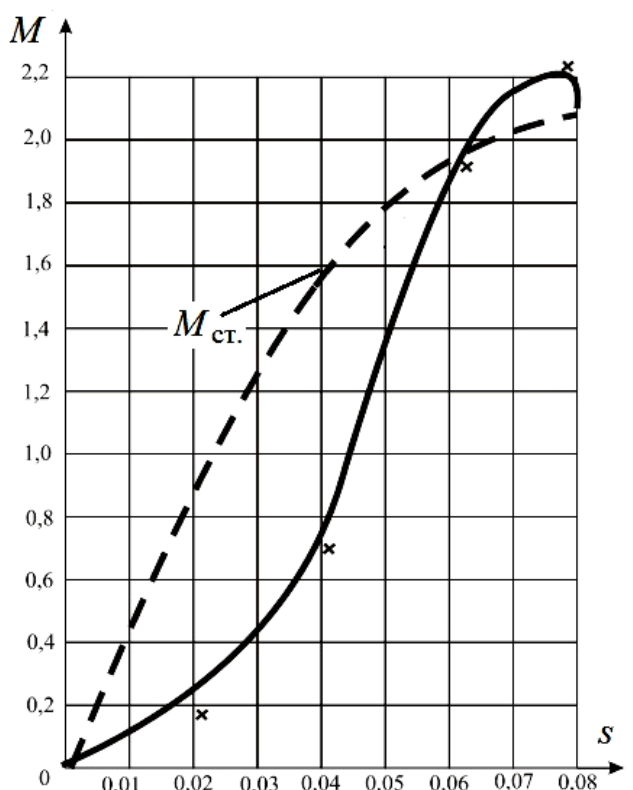


Рис. 2. Сравнение расчётных
и экспериментальных результатов

Выводы и заключение

При рассмотрении режимов работы привода в случае наброса постоянной механической нагрузки решение получается в форме, напоминающей по своему строению классическое решение для случаев включения при постоянстве скорости.

Вращающий момент, развиваемый машиной в указанном режиме, может быть представлен в виде суммы статической, апериодических и периодических составляющих.

В общем случае апериодический момент содержит ряд затухающих составляющих. Коэффициент затухания для одних определяется удвоенным значением электромагнитных постоянных обмоток, для других – величиной β , зависящей как от электромагнитных постоянных обмоток, так и от электромеханической постоянной системы.

Периодический момент включает составляющие трёх типов. Первые два из указанных изменяются с частотой, близкой по своему значению к частоте приложенного напряжения, последний представляет собой медленно пульсирующий момент.

Анализ общего выражения моментов показывает, что апериодические составляющие моментов, образованные токами малой частоты (ν_1), незначительны; составляющие, пульсирующие во времени с большой частотой, относительно невелики; основными составляющими вращающих моментов являются медленно пульсирующие и апериодические составляющие, образованные за счёт токов и потокоцеплений с частотой ν_1 и ν_2 соответственно.

Переход вращающих моментов от одного установившегося значения к другому происходит по закону, определяемому суммой экспоненциальных и синусоидальной функций, на которые накладываются незначительные по амплитуде колебания больших частот.

Рассмотренный метод расчёта переходных процессов учитывает электромагнитные и механические процессы в их взаимной связи и даёт удовлетворительные для практических целей результаты. Он позволяет одновременно получить как вращающий момент, так и скорость ротора, а его использование совместно с выражением для граничных ускорений позволяет в каждом конкретном случае решить вопрос о целесообразности учёта ускорения без подробного расчёта характеристик.

Метод может быть применён при синтезе систем управления с учётом переходных процессов как в машинах нормальной конструкции, так и в некоторых типах машин, например, в двигателях с глубоким пазом [5] или специальных электромеханических преобразователях [6-10]. В области, где необходимо учитывать изменение скорости, апериодическая составляющая статорного тока незначительна, благодаря чему эффект вытеснения тока в указанной области практически не играет роли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Влияние скорости ротора асинхронной машины на характер протекания переходных электромагнитных процессов / К. К. Ким, К. И. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № IV-1 (40). – С. 28-36.
2. Ким, К. К. Характеристики асинхронной машины в режимах регулирования скорости / К. К. Ким, К. И. Ким, В. В. Вешкин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 25-36.
3. Ким, К. К. Метод расчёта переходных процессов при управлении асинхронной машиной / К. К. Ким, К. И. Ким, В. В. Вешкин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 52-59.
4. Ким, К. К. Динамическая устойчивость асинхронной машины в режиме наброса нагрузки / К. К. Ким, К. И. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 40-52.
5. Ivanov, S. Synthesis Of The Control Device Of The Electromechanical Drive Of The Main Valve / S. N. Ivanov, K. K. Kim, A. V. Gorbunov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 18-22 May. 2020.
6. Synthesis of a fuzzy control system of drive of integrated security system / K. K. Kim, O. S. Amosov, S. G. Baena, S. N. Ivanov // Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017 6 July 2017. – P. 345-347.



7. Ivanov, S. N. Raising of reliability of heat-generating electromechanical devices / S. N. Ivanov, K. K. Kim // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon. 2019 1-4 Oct. 2019, Article number 8602670 10.1109/FarEastCon. 2019.
8. Ivanov, S. Formation and study of coatings from composite material for special electrical devices / S. Ivanov, K. Kim // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 14th International Conference on Films and Coatings – 2019. doi:10.1088/1742-6596/1281/1/012034. P.1-4.
9. Ким, К. К. Моделирование комбинированного электропривода / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Том 62. – № 3 (197). – С. 44-51.
10. Ким, К. К. Электромеханические генераторы тепловой энергии: моногр. [Электронный ресурс] / К. К. Ким, С. Н. Иванов. – Электрон. текстовые данные. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 289 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/85859.html> (дата обращения: 21.09.2020).
11. Kim, K. K. Dependence of the reactivity compensation degree of a synchronous compensator on its parameters / K. K. Kim, A. Yu. Panychev, L. S. Blazhko // Russian Electrical Engineering. – November 2017. – Volume 88. – Issue 10. – P. 623-628.
12. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2000. – 607 с.
13. Проектирование электрических машин / под ред. И. П. Копылова. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 767 с.
14. Беспалов, В. Я. Электрические машины / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – М.: Академия, 2010. – 314 с.
15. Иванов, С. Н. Влияние ограничивающих факторов на электромагнитную мощность электрических машин / С. Н. Иванов, К. К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № II-1(26). – С. 4-8.
16. Kim, K. K. On the problem of determining speed-torque characteristics of thermal electromechanical converters / K. K. Kim // Russian Electrical Engineering. – August 2009. – Volume 80. – Issue 8. – P. 459-465.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

Иванов С. Н., Колесник М. Б., Макаренко В. А., Фискова Т. К.
S. N. Ivanov, M. B. Kolesnik, V. A. Makarenko, T. K. Fiskova

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В ПЕРЕДАТОЧНЫХ МЕХАНИЗМАХ СПЕЦИАЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ**

**DETERMINATION OF LOSSES IN TRANSMISSION MECHANISMS OF SPECIAL
ELECTROMECHANICAL DRIVES**

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)185-91-20. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, Professor, Department of Electromechanics, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)185-91-20. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Колесник Максим Борисович – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27; тел. 8(4217)241-175. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Maksim B. Kolesnik – Student of Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin av., 27; tel. 8(4217)241-175. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Макаренко Виктор Антонович – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27; тел. 8(4217)241-175. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Viktor A. Makarenko – Student of Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin av., 27; tel. 8(4217)241-175. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Фискова Таисия Константиновна – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(4217)241-175. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mrs. Taisya K. Fiskova – Student of Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin av., 27; tel. 8(4217)241-175. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Аннотация. Разработка специальных электромеханических приводов связана с исследованием вопросов определения добавочных потерь, зависящих от конструкции используемого механизма. В статье рассмотрены два типа специальных устройств: с линейным перемещением исполнительного элемента и перекачивающего электромеханического привода. Задача обеспечения эффективности решается на основе нахождения добавочных потерь и их вклада в коэффициент полезного действия (КПД) устройства. В данной статье приведён проектный подход, обеспечивающий реализацию совмещённых электромеханических приводов, предназначенных для обеспечения возвратно-поступательного перемещения в различных типах металло-режущих станков, а также перекачивающих элементов на основе теплогенерирующих электромеханических преобразователей.

Summary. The development of special electromechanical drives is related to the study of determining additional losses that depend on the design of the mechanism used. The article considers 2 types of special devices: with linear movement of the Executive element and the pumping electromechanical drive. The problem of ensuring efficiency is solved by finding additional losses and their contribution to the efficiency of the device. This article presents a design approach that provides the implementation of combined electromechanical drives designed to provide reciprocating movement of various types of metal-cutting machines, as well as pumping elements based on heat-generating electromechanical converters.

Ключевые слова: совмещённый электропривод, механизм подачи, потери.

Key words: combined electric drive, feed mechanism, losses.

УДК 621.3.019

Введение.

Применение специальных видов оборудования в отдельных отраслях промышленности позволяет не только снизить себестоимость конечной продукции, но и повысить эффективность технических систем за счёт уменьшения количества их элементов при сохранении функциональных характеристик, улучшения динамики и снижения весогабаритных показателей. Примерами такого оборудования являются электромеханические приводы на базе машиностроительной концепции «винт-гайка», обеспечивающей линейные перемещения исполнительного элемента [1-4] и совмещённые перекачивающие электромеханические устройства [5-7].

Для оценки целесообразности и эффективности их внедрения необходимо при проектировании иметь информацию о величине добавочных потерь, обусловленных особенностями конструкции. Очевидно, что комплексное исследование таких устройств требует использования современных САПР (CAD/CAE-систем), находящих применение при решении задач оптимизационного проектирования и моделирования сложных систем [8].

Теоретические основы определения потерь в электромеханических приводах с линейным перемещением.

Простота преобразования вращательного движения в линейное поступательное на основе пары «винт/гайка» является одной из причин длительного применения таких механизмов. Например, известно решение компании The Cleveland Machine Screw Co., относящееся к 1898 году [9]. В автомобилях Ford Fairlane, Chevrolet вращение рулевого колеса в линейное движение рейки с зубчатыми элементами реализовано в конструкции редуктора Saginaw. В современных установках примеры использования электромеханических ходовых винтов можно найти в виде элементов оборудования для нефтяной и химической промышленности, выпускаемого такими компаниями, как «Всероссийский научно-исследовательский институт по переработке нефти», «Пластполимер» и другими [10].

Повышение эффективности передаточного механизма связано с разработкой и применением твёрдосмазочных покрытий, а также устранением наиболее существенных недостатков винтового сопряжения: высокого износа при трогании и соответствующего снижения несущей способности. Последнее обусловлено сжимающей нагрузкой в месте фактического контактирования с образованием упрочняющих соединений. Одновременно требует решения нелинейная задача нахождения добавочных потерь, зависящих от площади фактического соприкосновения рабочей поверхности, физико-химических свойств покрытия и величины осевой нагрузки. Следует отметить, что основное аналитическое выражение для оценки напряжённо-деформированного состояния, приведённое в [11], носит приближённый характер. Учёт микронеровностей и толщины полимерного покрытия предложен в работах Н. М. Алексеева.

Силы трения в передаточных механизмах специальных электромеханических приводов могут достигать больших значений и являются основой для выбора мощности. Точное нахождение сил трения необходимо для настройки автоматических систем детерминированных технологических процессов.

Непосредственный расчёт сил трения, действующих в передаточном механизме, представляет сложную научную задачу, которая не имеет однозначного решения.

В основу молекулярно-механической теории взаимодействия твёрдотельных элементов скольжения, существенно развитой И. В. Крагельским, заложены два базовых процесса: механическая деформация поверхностного слоя материала и потеря устойчивости за счёт разрывов адгезионных связей на уровне отдельных молекул [12].

На этапе проектирования коэффициент трения может быть найден в виде суммы [12]:

$$f = f_{\text{мех}} + f_{\text{мол}},$$

где $f_{\text{мех}}$ – механическая составляющая коэффициента трения; $f_{\text{мол}}$ – молекулярная составляющая коэффициента трения.

Учёт отдельных факторов позволяет найти коэффициент трения для точечного контакта с деформируемой поверхностью в виде [19]

$$f = \frac{f_{\text{мех}} + f_{\text{мол}}}{1 - f_{\text{мех}} \cdot f_{\text{мол}}}.$$

В случае линейного скольжения применимо выражение

$$f = f_{\text{мех}} + f_{\text{мол}}(f_{\text{мех}} \cdot f_{\text{мол}} + 1).$$

Очевидно, что во всех случаях необходим отдельный расчёт деформационной (механической) и молекулярной составляющих.

Механическая составляющая коэффициента трения является функцией относительного внедрения [12]:

$$f_{\text{мех}} = k \sqrt{\frac{h}{r}},$$

где k – коэффициент, принимающий значения 0,5...0,7 в зависимости от формы поверхности; h – величина внедрения при скольжении индентора радиусом r .

Существенная погрешность при нахождении механической составляющей связана с нелинейной зависимостью величины от коэффициента трения f .

Молекулярная составляющая определяется выражением, учитывающим процессы возникновения и исчезновения молекулярных связей в точках трения, имеющего пьезокоэффициент β [13]:

$$f_{\text{мол}} = \frac{\tau_0}{p} + \beta.$$

Энергетический метод нахождения потерь трения использует КПД в виде отношения полученной и затраченной работ с учётом направления движения передачи.

Существующие методики позволяют учесть направление перемещения, что актуально для приводов запорной арматуры [1]. При этом различают движение исполнительного элемента в направлении, противоположном действию сил сопротивления (перекрытие задвижки), и перемещение в направлении, согласном с действием этих сил (открытие вентиля).

В первом случае КПД

$$\eta = \frac{\text{tg}\alpha}{\text{tg}(\alpha + \rho)};$$

во втором:

$$\eta = \frac{\text{tg}(\alpha - \rho)}{\text{tg}\alpha},$$

где α – угол подъёма, образованный развёрнутой винтовой линией резьбы; ρ – угол трения, тангенс которого равен коэффициенту трения f .

Соответственно, при закрывании внешний момент уравнивается осевым и окружным усилиями, а также реакцией с учётом действующей силы трения. При противоположном вращении изменяется направление действия силы трения.

Предварительно величины коэффициентов трения в электромеханических приводах с линейным перемещением могут быть выбраны из диапазона 0,20...0,35, для режима пуска эти значения необходимо увеличить на 0,1. Кроме этого, при высоких температурах и давлении коэффициент трения увеличивается и может достигать значений 0,25...0,37 при сухом трении, имеющем место в пусковых режимах, последние значения необходимо умножить приблизительно на 1,3.

В рассматриваемом виде передаточного механизма потери возникают в сопряжении (резьбе) и в торцах (опорах). Потери в сопряжении зависят от профиля и шероховатости поверхностей,

материала, числа заходов, точности изготовления, а в современных силовых механизмах также от вида используемого смазочного материала.

В качестве примера можно рассчитать КПД сопряжения магистральной задвижки. Необходимое условие – самоторможение (упорная резьба). Осевое усилие $F_z = 150$ кН, длина тяги $l = 1,0$ м, материал тяги – сталь 35 ГОСТ 1050-2013, резьбовая втулка – бронза БрОФ2-0,25 ГОСТ 5017-2006, опорный подпятник – фторопласт 4Д ГОСТ 14906-77.

Согласно принятой в машиностроении проектной методики, расчёт начинается с определения диаметра тяги из условия допустимой скорости износа сопряжения, которое принимается критерием износостойкости.

Поскольку на величину износа основное влияние оказывает давление q , его предварительное расчётное значение не должно превышать

$$q = \frac{F_n}{A_n} \leq [q],$$

где F_n – изгибное (нормальное) усилие в сопряжении; A_n – расчётная площадь сопряжения.

Для равномерно распределённой по элементам сопряжения нагрузки и без учёта угла подъёма величина давления определяется выражением

$$\frac{F_z}{A_n} = \frac{F}{z \cdot A},$$

где F_z – сила (осевая) тяги, Н; A – площадь, определяемая проекцией на перпендикулярную оси тяги плоскость рабочей поверхности одного витка; z – число сопряжённых витков.

Соответственно, условие износостойкости примет вид

$$q = \frac{F}{z \cdot \pi \cdot d_T \cdot H_1} \leq [q],$$

где d_T – усреднённый диаметр; H_1 – рабочая высота резьбового профиля; $[q]$ – допустимое напряжение, МПа.

При инженерных расчётах априорно задаются два дополнительных соотношения, поскольку последняя формула с тремя недетерминированными параметрами не имеет однозначного решения.

Определяются относительная глубина $\psi_h = H_1/p$, зависящая от профиля резьбы (для трапецеидальных резьб $\psi_h = 0,5$, упорных – $\psi_h = 0,75$), и относительная высота втулки ротора электромеханического преобразователя $\psi_h = H_p/d_2$, где H_p – высота резьбовой части с шагом P втулки ротора ($H_p = z \cdot P$).

Величина ψ_H на первом этапе выбирается из ряда 1,2; 1,6; 2,0; 2,5, причём большие значения принимаются для мощных приводов, точное значение находится итерационным расчётом.

Соответственно, диаметр тяги

$$d_T \geq \sqrt{\frac{F_z}{\pi \cdot \psi_H \cdot \psi_h \cdot [q]}},$$

что для предварительных значений $[q] = 6$ МПа и коэффициентов высоты втулки и резьбы $\psi_H = 1,8$ и $\psi_h = 0,75$ даёт величину

$$d_T \geq \sqrt{\frac{150 \cdot 10^3}{\pi \cdot 1,8 \cdot 0,75 \cdot 6}} = 70.$$

Нормируется полученное значение: $d_T = 85$ мм и принимаются величины $P = 12$ мм, $h = 9$ мм, $d_1 = 64,2$ мм, $d_2 = 76$ мм, $f = 0,1$.

Угол подъёма резьбы

$$\alpha = \arctg \alpha = 5^{\circ}50'.$$

Обеспечение самоторможения

$$\Psi = \arctg \left[\frac{P}{\pi \cdot d_2} \right]; \quad \Psi = \arctg \left[\frac{12}{\pi \cdot 76} \right] = 2^{\circ}50'.$$

Находится число витков:

$$z = \frac{F_z}{\pi \cdot d_2 \cdot h \cdot [q]},$$

$$z = \frac{150 \cdot 10^3}{\pi \cdot 76 \cdot 9 \cdot 6} \approx 12.$$

Предварительно КПД передаточного механизма преобразователя

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} 2^{\circ}50'}{\operatorname{tg}(2^{\circ}50' + 5^{\circ}50')} \approx 0,3.$$

Потери мощности в подпятнике на этом этапе зависят от конструкции и принимаются 0,90. Следует отметить, что КПД в целом существенно зависит от величины предварительного натяга.

Результирующее значение

$$\eta_{\Sigma} = 0,3 \cdot 0,9 = 0,27.$$

Уточняется требуемый момент:

$$M_{\text{вр}} \approx \frac{F_z \cdot z \cdot P}{2\pi \cdot 10^2 \cdot \eta_{\Sigma}};$$

$$M_{\text{вр}} \approx \frac{150 \cdot 10^3 \cdot 12 \cdot 12}{2\pi \cdot 10^2 \cdot 0,27} = 135 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Соответственно, скорость перемещения тяги

$$v_{\text{тяг}} = \frac{z \cdot P \cdot n}{60 \, 000};$$

$$v_{\text{тяг}} = \frac{12 \cdot 12 \cdot 50}{60 \, 000} = 0,12 \text{ м/с}.$$

Теоретические основы определения потерь в перекачивающих электромеханических приводах. Перекачивающие электромеханические привода являются одним из перспективных видов элементов, повышающих эффективность технических систем для транспортирования и подогрева рабочих жидкостей. Оставаясь, по существу, асинхронным двигателем вследствие общности физических процессов, они стоят в одном ряду с насосными, вентиляторными и компрессорными установками, что позволяет использовать методики проектирования последних для определения составляющих потерь при нахождении КПД привода.

Потери в выходной части привода включают гидравлические $\Delta P_{\text{гидр}}$ и механические $\Delta P_{\text{мех}}$ составляющие. Первые подразделяются на геометрические $\Delta P_{\text{геом}}$, ударные $\Delta P_{\text{удар}}$ и дифференциальные $\Delta P_{\text{дифф}}$. Вторые состоят из потерь, обусловленных гидравлическим торможением $\Delta P_{\text{гидр.торм}}$, а также дисковых потерь $\Delta P_{\text{диск}}$. Точное определение этих величин аналитическими методами невозможно, поэтому целесообразно обратиться к эмпирическим выражениям, используемым в настоящее время в виде специальных коэффициентов, учитывающих определяющие конструкционные, размерные и эксплуатационные факторы.

При инженерном подходе устройство представляется совокупностью лопастей упрощённого напорного элемента с количеством ступеней и потоков, равным единице.

Рабочая среда перемещается недетерминированным числом тонких лопастей прямоугольной формы. При такой постановке гидравлические, объёмные и механические потери не учитываются. Это позволяет для нахождения напора H применить уравнение Эйлера, записанное в виде разницы скалярных произведений тангенциальной u и абсолютной v скоростей:

$$gH = (u_2, v_2) - (u_1, v_1),$$

где u_1, v_1 – соответственно тангенциальная и абсолютная скорости перемещаемой среды на входе; u_2, v_2 – соответственно тангенциальная и абсолютная скорости перемещаемой среды на выходе.

Определяемая часть этого уравнения представляет удельную энергию (без учёта нагрева), передаваемую с недетерминированным числом элементов (лопастей) идеальной жидкости.

Раскрытое и записанное относительно профилей напорных элементов скалярное произведение принимает вид

$$gH = (u_2 \sin \gamma_2 - u_1 \sin \gamma_1)(u_2 \sin \gamma_2 + u_1 \sin \gamma_1) - (u_2 v_{2R} \sin^2 \gamma_2 \operatorname{ctg}(\pi - \beta_2) - u_1 v_{1R} \sin^2 \gamma_1 \operatorname{ctg} \beta_1),$$

где γ_1, γ_2 – углы скоса напорной лопасти на внутреннем и внешнем диаметрах соответственно; v_{1R}, v_{2R} – радиальные составляющие скорости v на входе и выходе соответственно; β_1, β_2 – углы установки лопасти на входе и выходе соответственно.

Подстановка в последнее уравнение выходных и входных тангенциальных и радиальных составляющих абсолютной скорости приводит к уравнению связи напора (давления), расхода (производительности) с учётом геометрических размеров и частоты вращения ротора $n_{\text{рот}}$:

$$H = (\pi D_2 n_{\text{рот}} g^{-0.5} \sin \gamma_2)^2 - (\pi D_1 n_{\text{рот}} g^{-0.5} \sin \gamma_1)^2 + Q n_{\text{рот}} g b_2^{-1} \sin^2 \gamma_2 \cdot \operatorname{ctg} \beta_2 - Q n_{\text{рот}} g b_1^{-1} \sin^2 \gamma_1 \cdot \operatorname{ctg} \beta_1.$$

Для нахождения добавочных потерь применительно к реальной конструкции требуется учёт ограниченного количества лопастей и их размеров, числа ступеней, гидравлических, объёмных и механических потерь [14].

Конечное число напорных лопастей учитывается безразмерным коэффициентом снижения давления k_H :

$$k_H = 1 - \frac{\Delta H}{H}; \quad \Delta H = u_2^2 \frac{\pi}{z_{\text{рот}}} \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right) \sin \beta_2,$$

где $z_{\text{рот}}$ – количество напорных лопастей.

Величина k_H находится в диапазоне 0,7...0,9.

Число ступеней N вводится в коэффициент быстроходности n_s :

$$n_s = 3,65 n_{\text{рот}} \sqrt[4]{\frac{Q^2 N^3}{H^3}}.$$

Объёмный КПД $\eta_{\text{об}}$ определяет, соответственно, объёмные потери:

$$\eta_{\text{об}} = \frac{1}{1 + 0,68 n_s^{-0.66}}.$$

Объёмный КПД имеет значения 0,88...0,91.

Аналогично гидравлический КПД $\eta_{\text{гидр}}$ учитывает гидравлические потери:

$$\eta_{\text{гидр}} \approx 1 - \frac{0,42}{(\lg(4500 \sqrt[3]{\frac{Q}{n_{\text{рот}} \eta_{\text{об}}}}) - 0,172)^2}.$$

Приближённо величина $\eta_{\text{гидр}}$ составляет 0,85...0,96.

Коэффициент $\eta_{\text{мех}}$, связанный с механическими потерями в приводе и имеющий значения 0,92...0,96, рассчитывается по формуле

$$\eta_{\text{мех}} = \frac{1}{1 + 820 n_s^{-2}}.$$

Для уточнённых расчётов для сжимаемой рабочей среды может потребоваться коэффициент объёмного сжатия k_Q :

$$k_Q = 1 - \frac{0,73 z_{\text{рот}} \Delta_{\text{рот}}}{D_2 - D_1}.$$

Диапазон значений, в котором находится коэффициент объёмного сжатия, 0,85...0,95.

Заключение.

В статье рассмотрена методика определения добавочных потерь в передаточных механизмах специальных электромеханических приводов, обеспечивающая обоснованный выбор технических характеристик базового преобразователя и силовых элементов.

Использование расчётных выражений не исключает необходимости дальнейшего исследования напряжённо-деформированного состояния передачи в CAD/CAE-пакетах [15-17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Повышение эффективности электропривода магистральных задвижек / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2020. – № 3. – С. 71-77.
2. Ivanov, S. Synthesis Of The Control Device Of The Electromechanical Drive Of The Main Valve / S. N. Ivanov, K. K. Kim, A. V. Gorbunov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 18-22 May. 2020.
3. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким и [др.] // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.
4. Ким, К. К. Моделирование комбинированного электропривода / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 3 (197). – С. 44-51.
5. Иванов, С. Н. Электромеханические генераторы тепловой энергии [Электронный ресурс]: моногр. / К. К. Ким, С. Н. Иванов. – Электрон. текстовые данные. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 289 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/85859.html>.
6. Ivanov, S. Raising of reliability of heat-generating electromechanical devices / S. N. Ivanov, K. K. Kim // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019 1-4 Oct. 2019, Article number 8602670. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8934080>.
7. Ким, К. К. Преимущества применения устройств транспортирования и нагрева жидких рабочих сред в различных отраслях промышленности / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 573-583.
8. Kim, K. Analysis of the influence of design factors on the winding reliability of heating electromechanical transducers / K. K. Kim, N. S. Karpova, O. V. Prichodchenko // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – Вып. 2(35). – С. 26-31.
9. Боуден, Ф. П. Трение и смазка твёрдых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. – М.: Машиностроение, 1968. – 540 с.
10. ОАО «Пластполимер» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.plastpolymer.com>, свободный (дата обращения: 12.08.2020).
11. Трение и износ в вакууме / И. В. Крагельский и [др.]. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
12. Крагельский, И. В. Основы расчётов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.



13. Справочник технолога-машиностроителя / А. Г. Косилова и [др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 656 с.
14. Костышин, В. С. Моделирование режимов центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии / В. С. Костышин. – Иваново-Франковск: ИФГТУНГ, 2000. – 163 с.
15. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.
16. Алгоритм CFD-моделирования процесса тепломассопереноса в совмещённом электротехническом устройстве / С. Н. Иванов, К. К. Ким, О. В. Приходченко, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № II-1 (42). – С. 65-72.
17. Дмитриева, Т. Л. Разработка и тестирование численных алгоритмов решения условно экстремальных задач / Т. Л. Дмитриева, Х. Уламбаяр // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 59-72.
18. Патент № 107744 U1 Российская Федерация, МПК В61С 15/00. Устройство для увеличения сцепления колесной пары электровоза с рельсами: № 2011115167/11: заявлено 18.04.2011: опубликовано 27.08.2011 / Ким К. К.; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – 11 с. – Текст: непосредственный.
19. Ким, К. К. Анализ пространственно-временной структуры напряжённого состояния смёрзшегося угля при воздействии квазиточечных импульсных источников нагружения / К. К. Ким, М. А. Шпилев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 4. – С. 12-17.

Космынин А. В., Щетинин В. С., Саблин П. А.
A. V. Kosmynin, V. S. Shchetinin, P. A. Sablin

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ ПОСРЕДСТВОМ
ВНЕДРЕНИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ЗВЕНЬЕВ В СИСТЕМУ
СТАНОЧНЫХ СИСТЕМ**

**ENSURING THE QUALITY OF MATERIAL PROCESSING BY CUTTING THROUGH
THE INTRODUCTION OF TRANSFORMABLE CONTROLLED LINKS IN THE SYSTEM
OF MACHINE TOOLS**

Космынин Александр Витальевич – доктор технических наук, профессор, проректор по науке и инновационной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: avkosm@knastu.ru.

Mr. Alexander V. Kosmynin – Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for Science and Innovation, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: avkosm@knastu.ru.

Щетинин Владимир Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: schetynin@mail.ru.

Mr. Vladimir S. Shchetinin – Doctor of Engineering, Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: schetynin@mail.ru.

Саблин Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

Mr. Pavel A. Sablin – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы управления динамической устойчивостью технологических систем при механической обработке посредством бесконтактных управляемых газомангнитных опор шпиндельных узлов с целью обеспечения качества обработанной поверхности.

Summary. The paper considers issues of controlling the dynamic stability of technological systems during mechanical processing by means of non-contact gas-magnetic supports of spin units in order to ensure the quality of the treated surface.

Ключевые слова: шпиндельный узел, точность, качество механической обработки.

Key words: spindle assembly, precision, quality of machining.

УДК 621.9

Развитие современной машиностроительной отрасли предъявляет повышенные требования к точности и качеству обработки деталей, а также к производительности, надёжности металлообрабатывающего оборудования и уровню его автоматизации [1].

Если решение задач производительности и надёжности в большей степени можно отнести к ряду инженерных задач, то обеспечение точности и качества обработки во многом зависит от точности станка, приспособлений, инструмента, условий эксплуатации и технологии обработки.

Требования, предъявляемые к современным высокоточным станкам, например расточной и шлифовальной групп, по точности формы рабочих поверхностей до 0,2...0,4 мкм и чистоте по-

верхности по параметру $Ra \leq 0,08$ мкм. Кроме параметра обработанной поверхности Ra в последнее время необходимо обеспечить и другие параметры шероховатости ($Rq, Rp, Rc, Rt, Rv, Rsm, Rku, Rsk$). При таких требованиях к качеству и точности обработки возникает ряд проблем, связанных с условиями внешних воздействий на систему СПИЗ (станок-приспособление-инструмент-заготовка). К таким воздействиям относятся: тепловые деформации, возникающие из-за изменения температур узлов СПИЗ; внешние механические воздействия, передающиеся от вибраций фундамента через опоры станка; изменения сил в процессе резания по причине неоднородности материала и износа инструмента. Это обуславливает создание систем контроля позиционирования, стабилизации температурных деформаций, изолирования внешних механических воздействий. Усложнение станочных систем приводит к существенному удорожанию конечной продукции и, следовательно, к снижению её конкурентоспособности [2].

Для уменьшения влияния внешних механических воздействий в виде колебаний на станок и, как следствие, зону резания применяются различные виброопоры, а детали изготавливают из материалов, имеющих высокие демпфирующие свойства [1]. Для снижения влияния от собственных колебательных процессов, возникающих в системе СПИЗ, кроме изготовления деталей из материалов, гасящих колебания, применяют различные конструктивные решения, связанные с подбором габаритов и масс узлов станка [1].

В последнее время в станочные системы стали внедрять бесконтактные управляемые опоры в виде активных магнитных подвесов (АМП) и газомангнитных опор (ГМО) [3-5]. Это позволило встроить в цепь системы СПИЗ бесконтактное управляемое трансформируемое звено, которое позволило регулировать нагрузочные и жёсткостные характеристики, передаваемые этим звеном.

Приходится констатировать, что круг научных работ, посвящённых исследованию особенностей работы металлорежущих станков, имеющих в своей конструкции газомангнитные опоры, крайне ограничен. Исследования в МГТУ «СТАНКИН» показали, что с помощью электрошпинделя на активных магнитных опорах достигается качество обработанной поверхности $Ra = 0,4...0,63$ мкм. Также известен шпиндельный узел (ШУ) с магнитогазовыми гибридными опорами, разработанный в Японии, предназначенный для повышения точности обработки материалов [6]. Выполненный в Комсомольском-на-Амуре государственном университете (КНАГУ) ряд исследований со шпиндельными узлами на ГМО показал, что на внутришлифовальных операциях достигается точность обработки до 0,2 мкм. Следует отметить, что АМП уступают по нагрузочным характеристикам ГМО [1].

Использование ГМО в схеме СПИЗ с жёсткими связями между элементами позволяет преобразовать её в схему с трансформируемыми управляемыми звеньями, которые представляют собой различные среды в виде жидкой, газовой смазок или магнитного поля.

Для уменьшения внешних механических воздействий в виде колебаний, а также температурных деформаций узлов станка, таких как станина, в схему СПИЗ целесообразно ввести два бесконтактных управляемых звена (опоры): одно между заготовкой и станиной, второе между инструментом и станиной. При условии контроля относительного положения заготовки и инструмента между собой, через управляемые бесконтактные звенья можно обеспечить независимое положение заготовки и инструмента от внешних и температурных воздействий. Разработанная в КНАГУ система управления ГМО позволяет задавать положение оси ротора с точностью до 0,1 мкм [7].

В качестве бесконтактных управляемых трансформируемых звеньев целесообразно применить ГМО, обеспечивающие вращательное движение ротора и инструмента [3].

Предложенную схему станка с двумя управляемыми трансформируемыми звеньями (см. рис. 1) можно реализовать, например, для внутришлифовального станка. Как видно из рисунка, в системе СПИЗ зона взаимодействия инструмента и заготовки разомкнута двумя бесконтактными управляемыми ГМО. Такая схема позволяет во многом устранить внешние механические воздействия на систему, внутренние колебания, возникающие от приводов и подвижных частей, а также компенсировать температурные деформации станины и корпуса шпиндельного узла. Кроме того, следящая система контроля положения инструмента и заготовки позволяет компенсировать температурные деформации шпинделя и суппорта с инструментом.

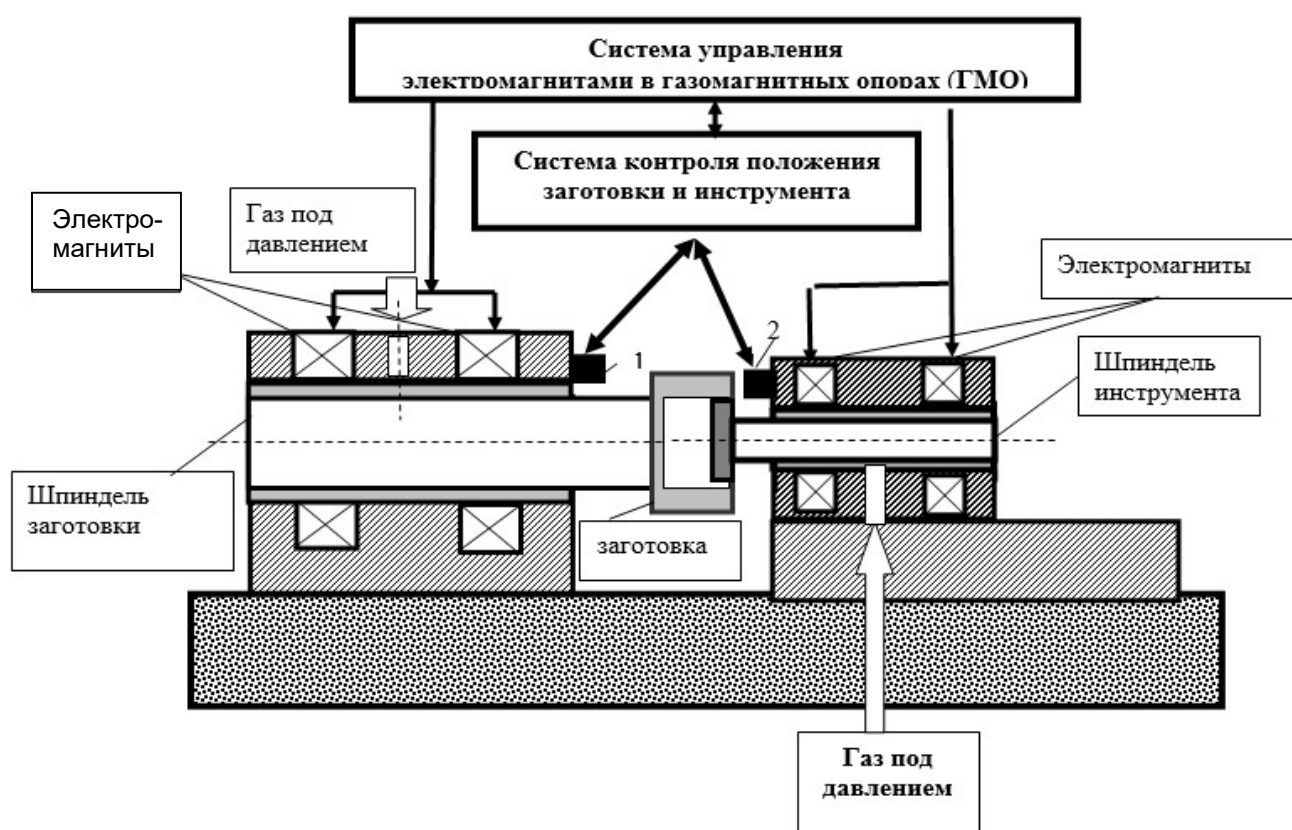


Рис. 1. Схема расточного станка с двумя бесконтактными трансформируемыми звеньями: 1 и 2 – датчики относительного положения

Для проверки работоспособности предложенной схемы был изготовлен стенд на базе внутришлифовального станка 3К227А, в котором шпиндель инструмента установлен на газоманнитных опорах с контролем положения оси, а шпиндель заготовки – на неуправляемых газостатических опорах.

Результаты экспериментальной оценки точности вращения шпинделя с управлением одним бесконтактным адаптивным звеном представлены на рис. 2.

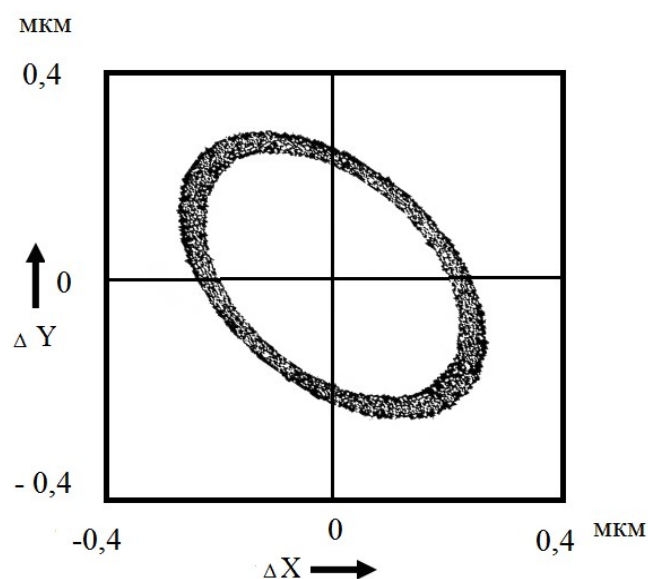


Рис. 2. Траектории движения оси шпинделя с выключенной электромагнитной частью опоры ($n = 25\,000 \text{ мин}^{-1}$)



На рис. 2 показана реконструированная траектория движения оси шпинделя с управляемым звеном. Как видно из рис. 2, применение даже одного трансформируемого управляемого звена в виде газоманитной опоры в шпиндельном узле позволяет достигать точность вращения до 0,2 мкм.

В настоящее время в Комсомольском-на-Амуре государственном университете проводятся исследования по влиянию бесконтактных управляемых трансформируемых звеньев с учётом пространственного относительного положения заготовки и инструмента на качество и точность различных видов механической обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинский, И. А. Концепция конкурентоспособных станков / И. А. Дружинский. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. – 247 с.
2. О теории газовой смазки и одной её задаче / А. В. Космынин, А. С. Хвостиков, В. С. Щетинин, А. В. Смирнов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2020. – № II-1(42). – С. 94-98.
3. Космынин, А. В. Основы проектирования высокоскоростных шпиндельных узлов на газоманитных опорах / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. С. Хвостиков. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 178 с.
4. Космынин, А. В. Применение новых газоманитных опор в шпиндельных узлах для высокоскоростной обработки деталей машин / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, Н. А. Иванова // Вестник ГОУВПО «КНАГТУ». Вып. 13: сб. науч. тр. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2009. – Ч. 1. – С. 180-182.
5. Шпиндельные узлы металлорежущих станков на опорах с внешним наддувом газа для финишной обработки отверстий малого диаметра / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. В. Ульянов, А. А. Ваньков // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2 (часть 19). – С. 4192-4196.
6. Yamada H. Development of Magnetic aerostatic hybrid spindle / H. Yamada, N. Suzuki // NTN, Technical review. – 2001. – No. 69. – S. 21-26.
7. Ульянов, А. В. Система управления активно управляемой газоманитной опорой / А. В. Ульянов // Современные тенденции технических наук: материалы III междунар. науч. конф. (г. Казань, октябрь 2014 г.). – Казань: Бук, 2014. – С. 49-52.
8. Сариков, М. Ю. Исследование влияния параметров электроэрозионной обработки на шероховатость обработанной поверхности / М. Ю. Сариков, А. И. Копылов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2020. – № II-1(42). – С. 110-116.

Содержание

Научное издание

ЭНЕРГЕТИКА

Шаломов В. И.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОВЫШЕННЫХ ДОКРИТИЧЕСКИХ
НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАРА ДЛЯ ТЕПЛОФИКАЦИОННОГО ЭНЕРГОБЛОКА
МОЩНОСТЬЮ 200-250 МВт 4

Лысов Н. А., Янченко А. В.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ СЖАТОГО
ВОЗДУХА С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ
В НЕБОЛЬШИХ ОБЪЕМАХ 12

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Андрианов И. К.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ШТАМПОВ
В УСЛОВИЯХ МНОГООПЕРАЦИОННОЙ ШТАМПОВКИ 19

Гордин С. А., Гринкруг М. С., Зайченко И. В.

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДУТЬЁМ
ТВЁРДОТОПЛИВНЫХ КОТЛОВ 25

Каблуков А. В.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЛИНЕЙНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ.
ОБЗОР НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ ПО ВОПРОСУ 31

Ким К. И., Ким К. К.

ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ
В РЕЖИМЕ НАБРОСА НАГРУЗКИ 40

Марченко Н. М.

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХФАЗНЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ В MATLAB 53

Подшивалова К. А.

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ
КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ
В ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ 64

Власьевский С. В., Скорик В. Г., Супрун Д. А., Буняева Е. В., Блажнов А. И.

СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СИЛОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ
ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ ТЯГИ 71

Столяров В. Я.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПОДГОТОВКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ИДЕНТИФИКАТОРОВ ПЕРЕД РАСПОЗНАВАНИЕМ 78

Афанасьева Ю. И., Рыбаков А. В., Шурпо А. Н.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ «УМНЫХ СИСТЕМ» 87

Ким К. К., Панычев А. Ю., Иванов С. Н.

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННОЙ МАШИНЕ МАЛОИНЕРЦИОННОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА 94

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Иванов С. Н., Колесник М. Б., Макаренко В. А., Фискова Т. К.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В ПЕРЕДАТОЧНЫХ МЕХАНИЗМАХ СПЕЦИАЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ 107

Космынин А. В., Щетинин В. С., Саблин П. А.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ
ПОСРЕДСТВОМ ВНЕДРЕНИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ
ЗВЕНЬЕВ В СИСТЕМУ СТАНОЧНЫХ СИСТЕМ 115

Учёные записки КнАГТУ
2020 № V-1(45)
Науки о природе и технике

Выпускающий редактор
С. Н. Иванов

Подписано в печать 25.09.2020
Дата выхода в свет 29.09.2020

Формат А4.
Бумага офисная 80 г/м².
Усл. печ. л. 13,63.
Уч.-изд. л. 17,18.
Тираж 200. Заказ 30140.

Отпечатано в типографии
КнАГУ
681013,
г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 27.

