

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П. О. СУХОГО»
ПАО «ОАК» ОКБ СУХОГО
ТАИЗСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (ЙЕМЕНСКАЯ РЕСПУБЛИКА)

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ

Сборник научных трудов

**В двух частях
Часть 1**

**Гомель
ГГТУ им. П. О. Сухого
2023**

УДК 621.01(063)

ББК 34.4

C56

Рецензенты: доктор технических наук, профессор *М. И. Михайлов* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор технических наук, доцент *А. А. Бойко* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор технических наук, доцент *И. А. Мурашко* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор технических наук, профессор *В. П. Кудин* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор технических наук, профессор *Н. В. Грунтович* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор технических наук, доцент *А. В. Овсянник* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор геолого-минералогических наук, профессор *В. Д. Порошин* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор физико-математических наук, профессор *О. Н. Шабловский* (ГГТУ им. П. О. Сухого)

Редакционная коллегия:

канд. физ.-мат. наук, доц. *А. А. Бабич*

канд. техн. наук, доц. *И. И. Суторьма*

канд. техн. наук, доц. *В. В. Тодарев*

канд. техн. наук, доц. *Г. В. Петришин*

канд. техн. наук, доц. *Ж. В. Кадолич*

канд. техн. наук, доц. *Н. А. Демяненко*

канд. экон. наук, доц. *Н. В. Сычёва*

канд. экон. наук, доц. *И. В. Ермонина*

Под общей редакцией д-ра техн. наук, доц. *А. А. Бойко*

Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – 220 с.

ISBN 978-985-535-511-4.

Представлены новейшие результаты научных исследований в области аддитивных технологий; наноматериалов в машиностроении; компьютерного моделирования технических, механических и биомеханических систем; мехатроники; энергосберегающих технологий и альтернативной энергетики; разработки нефтяных и газовых месторождений; физических и математических методов исследования сложных систем; проблем экономики, организации и управления производством.

Для научных и инженерно-технических работников промышленных предприятий и научно-исследовательских учреждений.

УДК 621.01(063)

ББК 34.4

ISBN 978-985-535-511-4 (ч. 1)

ISBN 978-985-535-541-1

© Оформление. Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ

<i>Столяров Д. В.</i> Современные и перспективные методы проектирования авиационной техники разработки ОКБ Сухого	7
<i>Грунтович Н. В.</i> Управление энергоэффективностью энергетических систем и промышленных комплексов	10

**СЕКЦИЯ I. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
В МАШИНОСТРОЕНИИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.
АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

<i>Филатов А. А., Попова Ю. А., Акулинин А. О.</i> Решение ключевых вопросов применения металлических сплавов в современных и перспективных изделиях ОКБ Сухого	19
<i>Носенко В. А., Карпов В. Г., Кременецкий Л. Л.</i> Морфология и химический состав обработанной поверхности сплава на основе ниобия при врезном шлифовании	22
<i>Мальпика Л. Д., Козерук А. С.</i> Прогрессивная технология изготовления линз с тонким центром	26
<i>Горбунов К. С., Позднякова А. И., Мазур И. П.</i> Влияние скоростной асимметрии на структуру металла	29
<i>Михайлов М. И., Шабакеева З. Я.</i> Формирование расчетных моделей боковых поверхностей сменных многогранных пластин	32
<i>Бобрышева С. Н.</i> Способ снижения пожароопасности наиболее распространенных полимерных материалов в 3D-технологиях	35
<i>Хазеев Е. В., Стасенко Д. Л.</i> Прикладное моделирование гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке	38
<i>Хазеев Е. В., Стасенко Д. Л.</i> Теоретическое моделирование гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке	41
<i>Ходосовская О. Ю., Бобарикин Ю. Л., Мартьянов Ю. В.</i> Влияние диаметров роликов и их углов охвата в канатной машине на свойства металлокорда	45
<i>Ельцова Е. С., Бобарикин Ю. Л., Мартьянов Ю. В.</i> Исследование влияния скорости тонкого волочения на свойства проволоки и металлокорда	49
<i>Железнякова Ю. И., Стасенко Д. Л.</i> Моделирование динамики работы золотникового гидравлического клапана	52
<i>Одарченко И. Б., Жаранов В. А., Предчанко И. В.</i> Принципы компьютерного анализа технологической сложности 3D-моделей отливок	55
<i>Гинзбург А. А., Андреевец Ю. А.</i> Анализ потерь мощности гидросистем с клапанной и объемной адаптацией к нагрузке при равномерном распределении расхода	58
<i>Ковалёв А. В., Андреевец Ю. А.</i> Моделирование течения жидкости в дроселирующем распределителе в программе KompasFlow	61
<i>Михальченко А. А.</i> Влияние цвета PLA на свойства материалов изделий, напечатанных на 3D-принтере	65

<i>Пинчук В. В., Гинзбург А. А., Гурбан О. К.</i> Расчет и конструирование монтажного корпуса гидроблоков управления машин	68
<i>Колодко А. С., Андреевец Ю. А.</i> Моделирование гидравлической системы с адаптацией к нагрузке в программе LMS Imagine.Lab AMESim.....	72
<i>Попов В. Б., Бойков В. П.</i> Агрегатирование белорусских тракторов с российскими навесными машинами.....	75
<i>Михайлов К. М.</i> Влияние параметров системы крепления ножей измельчающего барабана на их виброустойчивость	79

СЕКЦИЯ II. СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАНОМАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

<i>Насонов Ф. А., Морозов Б. Б.</i> Вопросы оценки прочности клеевых соединений деталей и агрегатов из полимерных композиционных материалов.....	83
<i>Пасовец В. Н., Ковтун В. А.</i> Теоретическая модель процесса формирования структуры и свойств композитов на основе дисперсной микроразмерной медной матрицы и наноразмерного углеродного наполнителя.....	86
<i>Попкова Ю. И., Петрикевич П. А.</i> К вопросу применения низколегированных насосно-компрессорных труб в условиях нагнетательных скважин РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»	90
<i>Умарова Т. М.</i> Разработка и исследование материалов на основе алюминидов для машиностроения	94
<i>Прусенко И. Н., Одарченко И. Б.</i> Исследование влияния зерновой структуры кварцевых песков на образование просечек в чугунных отливках.....	98
<i>Невзоров В. В., Бойко А. А., Алексеенко Ю. А., Соколов Е. В.</i> Свойства керамических изоляторов из отходов фарфорового производства	101
<i>Поздняков Е. П., Степанкин И. Н., Куис Д. В., Лежнев С. Н.</i> Износостойкость науглероженных слоев среднеуглеродистых конструкционных сталей	103
<i>Бойко А. А., Аль-Камали М. Ф. С. Х., Подденежный Е. Н., Аль-Арики Н. А. С.</i> Моделирование распределения Cu° в структуре SiO_2 пленки.....	107
<i>Подобед Д. Л., Шаповалов В. М.</i> Полимерные композиционные материалы на основе смесей вторичных полиолефинов и модифицированного бентонита	111
<i>Банний В. А., Царенко И. В.</i> Технологические особенности формирования радиопоглощающих волокнистых полимерных композитов	114

СЕКЦИЯ III. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ, МЕХАНИЧЕСКИХ И БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

<i>Целуева С. Н., Целуев М. Ю.</i> Тепловой режим работы многодискового тормоза....	118
<i>Козлов А. В.</i> Синтез систем автоматического управления многомерно-временным операторным методом.....	121
<i>Говядкова П. Ю., Курочка К. С.</i> Моделирование астигматизма с помощью сверточной нейронной сети	124
<i>Рубанов К. В.</i> Методология выделения вокального аудиопотока из медиафайла	128
<i>Тюрин С. А., Малык Н. Н.</i> К вопросу об автоматизированном проектировании узлов трения.....	131
<i>Заяц В. С., Токочаков В. И.</i> Моделирование работы гибридных энергоисточников на основе данных метеорологических условий в автономных системах электроснабжения	135

Коновалов Д. Е., Селиверстов Г. И. Проектирование системы видеонаблюдения для предприятия.....	138
Трохова Т. А. Программный комплекс автоматизации работы служб жилищно-коммунального хозяйства	141
Огородников Л. В., Русов Д. П., Еремейчик И. С. Расчет на прочность несущих металлоконструкций дизель-поезда серии ДРБ1 после длительной эксплуатации.....	145
Чернин Р. И., Дашук П. А., Авхачёв А. В. Расчет на статическую прочность тангенциально-осевого замка колесной пары с изменяемой шириной колеи 1520/1435 мм	148

**СЕКЦИЯ IV. РАДИОТЕХНИКА, МЕХАТРОНИКА, ТЕХНИЧЕСКИЕ
И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

Tyutyunnikov S. I., Stegailov V. I., Kobets V.V., Yuldashev B. S., Shakun N. G., Rozov S. V., Letov A. G., Rasulova F. A., Kryachko I. A., Smirnov A. A., Tran T. N. An Investigation of Products of (n, f) , (n, γ) and (γ, f) , (γ, xn, p) Reactions on Samples of Uranium and Bismuth using the Phasotron and LINAC-200 Accelerators at JINR: Experiments and Calculations	153
Комнатный Д. В. Общая динамика машин А. А. Андропова как основа нелинейной электромеханики	155
Комнатный Д. В. Сверхширокополосная помеха в виде первой производной гауссова импульса	158
Тодарев В. В., Савельев В. А., Бурачёнок И. Н. Нагрузочное устройство	160
Тодарев В. В., Савельев В. А., Бурачёнок И. Н. Асинхронный электропривод.....	163
Савельев В. А., Семенецкий И. С. Система оценки положения беспилотного летательного аппарата.....	167
Захаренко Л. А., Карпов В. А. Модернизация имитатора электродной системы И-02	170
Езвенков А. В. PantryPharm – фармацевтический помощник	173
Курочка К. С., Ермашкевич В. С., Дорошко Д. А., Расшивалов Н. И. Обнаружение плодов огурца для автоматизации процесса сбора многофункциональным аграрным роботом на основе сверточных нейронных сетей.....	175
Дорощенко И. В., Погуляев М. Н. Исследование электромагнитного момента асинхронно-вентильного каскада при различных типах преобразователей в роторной цепи	178
Брель В. В., Веннер Л. В., Лебединский В. Е., Кузьмин А. Н. Стенд для исследования переходных процессов в электродвигателях с тормозными устройствами.....	181
Логвин В. В., Брель В. В., Свиридович И. В. Моделирование автоколебательных режимов в трехфазном асинхронном электродвигателе	184
Щуплов В. В., Кухаренко С. Н., Красовская Н. А. Передающая антенна на соленоиде для передачи радиосигнала из нефтепроводной трубы	187
Крышнеў Ю. В., Собалеў У. І., Запольскі А. Я., Дравіца М. В. Умовы фарміравання ахоўнага тока ў сістэмах электрахімічнай абароны	190
Козусев Ю. А. Повышение помехозащищенности измерительных преобразователей.....	193

Виноградов Э. М. Анализ системы автоматического управления с помощью программного пакета Scilab	197
Карпов В. А., Ростокينا О. М., Котова Ю. Е., Карпов А. В. Электролитический чувствительный элемент уровня отклонения от горизонта, питаемый двумя кратными напряжениями	200
Ковалев А. В., Литвинов Д. А. Дополнительная защита интеллектуальных ключей при работе на низкоомную нагрузку	202
Карпов В. А., Ростокينا О. М., Котова Ю. Е., Карпов А. В. Погрешности осреднения широтно-импульсно модулированных последовательностей напряжения	206
Литвинов Д. А., Ковалев А. В., Лашкевич А. В. Контроллер мыши с управлением жестами	207
Крышнеў Ю. В., Запольскі А. Я. Блок сілкавання кіраванага пераўтваральніка частаты для асінхронных рухавікоў	211
Запольскі А. Я., Крышнеў Ю. В., Ковалеў А. В., Котава Ю. Я. Параўнальна- супастаўляльны аналіз асноўных моў праграмавання лагічных кантролераў	214
Поляков К. Д., Ляблин М. В. Разработка системы регистрации угловых колебаний поверхности земли для изучения движения колайдера NICA	217

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 621

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ РАЗРАБОТКИ ОКБ СУХОГО

Д. В. Столяров

*Публичное акционерное общество «Объединенная авиастроительная
корпорация» ОКБ Сухого, г. Москва, Российская Федерация*

Рассмотрено влияние новых технологий и их внедрения на методы проектирования конструкций планера. В частности, изложены подходы к проектированию деталей и агрегатов, изготавливаемых с помощью аддитивных технологий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, топологическая оптимизация, сетчатые структуры, трехслойные панели.

MODERN AND PERSPECTIVE DESIGN METHODS OF AIRFRAME BY SUKHOI DESIGN BUREAU

D. V. Stolyarov

*Public Joint Stock Company "United Aircraft Corporation"
Sukhoi Design Bureau, Moscow, Russian Federation*

The paper considers and analyzes the new modern technologies impact on design methods and new types of airframe designs. Including the new methods and design technics that should appear in wide additive manufacturing application.

Keywords: additive manufacturing, topological optimization, anisogrid structures, sandwich panels.

Технологии изготовления авиационных агрегатов развиваются и совершенствуются. Развитие технологий меняет облик конструкций и, как следствие, подход к конструированию. Так, например, электронно-лучевая сварка титановых и алюминиевых сплавов позволяет избавиться конструкцию от стыков с большими габаритами. При этом конструкция получается максимально монолитной – без затрат массы на стыки. Инфузионная технология и RTM-технология позволили усложнить форму композиционных монолитных деталей и отойти от концепции «черный алюминий», в которой вся геометрия композиционных деталей наследовалась с аналогичных металлических деталей. Опять же конструкция агрегата из композиционного материала меняла облик в сторону более монолитного агрегата. На данный момент аддитивные технологии открывают новые перспективы перед конструкторами, и, конечно, внедрение их повлияет на облик конструкции. В настоящее время уже можно предположить, какие агрегаты конструкторы смогут реализовать.

Метод адаптации существующих конструкций к новым технологиям. Первым методом на основе опыта внедрения предыдущих прорывных технологий можно назвать метод адаптации к существующим конструкциям. В этом методе технология используется для реализации потребности в объединении нескольких деталей в одну, более сложную. Также возможно применение технологии для наращивания

потребных габаритов заготовок для фрезерования. В обоих случаях облик конструкции не меняется радикально и достижим методами ЭЛС (электронно-лучевой сварки). Единственное преимущество перед ЭЛС – высокая точность, так как детали не требуют последующей термообработки, как в случае с ЭЛС. Метод проектирования таких агрегатов и деталей схож с проектированием сварных конструкций с использованием традиционных проектировочных расчетов в стеночных конструкциях, подкрепленных ребрами.

Методы топологической оптимизация двух видов: оптимизация формы детали; оптимизация конструктивно-силовых схем (КСС) агрегата. Наиболее отличающийся облик конструкций от тех, которые мы привыкли видеть, дает метод топологической оптимизации. Это машинная генерация формы конструкции, которая оптимальна по прочности, жесткости и весу. Стоит подчеркнуть, что сгенерированная форма содержит только необходимый материал, т. е. важность каждого элемента в работе такой конструкции одинакова. Традиционные технологии уже сформировали облик конструкций – форма их сложна, но привычна и изучена. Теперь же для того чтобы реализовать новые возможности технологии, конструктору необходимо изобрести сложную форму, от которой он был отгорожен технологическими ограничениями. Таким образом, машина подсказывает человеку оптимальную форму, и этот метод возможно реализовать на двух уровнях: оптимизировать форму детали и оптимизировать КСС агрегата.

Метод подкрепления периодическими структурами: соты, гофры, объемно ориентированные стержни. Можем ли мы применить новые возможности 3D-печати к оболочке планера? Можем, если используем известный тип конструкции – оболочку, подкрепленную периодическими структурами. Известные сотовые трехслойные панели с композиционными или металлическими обшивками являются такими конструкциями. Метод проектирования таких панелей известен и усложняется лишь учетом прочности заполнителя. При этом соты и гофры, применяемые в авиационных конструкциях, имеют весьма тонкие стенки и достигают толщин не более 0,03–0,05 мм. Разрешающая же способность 3D-принтеров позволяет уверенно реализовывать толщины не менее 0,8 мм, что является технологическим ограничением в адаптации сотовой конструкции заполнителя. Сотовый заполнитель, напечатанный на 3D-принтере, очевидно, будет тяжелее полученного традиционными технологиями пайки сот из фольги. Альтернативой для аддитивных технологий являются стержневые заполнители, ориентированные в пространстве определенным образом. Применение конструкций с периодическими структурами вкуче с оптимизацией толщины полотна дает возможность приблизиться к другой бионической структуре, известной в природе, такой, как кость животного или человека. Ее толщина оптимизирована для обеспечения устойчивости и прочности, а заполнитель также имеет периодическую пористую структуру. На данный момент тестируются образцы на сдвиг и устойчивость, спроектированные по методу подкрепления оболочек периодическими структурами.

Метод топологической оптимизации КСС агрегата. Говоря о периодических структурах, подкрепляющих оболочку агрегата, и имея ввиду новые технологические возможности, можно задаться вопросом: а возможно ли подкреплять оболочку непериодической структурой? Другими словами, может ли заполнитель быть переменной плотности, или ориентирован иначе? Топологическая оптимизация КСС дает утвердительный ответ на этот вопрос. Исходными данными для такой оптимизации служит область, ограниченная агрегатом, а результат – локальные оси жесткости, в которые необходимо «вырастить» подкрепляющий элемент. Конструктор может интерпретировать этот результат, как стеночным, так и стержневым вариантом кон-

струкции. Имея внятную схему заделки агрегата, такого, как стабилизатор, интерцептор и другие элементы механизации и оперения, машина подскажет КСС – оптимальное расположение подкрепляющих элементов. Чаще всего результат будет похож на лучевую схему: некое ветвистое дерево, которое предстоит интерпретировать в конструкцию. В общем случае прогрессивные черты таких конструкций можно описать следующим образом:

- наполнитель заменяет собой внутренний каркас агрегата (стабилизатора);
- переменная плотность позволяет добиться оптимизации жесткости и прочности связи верхней обшивки с нижней;
- способ соединения наполнителя – пайка/склейка/сварка/печать;
- обшивки могут быть как композиционные, так и металлические;
- в зоне соединения с заделкой монолит может быть соединен болтами с обшивкой;
- «лучевая» структура интерцепторов – цельнопечатанная или сваренная из напечатанных фрагментов;
- может служить несъемной оснасткой для композиционных панелей тонких толщин (в роли закладного элемента);
- может быть приварена сквозным проплавом к металлической обшивке оптимизированной толщины.

Стоит заметить, что конструкции лучевых схем уже реализовывались в деревянных планерах самолетов поршневого эры. Новое здесь – возросшая роль обшивки и контура оболочки. Эта роль – как раз в сдвиге и нормальных напряжениях оболочки. Это делает оболочку строительной основой для современных металлических и композиционных планеров.

Метод проектирования конструкций с поддерживающими структурами: отличия и общие черты с традиционными методами проектирования, отличия от топологической оптимизации. Сохранить строительную основу при проектировании новых конструкций – весьма сложная задача. Тем более, что топологическая оптимизация старается избавить нас от разграничения на первичные и поддерживающие структуры. Если же поставить задачу сохранить строительную основу (первичную структуру) и подкрепить ее альтернативным методом, то возникает потребность в новом методе проектирования. Это метод проектирования конструкций с поддерживающими структурами. Поддерживающие структуры выделяются здесь, так как строительная основа не представляет особой проблемы для проектирования. Это (строительная основа), как правило, – замкнутый контур, или открытый контур типа швеллера. Так, спроектированный образец лонжерона по методу поддерживающих структур содержит в себе оптимизированный короб замкнутого контура или швеллер, однако способ передачи нагрузок на него с узлов навески и привода совершенно отличается от традиционного. Привычная стеночная структура кронштейнов, вваренных в контур, заменена на сложную сетчатую. Кроме этого никаких ребер, разбивающих регулярную зону на клетки, здесь нет. Плотной подкреплено периодической структурой также сетчатого типа. Возможные варианты этих сетчатых структур можно обобщить в три группы по топологии: пространственная ферма; паутинка; скелет рыбы. Пространственная ферма – стержневая структура, подкрепляющая первичные пояса и контуры стержневыми стойками с диагональными подкосами. Паутинка – топология имеет характерный признак лучевой стержневой структуры, исходящей из областей монолита с максимальными разрывными напряжениями. Скелет рыбы – топология строится на осевой структуре (хребте), исходящей из проушины и уменьшающей площадь сечения по мере передачи нагрузки на контур. Передачи нагрузки с этой осевой структуры (хребта) на контур осуществляется через

ферменные стержневые структуры. Варианты агрегатов с подобной топологией легко сконструировать, исследовать их эффективность и корректировать метод в части частоты и сечения поддерживающих структур.

Возможно, что применение всех этих методов и анализ их эффективности позволят занять каждому методу свою нишу в конструкции планера самолета. В любом случае конструкторская мысль будет меняться и приспосабливаться к новым технологиям и возможностям. Вместе с этим будут рождаться и другие методы конструирования, позволяющие достигать более эффективных технических решений.

УДК 622.91:621.311

УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Н. В. Грунтович

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Представлен обзор проводимых исследований в области диагностирования текущего состояния и прогнозирования показателей энергетической эффективности энергетических систем и промышленных комплексов. Для крупных промышленных потребителей предложено решение вопросов их устойчивого функционирования при объективной оценке энергетической составляющей затрат в структуре себестоимости продукции, управления их энергоэффективностью. Результаты анализа особенностей работы систем газоснабжения отдельных регионов и Республики Беларусь в целом позволили сформировать балансовую структуру потребления газа и учесть дальнейшее ее изменение при развитии системы газоснабжения в условиях устойчивого развития промышленного комплекса страны и вводе в эксплуатацию атомной энергетической станции.

Ключевые слова: энергоэффективность, удельные расходы энергоресурсов, моделирование, прогнозирование, режимы промышленных потребителей, системный анализ, региональные системы газоснабжения, сложная техническая система, печное оборудование, футеровка, водопроводно-канализационное хозяйство, искусственное волокно, транспортировка нефти.

ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT OF ENERGY SYSTEMS AND INDUSTRIAL COMPLEXES

N. V. Hruntovich

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The presented work is devoted to a review of ongoing research in the field of diagnosing the current state and predicting the energy efficiency indicators of energy systems and industrial complexes. For large industrial consumers, it is proposed to solve the issues of their sustainable functioning with an objective assessment of the energy component of costs in the structure of the cost of production, management of their energy efficiency. The results of the analysis of the features of the operation of gas supply systems in individual regions and the Republic of Belarus as a whole made it possible to form a balance structure of gas consumption and take into account its further change in the development of the gas supply system in the conditions of sustainable development of the country's industrial complex and the commissioning of a nuclear power plant.

Keywords: energy efficiency, specific energy expenses, modeling, forecasting, industrial consumers, system analysis, regional gas supply systems, complex technical system, stove equipment, lining, water supply, artificial fiber, oil transportation.

В Республике Беларусь, в одной из первых республик бывшего Союза, сложилась система государственного управления и контроля за эффективным расходованием топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) благодаря Л. А. Дубовику – первому Председателю Государственного Комитета по энергоэффективности при Совете Министров Республики Беларусь. Ключевыми моментами этой системы являются обязательное энергетическое обследование предприятий, учреждений, организаций, нормирование ТЭР, оценка целевого показателя по энергосбережению (ЦП). Для контроля за энергоэффективностью (ЭЭФ) предусмотрены формы Государственной статистической отчетности, данные которых позволяют оценивать текущее состояние ЭЭФ всех субъектов хозяйствования республики.

Так, в качестве первоочередных мер по реализации пятилетних Республиканских программ «Энергосбережение» ставились задачи по корректировке действующих и разработке новых нормативно-технических документов в части повышения эффективности использования ТЭР. Поэтому разработка новых методов, позволяющих выявлять и оценивать экономию электрической энергии (ЭЭ) от мероприятий в технологических процессах производственных предприятий (ПП), прогнозировать и нормировать как общие, так и удельные расходы ЭЭ (УРЭ) с учетом изменения объемов производственной программы, оценивать и нормировать ЦП в сопоставимых условиях, приобрела актуальность.

Целая плеяда таких известных ученых, как А. А. Федоров, А. В. Праховник, В. И. Гордеев, Б. В. Папков, Г. В. Никифоров, Б. И. Кудрин, С. И. Гамазин, И. Е. Васильев, А. Б. Лоскутов, Г. С. Хронусов, В. И. Доброжанов, В. Г. Журавлев, А. В. Ляхомский, Е. А. Конюхова, Е. М. Червонный и др., внесла свой вклад в развитие методов управления электропотреблением ПП.

Первые статистические модели потребления ЭЭ пришли к нам из 40-х гг. прошлого столетия, когда начали активно формироваться промышленные предприятия. Вид модели, описывающий закон изменения потребленной ЭЭ и выпущенной продукции:

$$W_{уд.ЭЭ} = w_{уд.техн} + W_{усл.-пост} / П, \text{ кВт} \cdot \text{ч/ед. продукции},$$

где $W_{усл.-пост}$ – составляющая потребления энергоресурса, не зависящая от объема выпускаемой продукции, кВт · ч; $w_{уд.техн}$ – технологический удельный расход энергоресурса на выпуск единицы продукции, кВт · ч/ед. измерения; П – объем производства продукции, ед. измерения.

Необходимость поиска новых подходов для решения задач оценки ЭЭФ, в первую очередь, определяется коренными изменениями условий функционирования промышленными предприятиями: это нестабильность производственной программы и увеличение энергетической составляющей затрат в структуре себестоимости продукции, что отразилось на ее конкурентной способности, а также сложность объектов управления (современное промышленное предприятие определено доктором технических наук, профессором Б. И. Кудриным в 80-х гг. как сложная техническая система кибернетического типа, состоящая из большого количества слабосвязанных и слабовазаимодействующих элементов). Для предприятий Беларуси появилась необходимость в условиях проводимой реконструкции и модернизации технологического оборудования выполнения производственной программы.

Впервые в 2004–2007 гг. для решения задач комплексной оценки ЭЭФ предприятий транспорта нефти (ПТН) со сложной взаимосвязью между электропотреблением и технологией предложено использовать многофакторные регрессионные модели электропотребления. Количество факторов, включенных в модель, изменяется в зависимости от решаемой задачи ЭЭФ и от состояния подсистем, определяющих технологическую систему в целом (рис. 1). Разработанная методология оценки ЭЭФ ПТН на основе регрессионной модели зависимости электропотребления от влияющих факторов позволяет определять экономию ЭЭ в технологическом процессе ПТН, автоматизировать расчет и повысить достоверность текущей и прогнозной оценок показателей энергетической эффективности, что подтверждается семью актами внедрения с суммарным экономическим эффектом 449 654 долл. США/год. Было показано, что подходы к оценке показателей ЭЭФ, разработанные для ПТН, могут быть адаптированы для ПП с простой (или сводящейся к ней) взаимосвязью между энергетикой и технологией. Для таких ПП использовалась однофакторная математическая модель расхода ЭЭ в зависимости от объемов произведенной продукции, которая позволяет:

- выполнять анализ существующих режимов производства и оценивать их энергоэффективность;
- производить расчет плановой потребности ТЭР в условиях изменяющейся производственной программы;
- оценивать потенциал энергоэффективности за счет повышения загрузки технологического оборудования и наращивания объемов выпуска продукции;
- производить оценку эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий;
- рассчитывать ЦП в сопоставимых условиях.

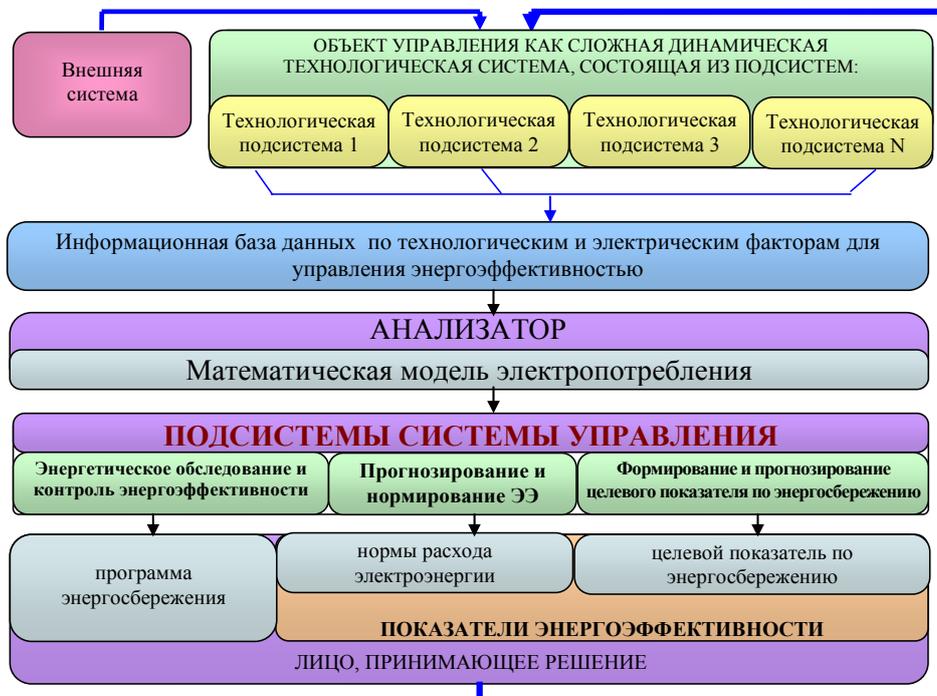


Рис. 1. Структурная схема управления энергоэффективностью промышленных предприятий

В 2010 г. на базе двух предприятий транспорта нефти «Дружба» была защищена диссертационная работа А. С. Фикова, в которой представлены методы определения потенциала энергосбережения от воздействия на эквивалентный диаметр нефтепровода и вязкость нефти, экспресс-оценки потенциала энергосбережения в технологии транспорта нефти, разработаны способы и программное обеспечение прогноза изменения электропотребления от реализации таких технологических энергосберегающих мероприятий, как очистка нефтешлама линейной части нефтепровода, применение противотурбулентной присадки, строительство лупингов для технологически незавершенных участках нефтепровода, работающих в условиях изменяющейся производственной программы.

В 2009 г. Д. Р. Мороз подготовил диссертационную работу «Моделирование энергопотребления промышленных потребителей для прогнозирования показателей энергетической эффективности» на базе Светлогорского ПО «Химволокно».

Впервые введено и определено понятие промышленного потребителя с неоднозначной взаимосвязью между энергопотреблением и отчетным объемом выпускаемой продукции как потребителя, технологический процесс которого включает в себя большое количество операций, растянутых во времени таким образом, что отчетный суточный объем выпускаемой продукции формируется в течение нескольких дней.

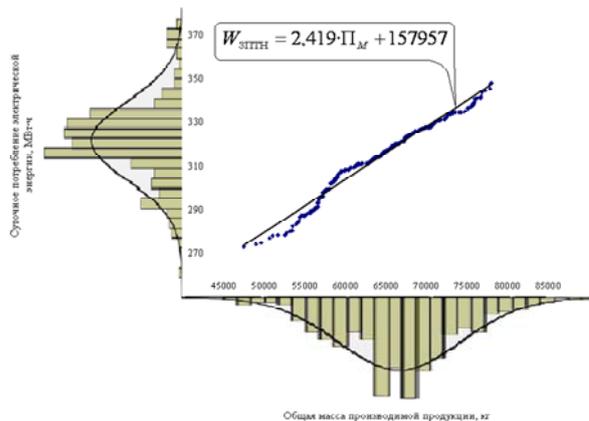


Рис. 2. Построение модели электропотребления с использованием параметров законов распределения объемов выпускаемой продукции и расхода электрической энергии

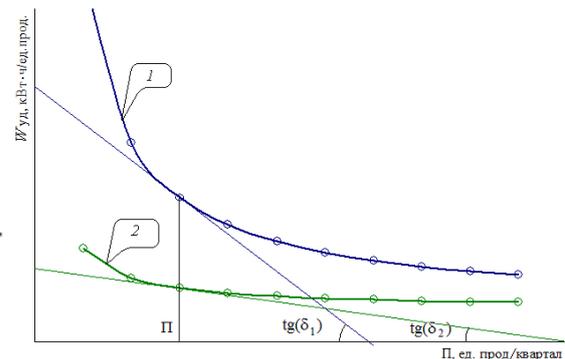


Рис. 3. Изменение угла наклона касательной к кривой $W_{уд} = f(\Pi)$ при изменении условно-постоянной составляющей электропотребления

Разработан способ построения модели энергопотребления промышленных потребителей с неоднозначной взаимосвязью между расходом ТЭР и объемами выпускаемой продукции, отличающийся сопоставлением параметров законов распределения электропотребления и воздействующих факторов и позволяющий повысить достоверность определения удельного технологического расхода ТЭР на выпуск продукции и условно-постоянной составляющей энергопотребления предприятия (рис. 2 и 3).

Впервые для такого крупного ПП на основе модели электропотребления разработаны:

– способ прогнозирования удельных расходов ТЭР промышленных потребителей с простой взаимосвязью между энергетикой и технологией и экономии энергетических ресурсов при изменении объемов выпускаемой продукции, отличающийся учетом изменения доли условно-постоянной составляющей расхода ТЭР в общем балансе предприятия;

– способ определения приоритетности внедрения энергосберегающих мероприятий, отличающийся учетом изменения эффекта от энергосберегающего мероприятия в условиях изменения объемов и номенклатуры выпускаемой продукции;

– способ определения ЭЭФ загрузки технологического оборудования ПП, основанный на использовании параметров модели энергопотребления и позволяющий выявить зоны энергетической эффективности и соответствующие им приоритетные направления энергосбережения.

Подготовленная докторская диссертация и кандидатские диссертации А. С. Фикова и Д. Р. Мороза положили начало формированию в Республике Беларусь научной школы по энергоэффективности [7].

В 2013 г. ОАО «Гомельстекло» инициировало научно-исследовательскую работу на тему «Прогнозирование показателей энергоэффективности, оценка потенциала энергосбережения и повышения энергоэффективности ОАО «Гомельстекло»». Основанием для проведения данной работы на ОАО «Гомельстекло» являлась невозможность выполнения директивных заданий по экономии ТЭР (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 30 декабря 2012 г. № 1261 «О некоторых вопросах потребления электрической энергии и природного газа в 2013 году»), несмотря на ввод в эксплуатацию новой технологической линии производства листового стекла (запущена в эксплуатацию 25.03.2010 г.) и модернизацию старой технологической линии (введена в эксплуатацию 13.07.2004 г., остановлена на холодный ремонт 16.06.2010 г., запущена в эксплуатацию после реконструкции в феврале 2013 г.). Полученные результаты позволили предприятию обосновать невозможность выполнения задания по снижению расхода ТЭР в годовом объеме 5 % и освободить от значительных штрафных санкций. Результаты работы докладывались Вице-премьеру Республики Беларусь П. И. Семашко и получили поддержку в реализации научной работы. Многолетний мировой опыт эксплуатации печного оборудования (стекольные, цементные заводы) показал, что в процессе его эксплуатации происходит старение футеровки печи, вследствие чего тратится больше газа для компенсации потерь и поддержания параметров режимов плавки. В процессе исследований произведена оценка динамики старения футеровки печи технологических линий производства листового стекла.

Доказано, что за счет старения футеровки печи и износа ограждающих конструкций ежесуточно расход природного газа на производство стекла увеличивался на 14,5 кг у. т. Это означало, что ежегодное снижение энергоэффективности производства листового стекла составляло в максимуме до 10 %. Фактическое снижение ЭЭФ за 5-летний период эксплуатации печи технологической линии производства листового стекла Л₁ составило 18,4 % относительно 2005 г., т. е. в среднем 4,6 % в год. Была произведена оценка энергоэффективности производства листового стекла после ввода в эксплуатацию современной технологической линии производства Германии Л₂ и модернизации старой технологической линии Л₁ [1, 2].

В 2010 г. после ввода в эксплуатацию новой технологической линии Л₂ снижение удельных расходов суммарных энергозатрат (газ и электроэнергия) на производство листового стекла составило 29 % для производительности 450 т/сутки. Достигнутое значение удельного расхода суммарных энергозатрат на уровне 0,24 т у. т./т соответствует лучшим мировым производствам листового стекла. Эффективность ремонтных работ линии Л₁ по суммарным энергозатратам в максимуме составила 15 % (при сравнении одинаковых по производительности режимов 2010 и 2013 гг.), а с учетом наращивания объема суточной производительности результирующая энергоэффективность производства листового стекла составила 26 %.

Научным результатом работы явилась многофакторная аддитивная регрессионная модель суточного энергопотребления технологической линии по производству листового стекла в виде аддитивного регрессионного уравнения, включающая в качестве факторов объем выпущенной продукции, содержание оксида железа в стекле, температуру наружного воздуха и количество суток эксплуатации печи. Разработан метод оценки темпов снижения энергоэффективности линии по производству листового стекла за счет износа огнеупоров стеклоплавильной печи (рис. 4 и 5). Полученные научные результаты и составили основу диссертационной работы Е. Л. Шенца «Многофакторная модель и методы оценки и прогнозирования энергоэффективности промышленных потребителей на примере стекловарочного производства».

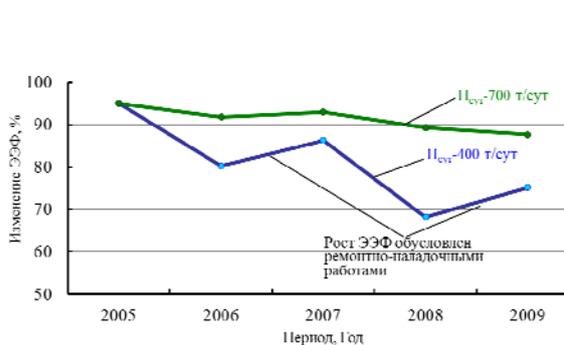


Рис. 4. Динамика изменения энергоэффективности производства листового стекла за 2004–2009 гг. при суточной производительности 400 и 700 т/сут

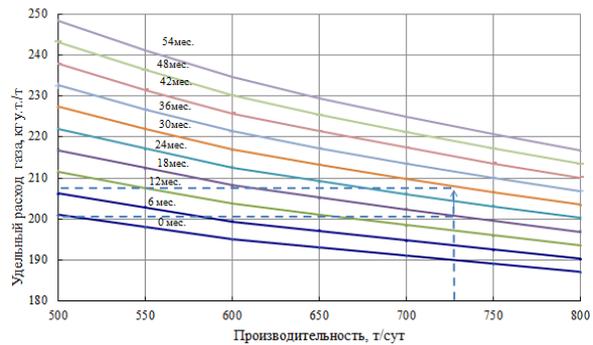


Рис. 5. Номограмма для определения удельного энергопотребления технологической линии при различных значениях воздействующих факторов на полугодовом интервале

С 2014 по 2016 г. А. А. Капанским проведена огромная научно-исследовательская работа для трех водоканалов Республики Беларусь: КПУП «Гомельводоканал», УП «Витебскводоканал», КЖУП «Уником», г. Жлобин. Им подготовлена кандидатская диссертация на тему «Прогнозирование и оценка текущего состояния энергетической эффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения». Работа выполнялась в соответствии с Государственной программой научных исследований «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» по заданию 2.2.36 «Разработка методологических принципов управления энергоэффективностью основных технологических процессов для снижения энергоемкости продукции». Исследования проводились на кафедре «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого в рамках задания 2014 г. «Разработка методологических принципов формирования программ по энергосбережению для промышленных потребителей, работающих в условиях переменной технологической загрузки» и задания 2015 г. «Разработка методики прогнозирования показателей энергоэффективности промышленных предприятий, работающих в условиях переменной технологической загрузки при учете структуры потребляемых ТЭР и структуры внедряемых мероприятий по энергосбережению».

В диссертационной работе для предприятий водопроводно-канализационного хозяйства разработаны [3–5]:

– методы прогнозирования общих и удельных расходов ЭЭ, основанные на многофакторных регрессионных моделях электропотребления, отличающиеся от

существующих методов корректировкой коэффициентов регрессии, направленной на минимизацию погрешности прогнозирования, позволяющие учесть внедрение энергосберегающих мероприятий, ввод в эксплуатацию трубопроводных сетей, насосного оборудования, изменение качества очистки и объемов производства;

– способ оценки текущего состояния ЭЭФ, основанный на многофакторных регрессионных моделях электропотребления, отличающийся определением коэффициента чувствительности изменения удельного расхода ЭЭ, позволяющий определить приоритетные энергосберегающие мероприятия;

– метод оценки регулировочной способности по ЭЭФ насосного оборудования, основанный на проведении инструментальных измерений режимов работы насосных агрегатов (НА), отличающийся определением фактических удельных расходов ЭЭ на подъем воды при сохранении конфигурации трубопроводной сети, позволяющий выявить резервы экономии ЭЭ при управлении режимами работы НА для заданных объемов водопотребления.

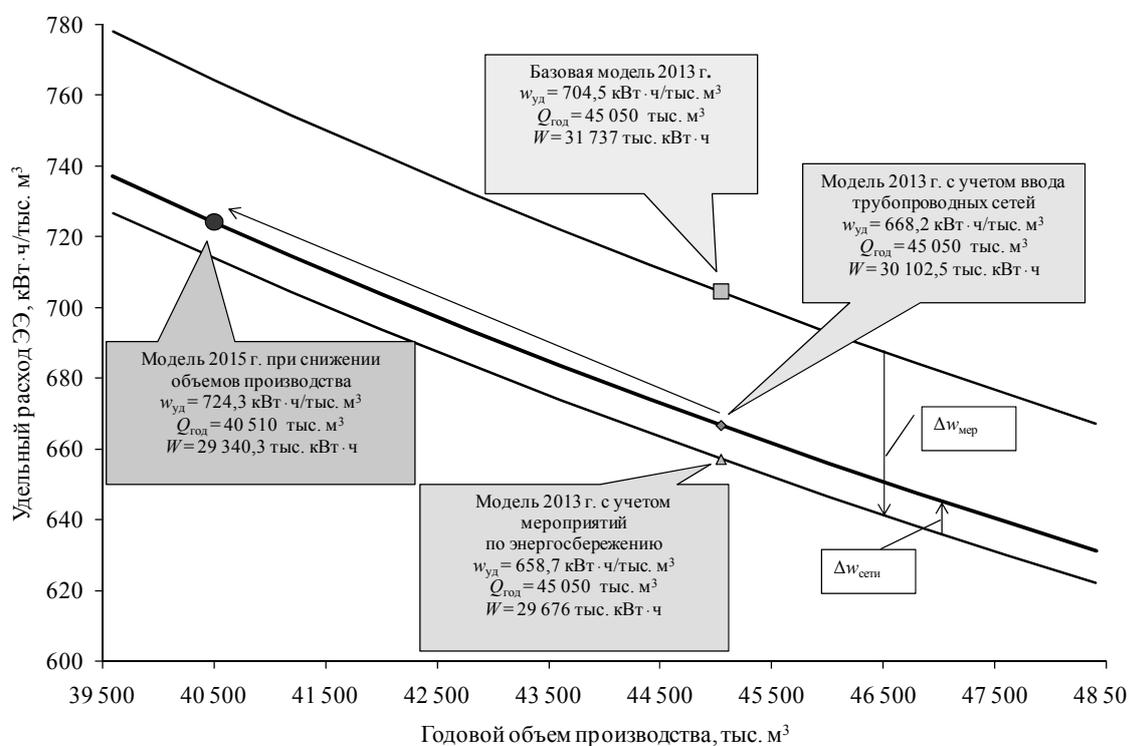


Рис. 6. Изменение удельного расхода электрической энергии при внедрении энергосберегающих мероприятий и вводе в эксплуатацию трубопроводных сетей на примере системы водоснабжения г. Гомеля

При выполнении задания № 2.2.36 «Разработка методологических принципов управления энергоэффективностью основных технологических процессов для снижения энергоемкости продукции» ГПНИ «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» проводились исследования структуры потребления ТЭР 120 промышленных предприятий различных отраслей промышленности и оценка влияния условно-постоянной составляющей ТЭР на ЭЭФ производства при изменении производственной программы [8, 9].

Начиная с 2019 г. научная группа проводит исследования режимов потребления газа в региональных системах газоснабжения (РСГС) Республики Беларусь. В 2019–2020 гг. выполнялось задание 1.2.25 «Разработка методического обеспечения для принятия решений при формировании режимов потребления газа для региональных систем газоснабжения» ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии» на 2019–2020 гг. В настоящее время выполняется задание 1.1.10 «Системные исследования режимов регионального газоснабжения для обеспечения устойчивого функционирования энергетического комплекса Республики Беларусь» ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии» [6, 10–12]. В 2021 г. впервые для Гродненской региональной системы газоснабжения разработаны структурные поля суточного потребления газа от среднесуточной температуры наружного воздуха « $b_{\text{сут}} - t_{\text{сут}}$ » по 6 укрупненным балансовым группам (УБГ): УБГ «Энергетика», УБГ «Сельское хозяйство, кооперация», УБГ «Комбыт («Минжилкомхоз»», УБГ «Население», УБГ «Промышленность», УБГ «Прочие». Для каждой балансовой группы определен вид структурного поля « $b_{\text{сут}} - t_{\text{сут}}$ » (рис. 7 и 8) и доказана устойчивость вида во времени:

– поле с четким расслоением $b_{\text{сут}}$ на две температурные области, определяемые состоянием системы отопления («включено» – синяя область на рис. 7, либо «отключено» – красная область на рис. 8) и перекрытием этих областей в зоне неустойчивого, неопределенного состояния РСГС (от 0 до 8 °С) (ГродноРСГС – в целом, УБГ «Минжилкомхоз», УБГ «Энергетика»);

– поле однородного вида (рис. 2) без расслоения $b_{\text{сут}}$ на выраженные температурные области, с некоторой зависимостью роста суточного потребления газа при снижении температуры наружного воздуха при значительном вертикальном разбросе $b_{\text{сут}}$, соответствующих одному и тому же значению температуры наружного воздуха (УБГ «Промышленность», УБГ «Прочие», УБГ «Сельское хозяйство, кооперация»).

Разработаны математические модели взаимосвязи суточного расхода газа от температуры наружного воздуха, определены сезонные коэффициенты и условно-постоянная расхода газа, не зависящая от изменения среднесуточной температуры наружного воздуха.

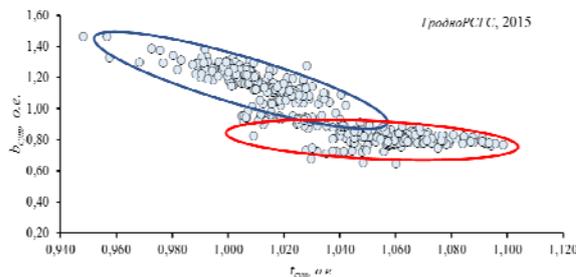


Рис. 7. Структурное поле « $b_{\text{сут}} - t_{\text{сут}}$ » с четким расслоением $b_{\text{сут}}$ на две температурные области, определяемые состоянием системы отопления («включено» – синяя область, либо «отключено» – красная область)

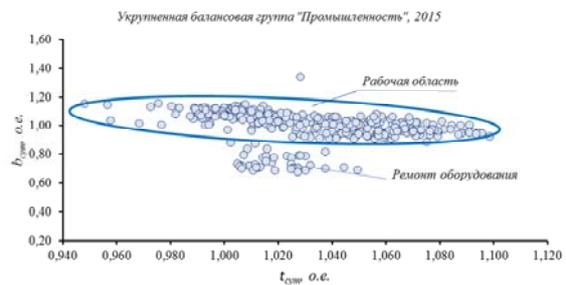


Рис. 8. Структурное поле « $b_{\text{сут}} - t_{\text{сут}}$ » однородного вида без расслоения на выраженные температурные области

Проводимые исследования научной группы направлены на решение важнейших государственных задач. Так, в 2021 г. начато выполнение задания 1.1.11 «Методика оценки энергоэффективности промышленных производств с газовым печным оборудованием для обеспечения устойчивого функционирования и развития энергетического комплекса Республики Беларусь» ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии» на 2021–2025 гг., № государственной регистрации 20211650 от 26.05.2021 г.

Литература

1. Петухова, Р. В. О проблемах управления энергоэффективностью производства листового стекла / Р. В. Петухова, Н. В. Грунтович, Е. Л. Шенец // Энергоэффективность. – 2014. – № 3. – С. 24–27.
2. Грунтович, Н. В. Влияние структуры потребления ТЭР предприятия на эффективность внедрения мероприятий по энергосбережению / Н. В. Грунтович, Е. Л. Шенец // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2014. – № 2. – С. 58–66.
3. Грунтович, Н. В. Развитие методического обеспечения диагностирования и прогнозирования энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения / Н. В. Грунтович, Д. Р. Мороз, А. А. Капанский // Энергоэффективность. – 2015. – № 3. – С. 20–23.
4. Совершенствование систем управления энергетической эффективностью и экономической безопасностью промышленных предприятий / Н. В. Грунтович [и др.] // Вестн. Чуваш. ун-та. – 2015. – № 3. – С. 40–48.
5. Грунтович, Н. В. Прогнозирование энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения при внедрении мероприятий по энергосбережению / Н. В. Грунтович, Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Энергоэффективность. – 2016. – № 1. – С. 44–48.
6. Грунтович, Н. В. О необходимости изучения структуры и закономерностей функционирования региональных систем газоснабжения / Н. В. Грунтович, Д. Р. Мороз, В. Е. Шалоник // Энергет. стратегия. – 2017. – № 1. – С. 42–46.
7. Развитие методического обеспечения для диагностирования энергетической эффективности / Н. В. Грунтович [и др.] // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 1 (94). – С. 8–13.
8. Использование методов математического моделирования для решения практических задач оценки энергоэффективности / Н. В. Грунтович [и др.] // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 3 (96). – С. 7–11.
9. Мороз, Д. Р. Региональная система газоснабжения с позиций системного анализа и закономерности ее функционирования / Д. Р. Мороз, Н. В. Грунтович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2018. – Т. 61, № 4. – С. 359–371. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-4-359-371
10. The study of structural fields of daily gas consumption of the balance groups of the regional gas supply system / D. Moroz [at al.] // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 178. – P. 01066. DOI: 10.1051/e3sconf/202017801066 HSTED-2020
11. Regularities of the formation of structural fields of daily gas consumption of the regional gas supply system / D. Moroz [at al.] // In E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 220. – P. 01076.
12. Using models of energy consumption from influencing factors to assess the current state and energy efficiency forecasting / D. Moroz [at al.] // In E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 220. – P. 01024.

СЕКЦИЯ 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 669

РЕШЕНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ВОПРОСОВ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ В СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЯХ ОКБ СУХОГО

А. А. Филатов, Ю. А. Попова, А. О. Акулинин

*Публичное акционерное общество «Объединенная авиастроительная
корпорация» ОКБ Сухого, г. Москва, Российская Федерация*

Приведены характерные примеры внедрения нескольких новых сплавов в конструкцию изделий авиационной техники ОКБ Сухого, а также примеры решения задач, возникающих при их использовании.

Ключевые слова: конструкционный материал, полуфабрикат, нормативная документация, авиационная техника.

SOLUTION OF KEY ISSUES OF THE USE OF METAL ALLOYS IN MODERN AND PROMISING PRODUCTS OF SUKHOI DESIGN BUREAU

A. A. Filatov, Y. A. Popova, A. O. Akulinin

*Public Joint Stock Company “United Aircraft Corporation”
Sukhoi Design Bureau, Moscow, Russian Federation*

The article provides typical examples of the introduction of several new alloys into the design of aircraft products of Sukhoi Design Bureau, as well as examples of solving problems that arise when using them.

Keywords: structural material, semi-finished product, normative documents, aviation technology.

Требования конструктора к материалам год от года становятся все более и более жесткими. Происходит непрерывный процесс разработки и внедрения новых сплавов, направленный на повышение их прочности, трещиностойкости, усталостных характеристик, жаропрочности, коррозионной стойкости и других функциональных свойств, необходимых для обеспечения высокого качества, надежности, ресурса современной авиационной техники (АТ).

Внедрение нового сплава – многолетний затратный и многоэтапный процесс, затрагивающий все стадии от создания композиции до использования полуфабриката в изделии: получение слитка с наследственным равноосным мелким зерном, отработка процесса деформации (ковка, прокатка, волочение, прессование), формообразование, термическая обработка, сварка, пайка, механическая обработка, гальваническая обработка, сборка, в том числе установка крепежа, контроль структуры и свойств на всех стадиях.

20 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

На каждом из вышеперечисленных этапов изготовления деталей из нового сплава неминуемо будут выявляться индивидуальные особенности, отличающие его от предшествующих аналогов. Выявление и учет этих особенностей есть предмет для тщательной работы технологов, результатом которой будет методика работы с материалом, оформленная в нормативную документацию: технические условия (ТУ) на материал и на отдельные типы полуфабрикатов; производственные инструкции (ПИ) на применение, сварку, термообработку, механическую обработку, неразрушающий контроль, гальванические покрытия, сборку; дополнения или изменения в выпущенной ранее документации и т. д.

Для успешного внедрения нового материала необходима слаженная командная работа института-разработчика сплава, металлургического завода, авиационного завода, технологического института и конструкторского бюро.

Внедрение хорошо освоенных в промышленности сплавов алюминия (с 40-х гг. XX в.), титана (с 60-х гг.), стали (с 40-х по 70-е гг.) с момента создания композиции сплава через выплавку опытно-промышленных партий до присвоения серийной литеры А по ГОСТ 2.103–68 требовало не одного десятилетия практической отработки технологии получения и применения полуфабрикатов.

Новый конструкционный материал можно считать полностью освоенным для серийного применения только при полном прохождении цикла его внедрения после полноценных ресурсных и статических испытаний на элементарных и конструкционно-подобных образцах. И даже после этого продолжают периодически «всплывать» технологические вопросы, связанные с применением этого материала. Они могут быть связаны со сменой оборудования на металлургических или авиационных предприятиях, возникшими возможностями оптимизации процесса изготовления продукции, новыми запросами от конструкторов по части расширения номенклатуры типов и размеров полуфабриката, расширения эксплуатационных условий, в которых применяется данный материал, внедрением новых технологических процессов производства и эксплуатации.

Приведем характерные примеры внедрения нескольких новых сплавов в конструкцию изделий АТ ОКБ Сухого ПАО «ОАК» (далее – ОКБ Сухого), а также задач, возникающих при их использовании.

Высокопрочная нержавеющая сталь аустенитно-мартенситного класса ВНС-65-Ш. Предложенный ФГУП «ВИАМ» НИЦ «Курчатовский институт» (далее – «ВИАМ») материал превосходил уже освоенную в промышленности сталь ВНС-5-Ш по прочности и вязкости разрушения.

Исследование опытно-промышленной партии полуфабрикатов из стали ВНС-65 началось в 2004 г. В 2009 г. была поставлена опытная партия полуфабриката.

Дальнейшие исследования проводились ОКБ Сухого совместно с «ВИАМ» и МЗ «Электросталь». При исследовании опытных поковок ВНС-65-Ш был выявлен ряд несовершенств, исправление которых потребовало дальнейшей работы над полуфабрикатом: дефекты металлургического происхождения: карбидные сетки и карбидные мешки, не растворяющиеся при корректировке режимов термообработки; занижение механических свойств по сравнению с заявленными в ТУ, качество поверхности полуфабриката, не позволявшее проводить неразрушающий контроль внутренних дефектов полуфабриката с требуемой точностью.

С проявлением карбидной сетки удалось справиться, увеличив степень укова при изготовлении поковки на металлургическом заводе с 3 до 23.

Также на металлургическом заводе был скорректирован способ выплавки слитка, несколько раз изменены режимы термообработки при изготовлении деталей как из поковок, так и из прутков. В ТУ были понижены минимальные механические свойства полуфабрикатов.

Всего с 2005 по 2016 г. было выпущено:

- 12 изменений к старому ТУ и выпущено новое ТУ на поковки;
- 13 изменений к ТУ на прутки;
- 3 изменения к ПИ на применение и термическую обработку материала.

В 2019 г. предпринятые меры позволили получать плавки, имеющие стабильную микроструктуру с отсутствием карбидной сетки.

В 2020 г. с целью исключения операции сварки был увеличен габаритный размер поковки из ВНС-65-Ш, что не исключает увеличение неравномерности свойств внутри полуфабриката. В данный момент специалисты ОКБ Сухого совместно с МЗ «Электросталь» и АО «Аквामаш» изучают поковки новых габаритов и следят за стабильностью свойств, структуры полуфабриката для уверенности в качестве деталей изделий АТ.

Работы по совершенствованию качества поковок стали ВНС-65-Ш продолжаются.

Высокопрочный двухфазный термоупрочняемый титановый сплав ВТ23.

В ОКБ Сухого этот сплав нашел применение в крупногабаритных сварных деталях, свариваемых в несколько этапов. Ранее этот двухфазный сплав не применялся в таких сложных сварных конструкциях, и для его успешного внедрения было необходимо решить ряд задач, связанных, в первую очередь, с выбором оптимального режима термообработки.

При выборе режимов и последовательности термообработки сварных конструкций необходимо было также учитывать возможности и ограничения, накладываемые имеющимся на авиационном заводе оборудованием, в частности, габариты вакуумных печей с контролируемой атмосферой.

Сплав ВТ23 относится к термически упрочняемым высокопрочным ($\alpha + \beta$)-титановым сплавам. Изменяя температуру нагрева и скорость охлаждения, можно получать широкий спектр структур, изменяя тем самым прочностные показатели сплава. При этом для крупногабаритных полуфабрикатов из ВТ23 характерно образование высоких макро- и микронапряжений, способных вызывать поводки, коробление и даже разрушение изделий. Также для этого сплава характерна высокая неоднородность структуры сварных соединений, негативно сказывающаяся на ресурсе сварных деталей.

При выборе режима термообработки было необходимо соблюсти баланс между термоупрочнением, снятием внутренних напряжений и выравниванием микроструктуры сварного шва и основного металла.

Проведена серия работ, в ходе которых определены режимы ТО, обеспечивающие оптимальные значения механических и ресурсных характеристик материала при минимальном уровне поволодок и внутренних напряжений.

Жаропрочный алюминиевый сплав 1151. Разработанный «ВИАМ» новый тип конструкционного жаропрочного алюминиевого сплава классической системы Al–Cu–Mg. Сплав 1151 имеет повышенную жаропрочность и пониженную чувствительность к концентраторам напряжений.

Из сплава производятся листовые полуфабрикаты толщиной до 5 мм, а также прессованные профили и поковки. В данный момент разрабатывается технология производства ковано-катаных плит толщиной до 80 мм.

22 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

Сплав представляет большой интерес для внедрения в конструкцию изделий АТ как материал для изготовления сварных деталей. ОКБ Сухого совместно с производственным предприятием «КнААЗ им. Ю. А. Гагарина» занималось отработкой режимов сварки сплава на имеющемся на серийном заводе оборудовании. В результате был отработан и успешно внедрен режим точечной сварки листового материала.

При внедрении деталей из сплава 1151, сваренных точечной сваркой, был решен ряд задач: проведена оценка технологичности и степень отработки технологического процесса точечной сварки алюминиевых сплавов, отработаны режимы точечной сварки на элементарных и конструктивно-подобных образцах, проведена оценка качества получаемых сварных соединений, исследованы макро- и микроструктура, определены прочностные и усталостные характеристики сварных соединений.

Из полуфабрикатов сплава 1151 в конструкцию изделий АТ были внедрены листы толщиной от 1,5 до 5 мм, подвергаемые формованию и свариваемые точечной сваркой. Они используются в отсеках, подвергаемых нагреву до 175 °С, в качестве замены титановому сплаву ОТ4-1, что позволило снизить вес конструкции.

Приведенные выше примеры – лишь небольшой фрагмент совместной работы института-разработчика сплава, завода-изготовителя полуфабриката и потребителя материала – конструкторского бюро и серийных заводов. Многоэтапность внедрения материала, своевременные корректировки как технологии получения полуфабрикатов, так и изменений в конструкторской документации (изменение конструкций или выбора режима обработки) явно демонстрирует необходимость придерживаться определенного алгоритма при внедрении нового материала. Процессы отработки режимов получения полуфабрикатов на металлургических заводах, грамотное проектирование с учетом выбора полуфабриката и проверка его на технологическую пригодность (механическая обработка, установка крепежа, сварка, пайка и т. д.) – все эти процессы для эффективности внедрения в конструкцию должны быть не растянуты во времени, а запараллелены.

УДК 621.92

МОРФОЛОГИЯ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИОБИЯ ПРИ ВРЕЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

В. А. Носенко, В. Г. Карпов, Л. Л. Кременецкий

Волжский политехнический институт (филиал)

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Российская Федерация

Морфология обработанной поверхности сплава на основе ниобия свидетельствует об интенсивном адгезионном взаимодействии металла с абразивным материалом при врезном шлифовании. Установлен факт переноса продуктов износа шлифовального круга на обработанную поверхность и внедрения в металл. На основании полученных данных о химическом составе продуктов износа экспериментально доказано присутствие на обработанной поверхности кристаллов карбида кремния, керамической связки и их сочетаний.

Ключевые слова: ниобий, шлифование, карбид кремния, морфология, химический состав, рентгеноспектральный микроанализ.

THE MORPHOLOGY AND CHEMICAL COMPOSITION OF THE MACHINED SURFACE OF NIOBIUM-BASED ALLOY AT INFEEED GRINDING

V. A. Nosenko, V. G. Karpov, L. L. Kremenetskii

*Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State
Technical University, Russian Federation*

The morphology of the machined surface of niobium-based alloy indicates an intense adhesive interaction between the metal and the abrasive material at infeed grinding. The transfer of tool wear of grinding wheel to the machined surface and penetration into metal has been established. Based on the obtained data on the chemical composition of tool wear, the presence of silicon carbide crystals, a ceramic bond, and their combinations on the machined surface has been experimentally proven.

Keywords: niobium, grinding, silicon carbide, morphology, chemical composition, X-ray microanalysis.

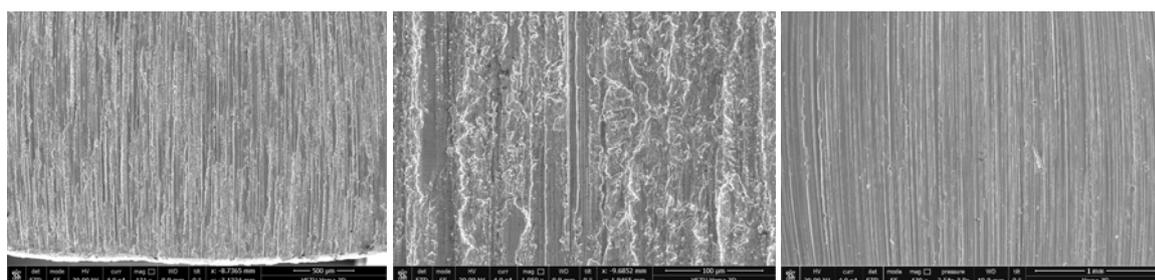
Жаропрочные сплавы на основе ниобия используются в авиационных реактивных двигателях для изготовления дисков и неохлаждаемых турбинных лопаток. В связи с этим к качеству обработанной поверхности изделий из сплавов на основе ниобия предъявляются высокие требования [1, 2]. Шлифование относится к числу финишных операций, во многом определяющих качество поверхности изделия, что свидетельствует об актуальности исследования данного процесса.

С использованием последних мировых достижений в области контроля качества обработанной поверхности доказано, что осколки кристаллов или зерен, вырванных из связки шлифовального круга, способны переноситься на обработанную поверхность [3]. Перенос абразивного материала происходит при шлифовании различных металлов кругами из карбида кремния, корунда [4, 5]. Менее изучен перенос материалов при шлифовании сплавов на основе ниобия.

Цель работы – исследование морфологии и химического состава поверхности ниобия после шлифования абразивным инструментом из карбида кремния.

Методика исследования. Морфологию и химический состав обработанной поверхности исследовали на электронном микроскопе «Versa 3D DualBeam». Заготовки из ниобиевого сплава обрабатывали на прецизионном плоскошлифовальном станке с ЧПУ модели CHEVALIER Smart – B1224 III. Шлифование осуществляли методом врезной подачи кругом из карбида кремния 1 350 × 20 × 127 64C F60 K 7V на керамической связке с охлаждением. Режим обработки: v – 35 м/с; v_s – 12 м/мин; S_t – 0,010 мм/ход, без выхаживания; припуск – 0,5 мм.

Результаты исследований и обсуждение. Обработанная поверхность при шлифовании является результатом царапания большого количества вершин зерен, расположенных на рабочей поверхности абразивного инструмента. Показана обработанная поверхность на последнем проходе со стороны выхода шлифовального круга (рис. 1, а). На поверхности можно выделить отдельные царапины. При базовом увеличении 1050 крат относительно чистые царапины, на которых различимы микронеровности вершины зерна, встречаются редко (рис. 1, б). Состояние поверхности сплава после шлифования кругом из карбида кремния свидетельствует о достаточно интенсивном адгезионном взаимодействии металла с абразивным инструментом из карбида кремния. Для сравнения, при шлифовании сплава никеля кругом из кубического нитрида бора обработанная поверхность достаточно чистая, царапины на поверхности никеля хорошо различимы, что свидетельствует о низкой интенсивности адгезионного взаимодействия (рис. 1, в).



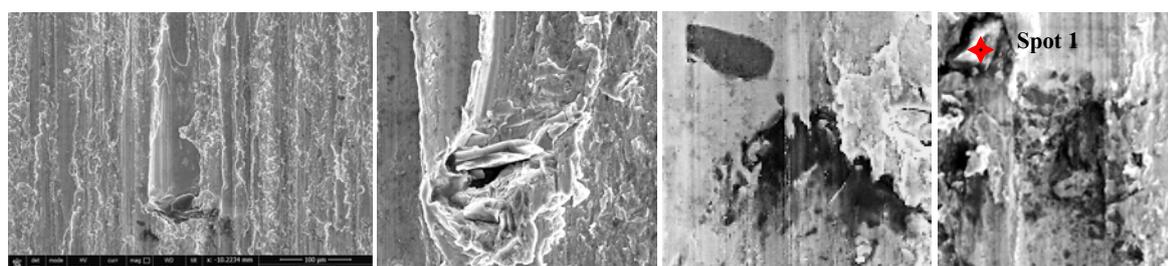
a)

б)

в)

Рис. 1. Состояние обработанной поверхности сплава на основе ниобия после шлифования кругом из карбида кремния при базовом увеличении 131 крат (а) и 1050 крат (б) и никелевого сплава при шлифовании кругом из кубического нитрида бора (в)

Предполагаемыми продуктами износа шлифовального круга из карбида кремния на керамической связке могут быть кристаллы карбида кремния, керамической связки и их сочетание. Получены фотографии предполагаемых продуктов износа абразивного инструмента, обнаруженные на обработанной поверхности. Продукты износа частично или полностью вдавлены в металл (рис. 2).



a)

б)

в)

г)

Рис. 2. Перенос материала абразивного инструмента на обработанную поверхность

Скалывание вершины абразивного материала или вырывание зерна из связки круга может происходить в момент царапания вершиной зерна (рис. 2, а). Размер объекта по горизонтали (направление, перпендикулярное скорости главного движения) около – 70 мкм. При скалывании вершины зерна или вырывании зерна из связки возможно изменение первоначальной траектории главного движения (рис. 2, б). Размер отдельных объектов может приближаться к среднему размеру зерна шлифовального круга. На рис. 2, а в правой и левой частях относительно траектории главного движения видны более мелкие вкрапления размером от 10 до 1 мкм и менее (рис. 2, в, г).

Похожее состояние поверхности показано на рис. 3, а. Рентгенограммы трех анализируемых объектов в точках Spot 1, Spot 2 и Spot 3 приведены на рис. 3, б–в.

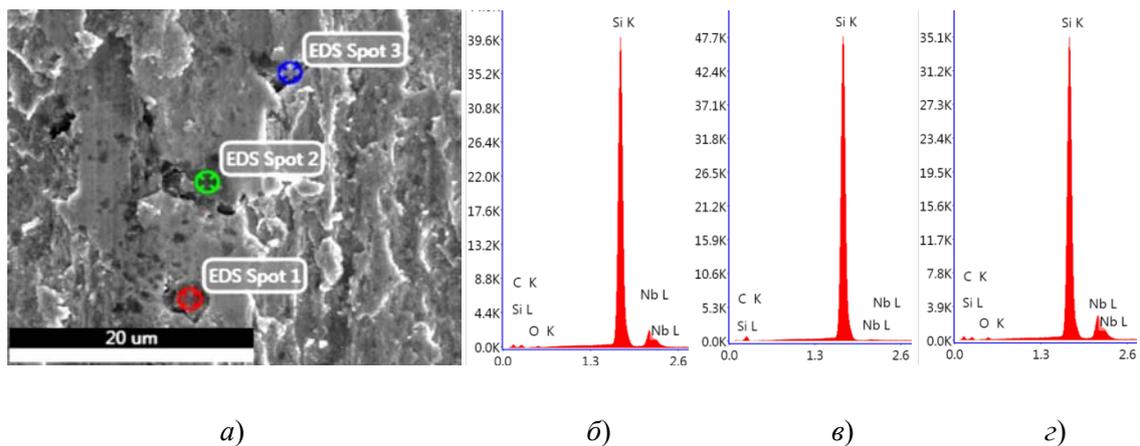


Рис. 3. Морфология обработанной поверхности с инородными объектами внедрения (а) и рентгенограммы в трех точках объектов Spot 1 (б), Spot 2 (в) и Spot 3 (г)

В точке Spot 2 присутствуют два основных химических элемента – кремний и углерод в количестве соответственно 50,1 и 49,7 атомарных процентов, что соответствует химической формуле карбида кремния (SiC). На поверхности кристалла обнаружены также следы ниобия. Химический состав в точке Spot 3 содержит четыре основных химических элемента: углерод, кремний, кислород и ниобий. Содержание атомов углерода – около 35 %, кремния – около 55 %. Если ориентироваться на химическую формулу SiC, в веществе содержится избыточный кремний. Наличие кислорода и избыточного кремния возможно в результате присутствия в анализируемом объеме некоторого количества связки. В точке Spot 1 содержатся следующие химические элементы: кислород, кремний, алюминий, калий, натрий и кальций. Концентрация перечисленных химических элементов согласуется со средней концентрацией аналогичных химических элементов в керамической связке K10 [6].

Морфология обработанной поверхности ниобиевого сплава после шлифования кругом из карбида кремния на керамической связке свидетельствует о интенсивном адгезионно-когезионном взаимодействии инструмента и обрабатываемого материала. Происходит перенос продуктов износа абразивного инструмента на обработанную поверхность. На основе рентгеноспектрального анализа установлено, что продуктами износа абразивного инструмента являются кристаллы абразивного материала (карбид кремния), керамическая связка и их сочетание.

Литература

1. Caron, P. French Research and Development Activities on High-Performance Superalloys for Gas Turbine Components / P. Caron // Materials Science Forum. – 2007. – Vol. 546–549. – P. 1179–1186. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.546-549.1179
2. Зеликман, А. Н. Металлургия редких металлов : учебник / А. Н. Зеликман, Б. Г. Коршунов. – М. : Metallurgy, 1991. – 432 с.
3. Носенко, С. В. Рельеф и химический состав поверхности титанового сплава при черновом шлифовании / С. В. Носенко, В. А. Носенко, Л. Л. Кременецкий // Гл. механик. – 2016. – № 4. – С. 66–69.
4. Nosenko, V. A. Transfer of Cubic Boron Nitride Grinding Wheel Wear Products to the Nickel Alloy Surface / V. A. Nosenko, A. V. Fetisov, S. P. Kuznetsov // MATEC Web of Conf. – 2020. – Vol. 329. – P 8. DOI: 10.1051/mateconf/202032903050

26 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

5. Nosenko, V. A. Morphology and Chemical Composition of Silicon Carbide Surfaces Interacting with Iron, Cobalt, and Nickel in Microscratching / V. A. Nosenko, A. V. Fetisov, V. Ye. Puzyrkova // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 363–368. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.284.363
6. Гаршин, А. П. Абразивные материалы и инструменты. Технология производства / А. П. Гаршин, С. М. Федотова ; под общей ред. А. П. Гаршина. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 1010 с.

УДК 681.7.023.72

ПРОГРЕССИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИНЗ С ТОНКИМ ЦЕНТРОМ

Л. Д. Мальпика, А. С. Козерук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Приведен анализ состояния технологии обработки линз для оптических приборов. Рассмотрена кинематическая схема устройства для одновременной двусторонней обработки линз с тонким центром. Выполнено математическое моделирование процесса абразивной обработки линз по методу свободного притирания и проведены численные исследования этой обработки.

Ключевые слова: линза, локальные погрешности, двусторонняя обработка, устройство, численное исследование.

PROGRESSIVE TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING LENSES WITH A FINE CENTER FOR OPTICAL INSTRUMENTS

L. Y. Malpica, A. S. Kozeruk

Belarusian National Technical University, Minsk

An analysis of the state of technology for processing lenses for optical devices is given. The kinematic scheme of the device for simultaneous two-sided processing of lenses with a thin center is considered. Mathematical modeling of the process of abrasive processing of lenses using the method of free rubbing was carried out and numerical studies of this processing were carried out.

Keywords: lens, local errors, two-sided processing, device, numerical study.

Одной из проблем современного оптического приборостроения является изготовление маложестких линз (с относительной толщиной 0,03 и менее) с высокими требованиями к их геометрической форме [1]. По существующей технологии односторонней обработки (шлифования и полирования абразивной суспензией по методу свободного притирания инструментом в виде гриба или чашки) как в Республике Беларусь и странах ближнего зарубежья, так и в странах дальнего зарубежья заготовки этих линз поочередно закрепляют одной из рабочих поверхностей на клеочное приспособление смолой и обрабатывают вторую ее поверхность. Такое закрепление требует нагрева клеочного инструмента, смолы и заготовки, при остывании которых из-за различных температурных коэффициентов линейного расширения материалов возникают напряжения в стекле. После снятия линзы с клеочного приспособления эти напряжения релаксируют, в результате чего происходит ухудшение качества детали в виде нарушения заданной точности радиуса кривизны обработанной поверхности (макропогрешность), которая проявляется в отклонении ее стрелки прогиба от номинального значения в пределах $\pm 0,0015$ мм и в локальном деформировании этой поверхности (микропогрешность) в среднем на $\pm 0,0004$ мм. Для уменьшения отме-

ченных погрешностей между линзой и наклеенной смолой помещают бумажные прокладки диаметром $1/3$ диаметра детали, уменьшая тем самым площадь контакта наклеенного вещества с поверхностью последней, что способствует снижению ее деформации. Однако рассматриваемый тип линз (с тонким центром) для оптических приборов специального назначения подвергают дополнительной доводке на одношпиндельном ножном станке (в Беларуси и странах ближнего зарубежья), перемещая линзу по инструменту вручную. Операция трудоемкая, поскольку сказывается градиент деформации линзы, обусловленный неравномерным температурным полем от рук исполнителя. В странах дальнего зарубежья окончательную доводочную операцию прецизионных линз выполняют дорогостоящим магнитореологическим полированием.

Проблемами существующей технологии получения прецизионных линз малой жесткости являются также значительные затраты времени на процесс их формообразования (в среднем 4 ч на одну сторону) и на выявление рациональных режимов этого процесса с учетом неравномерного распределения припуска на обработку. Данные режимы в настоящее время определяет экспериментально рабочий-оптик, исходя из своего опыта и интуиции [2].

В связи с отмеченным выше цель настоящего исследования заключается в разработке технологии одновременной двусторонней абразивной обработки линз малой жесткости, исключающей их крепление смолой за исполнительные поверхности и обеспечивающей уменьшение макро- и микропогрешностей соответственно до $\pm 0,0008$ и $\pm 0,00015$ мм, а также снижение затрат времени, по меньшей мере, в два раза на операции шлифования и полирования, что является актуальной научно-технической задачей, решение которой важно для оптического приборостроения.

Методика проведения исследований. Отмеченные проблемы оптического приборостроения могут быть решены в случае использования технологии одновременной двусторонней обработки оптических деталей со сферическими поверхностями. Для ее реализации предлагается устройство, кинематическая схема которого представлена на рис. 1.

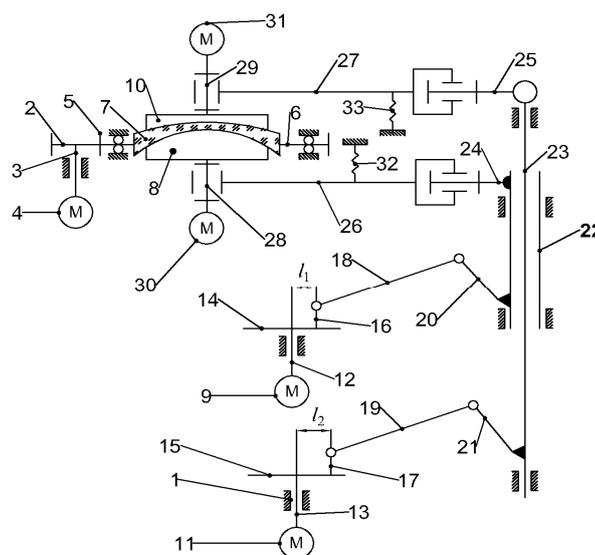


Рис. 1. Кинематическая схема устройства для двусторонней обработки оптических деталей со сферическими поверхностями

28 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

При использовании данного устройства заготовку оптической детали со сферическими поверхностями 7 жестко фиксируют в оправке 6 и вместе с последней устанавливают ее между инструментами 8 и 10. Далее последовательно включают электродвигатели 4, 30, 31, 9 и 11. Вращательный момент электродвигателя 4 через ось 3, зубчатую пару 2–5 и оправку 6 вызывает вращение заготовки 7, а вращательный момент электродвигателей 30 и 31 через ось 28 и 29 сообщает вращение инструментам 8 и 10.

Вращательный момент электродвигателей 9 и 11 через оси 12 и 13, диски 14 и 15, стойки 16 и 17, звенья 18 и 19, кронштейны 20 и 21, вал 22 и 23, рычаги 24 и 25, подвижные части рычагов 26 и 27, оси инструментов 28 и 29 вызывают колебательное перемещение инструментов по поверхностям заготовки 7. Для прижима инструментов к обрабатываемым поверхностям детали используются пружины 32 и 33.

Для выявления наиболее выгодных режимов обработки высокоточных линз на предлагаемом технологическом оборудовании выполнено математическое моделирование процесса абразивной обработки линз по методу свободного притирания. В основу моделирования положена гипотеза Ф. Престона, согласно которой срабатывание заготовки детали в произвольной точке определяется соотношением

$$U_d = ck_d \int_0^t v_d p_d dt,$$

где c – коэффициент пропорциональности, зависящий от условий обработки; k_d – коэффициент износостойкости притирающихся материалов; v_d и p_d – линейная скорость движения детали относительно инструмента и давление в зоне их контакта соответственно; t – время обработки.

Для определения скорости скольжения необходимо учитывать линейные скорости всех движений, совершаемых деталью и инструментом.

Полученные результаты. Расчет величины съема материала, пропорциональной параметру $Q = \nu p$, проводили в опорных точках диаметрального сечения обрабатываемой поверхности линзы. При этом использовали линзу типа «отрицательный мениск» с $R_1 = 120,85$ мм, $d_1 = 100$ мм (выпуклая поверхность) и $R_2 = 50,34$ мм, $d_2 = 80$ мм (вогнутая поверхность).

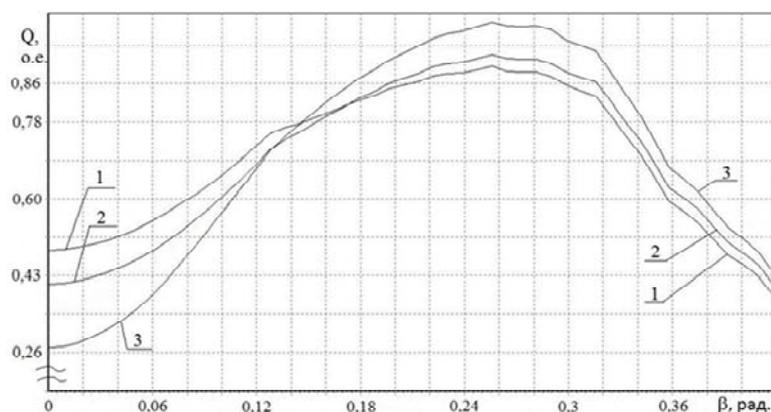


Рис. 2. Зависимость параметра Q от изменений $v_d = 7,0 \text{ с}^{-1}$ (1), $8,0 \text{ с}^{-1}$ (2) и $8,6 \text{ с}^{-1}$ (3) при $v_n/v_d = 0,7$, $v_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50$ мм, $d_n = 80$ мм

Расчет Q при изменении ν_n (частота вращения линзы) от 7,0 до 8,6 с^{-1} при постоянных значениях $\nu_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$ (частота возвратно-вращательного движения инструмента по обрабатываемой поверхности), $L = 50 \text{ мм}$ (амплитуда возвратно-вращательного перемещения инструмента), $d_n = 80 \text{ мм}$ (диаметр инструмента), $\nu_n / \nu_n = 0,7$ (ν_n – частота, с которой вращается инструмент), приведены на рис. 2, где β – угол раствора линзы. Из полученных результатов следует, что если назначить частоту вращения детали 8,0 с^{-1} , то будет происходить равномерная обработка детали (кривая 2). Такой режим назначают на стадии выхаживания, когда достигнуто требуемое значение радиуса кривизны обрабатываемой поверхности линзы и необходимо обеспечить ее заданную чистоту. Если же требуется организовать преимущественную обработку по краю линзы или в ее центре, то необходимо принимать частоту вращения линзы 8,6 и 7,0 с^{-1} соответственно, что отображено кривыми 3 и 1 на обсуждаемом рисунке.

Л и т е р а т у р а

1. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 368 с.
2. Lens production enhancement by adoption of artificial influence functions and a knowledge based system in a magnetorheological finishing process / E. Pitschkeab [et al.] // Optical Manufacturing and Testing VII, SPIE. – 2007. – Vol. 6671. – P. 66711J.

УДК 621.771

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ НА СТРУКТУРУ МЕТАЛЛА

К. С. Горбунов, А. И. Позднякова, И. П. Мазур

*Липецкий государственный технический университет,
Российская Федерация*

Рассмотрено влияние скоростной асимметрии на структуру электротехнической стали. Проведено исследование на лабораторном стане с уникальными характеристиками двигателей.

Ключевые слова: асимметричная прокатка, стан, деформация, скорость, структура, сталь.

THE EFFECT OF VELOCITY ASYMMETRY ON THE METAL STRUCTURE

K. S. Gorbunov, A.I. Pozdnyakova, I. P. Mazur

Lipetsk State Technical University, Russian Federation

In this paper, the influence of velocity asymmetry on the structure of electrical steel is considered. This study was conducted on a laboratory mill with unique engine characteristics.

Keywords: asymmetric rolling, mill, deformation, speed, structure, steel.

Сегодня для удовлетворения потребностей различных отраслей промышленности от металлургов требуют новых решений по производству металлопроката с уникальным набором свойств. И если для их получения на дискретных изделиях этот вопрос решается термической обработкой, угловым прессованием и др., то для про-

30 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

изводства длинномерной продукции технологии, которые, например, могут обеспечить получение уникальной ультрамелкозернистой структуры, находятся в стадии разработки и освоения [1].

Асимметричная прокатка – одна из перспективных технологий, обладающая большим потенциалом и эффективностью для производства листов с ультрамелкозернистой структурой.

Если рассматривать классификацию асимметричной прокатки, то можно выделить следующие аспекты, определяющие асимметрию [2]:

- 1) неоднородность температуры по сечению полосы;
- 2) разность коэффициента трения на верхнем и нижнем рабочем валке;
- 3) разные диаметры рабочих валков;
- 4) разная окружная скорость рабочих валков.

В данной работе было выполнено исследование процесса асимметричной прокатки с использованием различных скоростей валков на уникальном лабораторном реверсивном стане ДУО листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков в лаборатории МГТУ им. Г. И. Носова «Механика градиентных наноматериалов имени А. П. Жилиева» (рис. 1).



Рис. 1. Реверсивный стан ДУО листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков

Образцы из электротехнической стали размером $15 \times 15 \times 150$ мм нагревались в муфельной печи до температуры 1000°C . Первый образец после нагрева в печи моментально закаливался для исходной структуры перед прокаткой. Другие нагретые образцы прокатывались с разной скоростью валков – $10 : 10$ (симметричный способ, контрольная прокатка), $2 : 10$ – с суммарным обжатием 80 %. После прокатки образцы закалялись для фиксации структуры (рис. 2). Прокатанные образцы исследовались на сканирующем электронном микроскопе (SciosII, EBSD BRUKER, eFlash) и оптически инвертированном металлографическом микроскопе (Leica) [3–5].

Металлографский анализ образцов, прокатанных асимметричным способом ($2 : 10$) с суммарным обжатием 80 %, показал, что в процессе прокатки удалось получить ультрамелкозернистую структуру размером менее 5 мкм в отличие от контрольной прокатки без асимметрии. На рис. 3 представлено сравнение структуры образцов после симметричной ($10 : 10$) и асимметричной прокатки ($2 : 10$).



Рис. 2. Образец после асимметричной прокатки 2 : 10

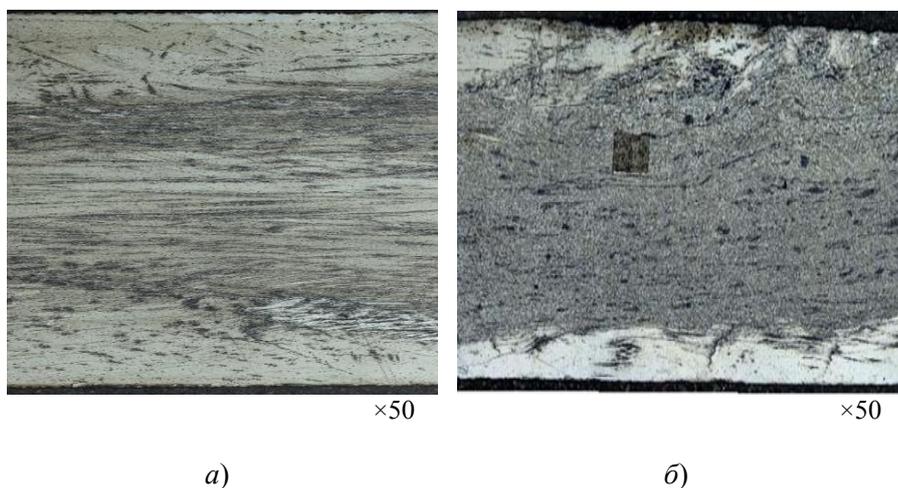


Рис. 3. Структура образцов после симметричной (а), асимметричной (б) прокатки ($\epsilon = 80\%$)

Проведенные исследования показали, что за счет скоростной асимметрии можно обеспечить получение ультрамелкозернистой структуры.

Литература

1. Of the rheological properties of steel in the plate rolling process conditions / A. Kawalek, H. Duja, K. V. Ozhmegov // *Cis Iron and Steel Review*. – 2020. – Vol. 19. – P. 37–43.
2. Горбунов, К. С. Преимущества асимметричной прокатки / К. С. Горбунов // Школа молодых ученых по проблемам технических наук : материалы обл. профил. семинара, Липецк, 2020 г. / Липец. гос. пед. ун-т. – Липецк, 2020. – С. 47–49.
3. Мухин, Ю. А. Влияние деформационно-скоростного режима горячей прокатки в чистовой группе широкополосных станов на структуру стали марки Ст3 / Ю. А. Мухин, В. Н. Соловьев, Е. Б. Бобков // *Черные металлы*. – 2018. – № 11 (1043). – С. 12–15.
4. Коновалов, Ю. В. Справочник прокатчика : в 2 кн. / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – Кн. 1. Пр-во горячекатаных листов и полос. – 640 с.
5. Салганик, В. М. Асимметричная тонколистовая прокатка: развитие теории, технологии и новые решения : учеб. пособие для вузов / В. М. Салганик, А. М. Песин. – М. : МИСИС, 1997. – 191 с.

ФОРМИРОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ БОКОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СМЕННЫХ МНОГОГРАННЫХ ПЛАСТИН

М. И. Михайлов, З. Я. Шабакеева

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Приведены результаты статистических исследований контурных площадей касания боковых поверхностей сменных многогранных пластин, применяемых в конструкциях сборных режущих инструментов. Разработаны формы виртуальных площадей касания боковых граней пластин с заданной вероятностью, позволяющие производить моделирование работоспособности инструментов.

Ключевые слова: сборные инструменты, работоспособность, расчетные модели, сменные многогранные пластины, боковые поверхности.

FORMATION OF CALCULATION MODELS OF SIDE SURFACES OF REPLACEABLE POLYHEDRAL PLATES

M. I. Mikhailov, Z. Ya. Shabakaeva

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The results of statistical studies of the contour areas of contact with the side surfaces of replaceable polyhedral plates used in the construction of prefabricated cutting tools are presented. The forms of virtual areas of contact of the side faces of the plates with a given probability are developed, which allow modeling the performance of tools.

Keywords: prefabricated tools, working capacity, computational models, replaceable polyhedral plates, side surfaces.

Повышение качества обработки в машиностроении в значительной степени определяется работоспособностью металлорежущего инструмента. В условиях современного производства более широко используется сборный режущий инструмент. Основные показатели сборных резцов зависят от характера системы крепления сменных многогранных пластин (СМП), которая в значительной мере обусловлена условиями контакта между режущей пластиной и корпусом инструмента. На условия контакта значительно влияют геометрические параметры боковых граней пластины, в частности, площади касания. Для изучения данного параметра исследовались пластины двух форм: 01176404 (трехгранные – партия I) и 1-0171405 (пятигранные – партия II).

Расчетные модели боковых поверхностей СМП получали поэтапно.

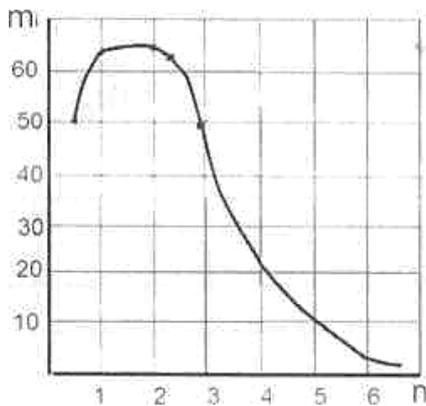
На первом этапе измеряли контурные площади касания, которые формировались между гранями пластины и контрольным образцом (эталоном). В качестве образца использовали пластину из зеркального стекла, эталонными плоскостями в которой служили ее шлифованные и полированные грани. Для упрощения анализа контурных площадей касания и сопоставления получаемых результатов использовали относительную контурную площадь касания, которую определи соотношением: $S_{ij} = S_{дij} / S_{ни}$, где S_{ij} , $S_{дij}$ – соответственно относительная и действительная площади касания i -й грани j -й пластины; $S_{ни}$ – номинальная площадь касания i -й грани.

Полученные данные обрабатывались с использованием статистических методов. По полученным данным строили усредненные кривые распределения относительной контурной площади касания боковых граней пластин (рис. 1).

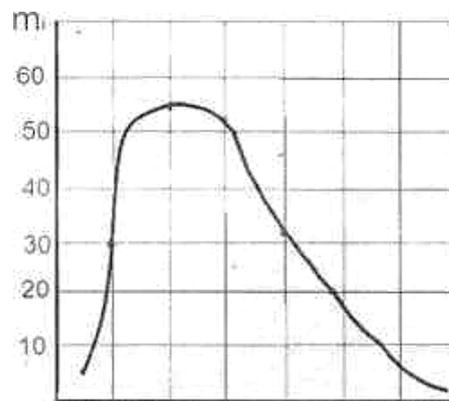
При сравнении эмпирических и теоретических значений по критерию Пирсона установили, что в основном все результаты согласуются с теоретическими кривыми нормального распределения с $\alpha = 0,05$ (см. таблицу).

Анализ результатов измерений контурных площадей касания

Номер партии	\bar{x} , ед.	σ , ед.	ν	S		$\frac{ t }{\sigma_t}$		Закон распределения
I	0,0585	0,03298	0,5636	0,025	0,0109	62,4	0,568	$f(\tau) = \frac{1}{0,03298\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-0,0585)^2}{0,21753}\right]$
II	0,0819	0,0565	0,6890	0,0245	—	62,4	—	$f(\tau) = \frac{1}{0,0565\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-0,0819)^2}{0,63845}\right]$



а)



б)

Рис. 1. Кривые распределения контурной площади касания боковых граней:

а – трехгранных пластин; б – пятигранных пластин

Из сравнения средних значений по критериям Стьюдента и Романовского, характеризующих различные партии, можно заключить, что грани партии трехгранных пластин являются более благоприятными с точки зрения стабильности по сравнению с боковыми гранями пятигранных пластин.

На втором этапе формировали контурные площади касания боковых граней по расчетным площадям касания боковых граней пластин с «эталонной плоскостью» с различной вероятностью. Каждая грань условно разделялась на области номинальной площадью 1 мм². Затем контурные площади касания в этих областях разделялись на статистические интервалы, в которых определялось расположение пятна контакта с заданной вероятностью, которые наносились на трафареты, отражающие грани СМП.

Полученные результаты представлены на рис. 2.

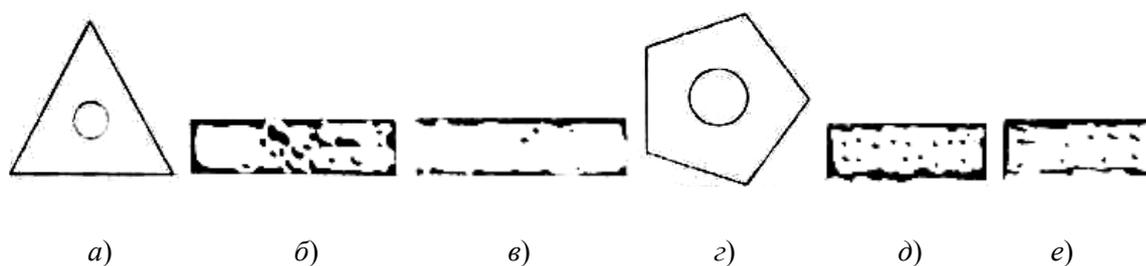


Рис. 2. Расчетные площади касания боковых граней пластин с заданной вероятностью:
 а, з – формы пластин; б, д – площади с вероятностью 0,1;
 в, е – площади с вероятностью 0,5

Анализ расчетных значений контурных площадей касания боковых граней пластин позволяет сделать вывод, что они отличаются от номинальных и составляют в среднем 32,9 % и не превышают 51 % – у трехгранных пластин, 23,4 и 37,3 % – у пятигранных пластин соответственно.

Для более полного представления состояния поверхности боковых граней СМП проведен их микроскопический анализ. На рис. 3 представлена микрофотография с увеличением в 500 раз. На приведенной фотографии можно видеть, что поверхность боковой грани имеет неравномерную топографию. Наблюдаются углубления больших размеров на фотографии в виде темных пятен. Картина поверхности подтверждает ранее полученные данные по исследованию площадей опорных граней пластин. На поверхности боковой грани пластины имеются углубления, которые наблюдаются и вблизи режущих кромок, где контакт пластины с поверхностью державки резца особо влияет на жесткость инструмента.

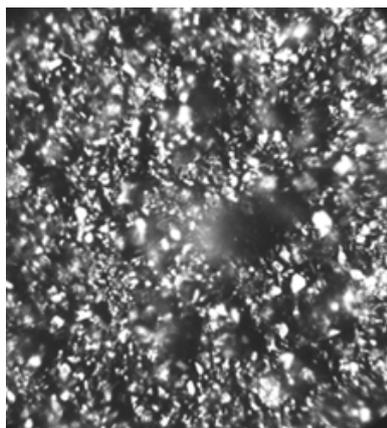


Рис. 3. Микроструктура боковой грани поверхности сменных многогранных пластин, $\times 500$

Анализ полученных результатов позволил установить недостатки технологии изготовления сменных многогранных пластин и сформировать расчетные модели боковых граней для использования их в статических расчетах сборных инструментов.

Литература

1. Михайлов, М. И. Исследование геометрических параметров базовых граней сменных многогранных пластин / М. И. Михайлов, З. Я. Шабакаева // *Материалы, технологии, инструмент.* – 2006. – № 3. – С. 84–87.
2. Михайлов, М. И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: Ресурсосберегающие модели и конструкции / М. И. Михайлов ; под ред. Ю. М. Плескачевского. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 339 с.

УДК 699.81:678.073

**СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ПОЖАРООПАСНОСТИ
НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ В 3D-ТЕХНОЛОГИЯХ**

С. Н. Бобрышева

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Показана возможность снижения пожароопасности полимерных материалов, получивших широкое распространение при изготовлении изделий с использованием 3D-технологий. Обоснован выбор неорганических антипиренов и показана их эффективность в составе полимеров. Для оценки горючести полимерных материалов применяется разработанный комплексный показатель, позволяющий найти количественные соотношения компонентов, связывающие качественные показатели пожарной опасности полимеров. Подобие принципов переработки полимеров традиционными литьевыми, экструзионными технологиями позволяет использовать полученные результаты и в FDM технологиях 3D-печати.

Ключевые слова: полимерные материалы, антипирены, 3D-технологии, горючесть, пожароопасность.

**A METHOD OF REDUCING THE MOST COMMON POLYMER
MATERIALS' FIRE HAZARD IN 3D TECHNOLOGIES**

S. N. Bobrusheva

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The article focuses on polymer materials that have become widespread in manufacturing products by means of 3D technologies and the possibility of reducing their fire hazard. The choice of inorganic flame retardants is justified and their effectiveness in the composition of polymers is shown. In order to evaluate the combustibility of polymers, a developed complex indicator is used allowing to find quantitative components ratios that link qualitative indicators of polymer materials fire hazard. The similarity of the principles related to polymers recycling by traditional injection moulding and extrusion technologies allows the obtained results to be applied in FDM 3D printing technologies.

Keywords: polymer materials, flame retardants, 3D technologies, combustibility, fire hazard.

К настоящему времени наработан широкий ассортимент пластиков, перерабатываемых с использованием 3D-технологий в изделия различного назначения. Более 20 наименований выпускаются в виде филаментов и гранулятов. Стремительно развивается рынок композитов на их основе. Поэтому выбор подходящего материала не представляет никакой трудности.

Наиболее популярными, простыми и отработанными из аддитивных технологий, использующих эти полимеры, являются FDM (Fused Deposition Modeling) тех-

нологии 3D-печати. Тем не менее в процессе получения изделий необходимо учитывать пожароопасность используемых полимерных материалов. Полиэтилен, полилактид, АБС, полистирол являются горючими и будут оставаться горючими в силу своего происхождения. Однако горючесть можно снизить различными приемами. Один из таких приемов изложен в данной статье.

В исходном состоянии полимер находится в виде «стренг» (филамента, нити) или гранулята. Переработка материалов происходит в вязкопластичном, вязкотекучем состоянии, которое достигается при нагревании до температуры плавления. При этом выделяются газообразные продукты, способные воспламениться. Опасными факторами, сопровождающими как производство изделий из этих материалов, так и их эксплуатацию, являются не столько высокие температуры, сколько образование дыма и его токсичность. Существующие методы снижения горючести даже при высокой эффективности не являются универсальными, влияют на свойства материала либо являются источником токсичности уже другого рода. Вовлечение как традиционных полимерных материалов, так и появляющегося многообразия композитов специального назначения в новые технологии делает задачу снижения горючести этих материалов по-прежнему актуальной.

По мнению автора, доступным, прогнозируемым и относительно дешевым способом снижения горючести являлось бы применение неорганических антипиренов, реализующих в основном принцип разбавления горючего негорючим. Такие разработки существуют и новизна могла быть получена только в плане новых добавок – веществ. Однако работа в этом направлении выявила сопутствующие проблемы: совместимость полимера и добавки – антипирена; изменение свойств, прежде всего, реологических, что очень существенно влияет на технологический процесс переработки, а также механических свойств, однородность состава и структуры.

Основной задачей данного исследования являлась оптимизация состава, которая включала вариации соотношения «полимер – антипирен» для достижения максимального снижения горючести при сохранении (или, по крайней мере, не ухудшении) основных физико-химических, реологических, эксплуатационных свойств.

В работе исследовалась возможность применения в качестве антипиренов алюмосиликатов в виде таких минеральных ископаемых, как бентонитовые глины. К бентонитам относятся тонкодисперсные высокопластичные глины, основную роль в составе которых играет порообразующий минерал – монтмориллонит. Выбор был обусловлен несколькими факторами: высокие изначально дисперсность и поверхностная энергия вещества способствуют прививке функциональных групп, придающих ему необходимые свойства и совместимость с другими функциональными минералами: доступность, дешевизна, отсутствие токсичности и др.

Процесс получения антипирена включал следующие стадии:

- 1) диспергирование глины;
- 2) модифицирование;
- 3) сушку полученного порошка.

Одной из задач исследований явилось обеспечение совместимости полимера и антипирена. Так как полимер является гидрофобным, а антипирен гидрофильным, то для обеспечения их совместимости проводилось модифицирование антипирена различными гидрофобными составами (кремнийорганическими жидкостями, соапстоками жирных кислот и др.), совмещенное с диспергированием в планетарной мельнице. Результаты модифицирования показали не только достижение гидрофобности, но и увеличение дисперсности антипирена, что обусловлено поверхностно-

активным действием модификаторов. Экструзионные образцы полимеров (первичный и вторичный полиэтилен низкого давления) с разработанным антипиреном обладали однородной структурой, но необходимо отметить, что для обеспечения равномерности распределения антипирена в объеме полимера необходимо предварительное смешивание его с гранулятом или дозированное введение в расплав. Получение полимерных образцов традиционным способом – методом экструдирования на установке «Rheocord 90» фирмы «НААКЕ» (ФРГ) и дальнейшие испытания их механических свойств (INSTRON 5567) показали, что при введении эффективного количества антипирена (0,5–2 %) механические свойства улучшаются, что, видимо, обусловлено усиливающим действием дисперсной добавки [1].

Механизм снижения горючести такого рода антипиренами подробно не рассматривается в рамках данной публикации, а изложен в других работах автора [1, 2]. Данные материалы принято относить к инертным, т. е. они не оказывают существенного влияния на состав и количество продуктов пиролиза полимеров в газовой фазе и величину коксового остатка в условиях горения, однако они изменяют его теплофизические характеристики и условия тепло- и массообмена при горении (ультрачастицы антипирена являются физической преградой при распространении реакций горения).

Об эффективности разработанного антипирена судили по результатам испытаний на горючесть (приращению температуры и потере массы испытываемых образцов) с использованием стандартных методик при помощи прибора ОТМ, которые показали, что образец с добавками антипирена соответствует классу горючих трудновоспламеняемых материалов, в то время как без антипирена относился к классу горючих легковоспламеняемых материалов. Усиление действия антипиренов возможно при комплексном использовании их как матрицы для классических ингибиторов горения, применяющихся в составе огнетушащих порошков, например, аммофоса. Однако необходимо учитывать, что температура деструкции полимера, предшествующая воспламенению и горению, и температура антипирена должны быть близки.

Для оптимизации состава полимера с добавками антипирена с целью достижения максимального результата был разработан комплексный показатель горючести (КПГ), который включает параметры горения материала, которые по-разному меняют свои значения, отражая пожароопасность материала в целом. КПГ может быть применен при разработке новых антипиренов аналогичного механизма действия [2].

Аддитивная технология 3D-печати FDM основана на принципах традиционных литьевой и экструзионной технологий. Чаще всего материал в виде филамента (стренг, прутков, нити) или гранулята подается в нагревательный элемент, где доводится до вязкотекучего состояния и далее через сопло слоями выдавливается на подогреваемую платформу, повторяя форму изделия в соответствии с разработанной САД-моделью. Как в традиционных, так и в 3D-технологиях, в процессе нагревания макромолекулы полимеров легко распадаются на низкомолекулярные насыщенные и ненасыщенные углеводороды, которые вступают в экзотермические реакции окисления. Поэтому разработки антипиренов для полимеров, перерабатываемых экструзией и литьем под давлением, легко адаптировать для аддитивных технологий. Применяя FDM аддитивную технологию 3D-печати, необходимо учесть влияние добавок антипирена на реологические свойства полимера, адгезию слоев, усадку, изменение цвета. Результаты, полученные при исследовании образцов полимера с антипиреном, полученных экструзией, позволяют с большой долей достоверности прогнозировать снижение горючести, повышение прочности изделий и уменьшение усадки при применении FDM технологии.

Литература

1. Антипирены для строительных полимерных материалов / Д. Л. Подобед [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 4. – С. 5–10.
2. Бобрышева, С. Н. Применение метода дисперсионного анализа однофакторной математической модели для оптимизации состава полимеров с пониженной горючестью / С. Н. Бобрышева, Л. И. Буякевич, Д. Л. Подобед // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2019. – № 3. – С. 45–51.

УДК 621.225.7

**ПРИКЛАДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОСИСТЕМЫ
С КЛАПАННОЙ АДАПТАЦИЕЙ К НАГРУЗКЕ**

Е. В. Хазеев, Д. Л. Стасенко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Рассмотрены вопросы построения прикладного моделирования гидравлических систем с клапанной адаптацией к нагрузке при помощи программного пакета «AmeSim». Определено, что для прикладного моделирования с полным анализом работы гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке рационально применять данный программный пакет.

Ключевые слова: гидравлическая система, клапанная адаптация к нагрузке, прикладное моделирование.

**APPLIED MODELING OF THE HYDRAULIC SYSTEM
WITH VALVE ADAPTATION TO LOAD**

Y. V. Khazeyeu, D. L. Stasenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

In this paper, the issues of constructing applied modeling of hydraulic systems with valve adaptation to load using the "AmeSim" software package are considered. It is determined that it is rational to use this software package for applied modeling with a complete analysis of the operation of a hydraulic system with valve adaptation to load.

Keywords: hydraulic system, valve adaptation to load, applied modeling.

В настоящее время во многих мобильных машинах при работе используются гидравлические системы, работающие по принципу клапанной адаптации к нагрузке, в которых источником питания служит нерегулируемый насос. Данный тип гидравлических систем можно считать относительно простым, надежным и экономически эффективным [1].

Исследования, направленные на построение математических моделей данных систем, являются важнейшей задачей для получения точных значений параметров работы системы. В связи с этим выбор типа моделирования становится актуальной задачей. Построение математических моделей при помощи теоретического моделирования требует большого количества времени на проведение исследований, в то время как при использовании имитационного моделирования можно упростить решение задач регулирования, управления, статики, динамики, исходя из единых методических позиций гидравлических систем и объединить все исследования в одно ядро расчетного комплекса [2].

Целью настоящей работы является построение модели гидравлической системы с клапанной адаптацией к нагрузке при помощи прикладного моделирования, определение принципов работы данной системы и выявление ее достоинств и недостатков.

Для проведения прикладного моделирования использовался программный пакет «AmeSim». На начальном этапе работы в данной программе была построена принципиальная схема гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке (рис. 1) [2]. Описан принцип работы системы. После чего были заданы начальные параметры работы системы (см. таблицу) с последующей в автоматическом режиме эмуляцией с учетом указанных параметров. По окончании эмуляции исследуемой гидросистемы были получены основные зависимости величины расхода от величины давления (рис. 2), а также выведена диаграмма времени работы элементов гидросистемы (рис. 3).

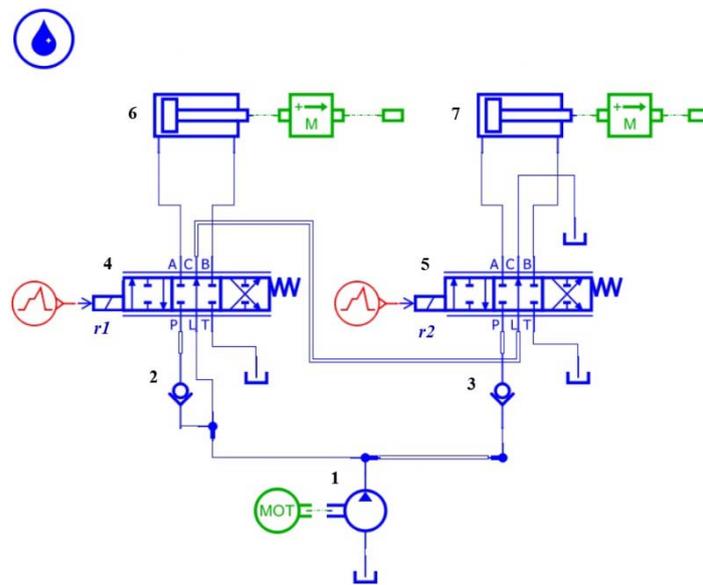


Рис. 1. Принципиальная схема гидравлической системы с клапанной адаптацией к нагрузке и нерегулируемым насосом:
 1 – нерегулируемый насос; 2, 3 – обратный клапан;
 4, 5 – распределитель; 6, 7 – цилиндр;
 r1, r2 – электромагнит распределителя

Принцип действия гидросистемы состоит в следующем: при срабатывании электромагнитов $r1$, $r2$ золотники распределителей 4, 5 смещаются в крайнее правое положение, таким образом через обратные клапаны 2, 3 рабочая жидкость от нерегулируемого насоса 1, проходя через каналы P распределителей, поступает в поршневые полости цилиндров 6, 7. При достижении заданных позиций штоками цилиндров 6, 7 срабатывают датчики положения (на рис. 1 не указаны) и электромагниты $r1$, $r2$ отключаются, золотники распределителей за счет пружин возвращаются в нейтральное положение. Поддержание постоянной величины перепада давления в системе происходит за счет дополнительных каналов в распределителях L , через которые рабочая жидкость сливается в бак, тем самым регулируя величину расхода в системе.

Значения основных параметров исследуемой гидросистемы

Наименование параметра	Значение параметра		
Максимальный рабочий объем насоса q_n , см ³	20		
Приведенная к штоку масса подвижных частей цилиндра m , кг	0,025		
Диаметр цилиндра $D_{ц}$, мм	25		
Плотность рабочей жидкости ρ , кг/м ³	1000		
Величина давления в системе p_{i1} , МПа	15	12	6

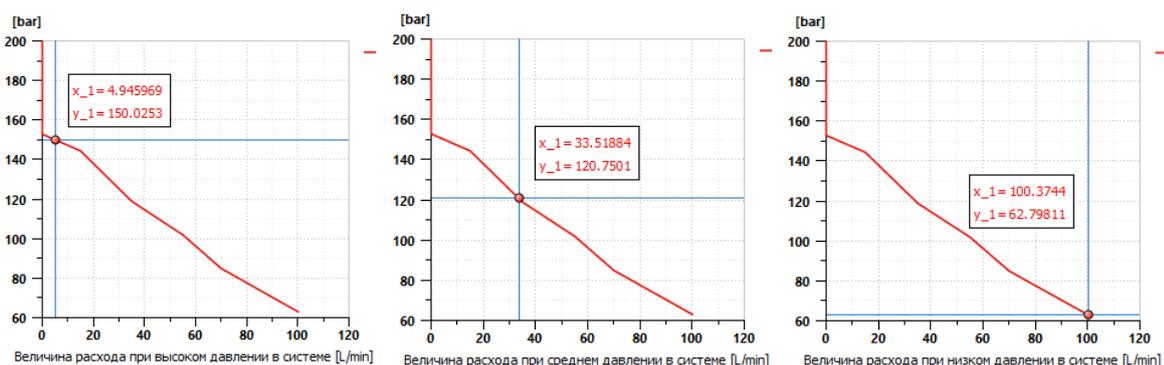


Рис. 2. График зависимости величины расхода от величины давления в системе

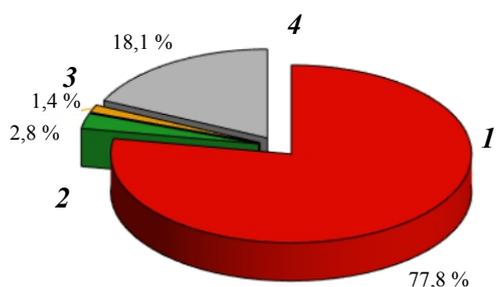


Рис. 3. Диаграмма времени работы элементов гидросистемы:
 1 – нерегулируемый насос; 2 – распределители;
 3 – обратные клапаны; 4 – цилиндр

После изучения результатов эмуляции исследуемой гидросистемы выяснилось, что в гидравлических системах с клапанной адаптацией к нагрузке уровень величины давления на одном потребителе может существенно влиять на величину скорости другого потребителя. Кроме того, величина расхода в исследуемой системе зависит не только от положения золотников распределителей, но и от величины давления нагрузки на потребителя. Данная особенность обеспечивает системе с клапанной адаптацией к нагрузке естественно высокое демпфирование, что способствует гашению колебаний. Чтобы повысить величину демпфирования в данном типе гидравлических систем, величина рабочего потока жидкости должна увеличиваться при увеличении перепада давления на распределителе и, наоборот, чтобы уменьшить величину демпфирования в системе, величина рабочего потока жидкости должна уменьшаться при падении величины перепада давления на распределителе. Данная

особенность дает возможность преодолевать большие инерционными нагрузками, что позволяет использовать гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке в мобильных машинах по типу мобильного крана [3].

В результате проделанной работы была построена прикладная модель гидравлической системы с клапанной адаптацией к нагрузке в среде «*AmeSim*». Анализ диаграммы времени работы элементов гидросистемы показал, что насос работает практически постоянно, а наименее нагруженными элементами системы являются обратные клапаны. Анализ значений зависимости расхода от давления в системе показал, что оба параметра изменяются пропорционально. Таким образом, полученная имитационная модель гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке может использоваться для дальнейших исследований, направленных на определение оптимальных параметров работы данного типа гидросистем.

Литература

1. Stasenko, D. Comparative analysis of load-sensing hydraulic systems for mobile machines / D. Stasenko, A. Hinzburh, Y. Khazeyeu // Scientific-technical union of mechanical engineering “INDUSTRY 4.0” : VI International scientific conference winter session, Borovets, Bulgaria, 08–11 Dec. 2021. – Borovets, 2021. – P. 189–192.
2. Хазеев, Е. В. Анализ имитационного моделирования гидравлических систем мобильных машин в различных программных комплексах / Е. В. Хазеев, Ю. А. Андреевец, К. В. Пупенко // Машиностроение: инновационные аспекты развития : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 2022 / НИЦ МС. – СПб., 2022. – № 5. – С. 18–22.
3. Хазеев, Е. В. Анализ современных гидросистем с объемной адаптацией к нагрузке / Е. В. Хазеев, Д. Л. Стасенко, А. А. Гинзбург // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. тез. докл. 5-й Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 2021 г. / Науч.-техн. центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2021. – С. 62–64.

УДК 621.225.7

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОСИСТЕМЫ С КЛАПАННОЙ АДАПТАЦИЕЙ К НАГРУЗКЕ

Е. В. Хазеев, Д. Л. Стасенко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Рассмотрены вопросы построения теоретического моделирования гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке средствами узлового метода моделирования. Определено, что данный метод моделирования рационально применять для данного типа гидросистем.

Ключевые слова: гидросистема, клапанная адаптация к нагрузке, теоретическое моделирование.

THEORETICAL MODELING OF THE HYDRAULIC SYSTEM WITH VALVE ADAPTATION TO LOAD

Y. V. Khazeyeu, D. L. Stasenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

In this paper, the issues of constructing a theoretical simulation of a hydraulic system with valve adaptation to load by means of a nodal modeling method are considered. It is determined that this modeling method is rational to apply for this type of hydraulic systems.

Keywords: hydraulic system, valve adaptation to load, theoretical modeling.

42 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

В настоящее время все большую актуальность приобретает теоретическое моделирование, направленное на изучение неустановившихся процессов гидросистем с клапанной адаптацией к нагрузке. Данный интерес вызван непрерывно растущими технико-экономическими требованиями к мобильным машинам [1].

Целью настоящей работы являются математическое моделирование гидравлической системы с клапанной адаптацией к нагрузке средствами узлового метода моделирования и выполнение подбора основных математических уравнений гидроэлементов системы.

Для построения теоретической математической модели гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке средствами узлового метода моделирования необходимо произвести расчет исследуемой схемы гидросистемы (рис. 1) [1]. Данный расчет сводится к определению переменных давлений, расходов (подач), скоростей и положений подвижных частей в точках соединения гидроэлементов – узлах системы. Причем один и тот же узел является одновременно выходом одного элемента и входом другого. Каждый элемент схемы, за исключением золотникового распределителя, можно представить в виде трехузлового элемента с узлами i, j, k , связывающими его с другими элементами схемы. В таблице приведен перечень узлов элементов, использованных в исследуемой гидросистеме.

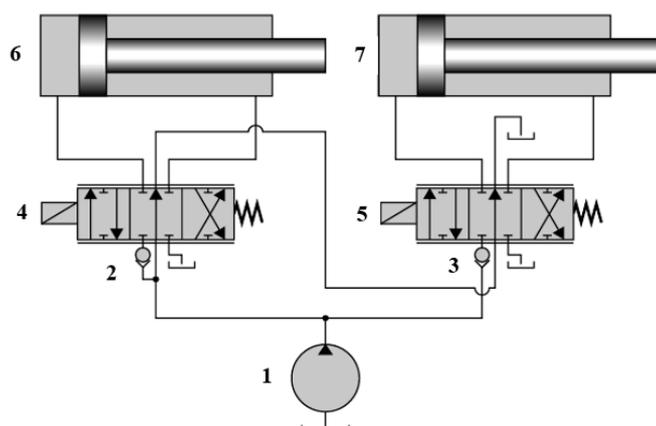


Рис. 1. Принципиальная схема гидравлической системы с клапанной адаптацией к нагрузке и нерегулируемым насосом:

1 – нерегулируемый насос; 2, 3 – обратные клапаны;
4, 5 – распределители; 6, 7 – цилиндры

Узлы элементов гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке

Название элемента	Узел		
	i	j	k
1. Насос	Вход (всасывающая линия)	Выход (напорная линия)	Узел получения мощности от электродвигателя (вращение вала)
2. Гидроцилиндр	Вход (напорная линия)	Выход (сливная линия)	Узел передачи мощности к рабочему механизму (перемещение штока)

Название элемента	Узел		
	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>
3. Клапан прямого действия	Вход (напорная линия)	Выход (сливная линия)	Узел перемещения запорно-регулирующего элемента
4. Трубопровод	Вход	Выход	–

Таким образом, вход и выход элемента определяются принятым направлением потока рабочей жидкости. При изменении направления потока изменяется знак параметров, характеризующих элемент (перепад давления, расход). В соответствии с вышеуказанным перечнем узлов элементов, использованных в исследуемой гидросистеме (см. таблицу), каждый тип элемента системы получает специальный идентификатор, позволяющий при формировании общей модели системы выбрать нужную группу уравнений – математическую модель элемента [2].

Следовательно, принципиальную схему гидросистемы рассмотрим как совокупность составляющих ее элементов и узлов – точек соединения данных элементов. В соответствии с этим схема относится к определенному типу с соответствующими ему узлами *i, j, k*. Структура схемы после нумерации всех ее узлов описывается следующей матрицей *S*:

$$S = \begin{pmatrix} e_1 & i_1 & j_1 & k_1 \\ e_2 & i_2 & j_2 & k_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_N & i_N & j_N & k_N \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где e_1, \dots, e_N – элементы, входящие в схему; N – количество элементов, входящих в систему.

В результате описания структуры из общей библиотеки уравнений элементов выбираем уравнения, которыми описываются входящие в систему элементы, а индексация переменных, входящих в уравнения (условия связей), будет установлена на основании анализа узлов элементов, указанных в матрице *S*.

Таким образом, в исследуемую систему, согласно [3], входят уравнения насоса, распределителей, обратных клапанов, цилиндров и трубопроводов.

Единственный элемент гидросистемы, который сложно описать данным методом, – это золотниковый распределитель, так как число примыкающих к нему узлов может быть больше трех. Золотниковый распределитель – элемент, при помощи которого изменяется структура схемы (при переключении золотника из одной позиции в другую происходит перераспределение потоков рабочей жидкости). Необходимо описание его структуры таким образом, чтобы иметь возможность производить единое описание всей схемы, т. е. при переключении золотника из одной позиции в другую автоматически определять схему подключений соединений элементов – это является важнейшей задачей. Рассмотрим, распределитель как совокупность местных сопротивлений – возможных соединений узлов золотника, каждое из которых имеет два узла (вход и выход). Описание его структуры можно формализовать дополнительной матрицей *U*:

$$U = \begin{pmatrix} i_1 & j_1 \\ i_2 & j_2 \\ \dots & \dots \\ i_L & j_L \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $i_1, j_1, \dots, i_L, j_L$ – номера узлов входа и выхода соединений $1, \dots, L$ распределителя.

Следовательно, описание структуры исследуемой гидросхемы формируется следующим путем: нанесение на схему узлов соединений элементов; нумерация узлов; формирование матрицы $S(1)$ на основе идентификации базовых элементов и нумерации узлов; формирование соответствующего числа матриц $U(2)$ при наличии в схеме золотниковых распределителей.

Таким образом, исходя из [2], при помощи выбранных уравнений формируем систему уравнений для каждого узла. Например, узел насоса постоянного объема, содержащий уравнение мотора и уравнение расходов на насосе:

$$N_n = \begin{cases} M_r = q_n f(q)(p_{j1} - p_{i1}) + a_\omega \frac{\omega_b}{u_d} + a_p |p_{j1} - p_{i2}| + a; \\ Q_{i1, j1} = q_n f(q) \frac{\omega_b}{u_d} \pm k_{yt} p_{i1, j1}. \end{cases} \quad (3)$$

Аналогичным образом, согласно [3], составляются системы уравнений для остальных узлов системы, а математическая модель исследуемой гидросистемы имеет вид:

$$N = N_n + 2N_{ц} + 2N_{о.к} + 14N_{тр} + 2 \sum_{i=1}^{N_{з.р}} n_i, \quad (4)$$

где $N_{ц}$ – система уравнений узла цилиндра; $N_{о.к}$ – система уравнений узла клапана обратного; $N_{тр}$ – система уравнений узла трубопровода; $N_{з.р}$ – система уравнений узла распределителя.

В результате сформирована методика, благодаря которой удалось построить математическую модель (4) гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке средствами узлового метода моделирования. Данный метод теоретического моделирования можно применять в дальнейшем для создания математических моделей другого типа гидросистем.

Литература

1. Stasenko, D. Comparative analysis of load-sensing hydraulic systems for mobile machines / D. Stasenko, A. Hinzburh, Y. Khazeyeu // Scientific-technical union of mechanical engineering “INDUSTRY 4.0” : VI International scientific conference winter session, Borovets, Bulgaria, 08–11 Dec. 2021. – Borovets, Bulgaria, 2021. – P. 189–192.
2. Попов, Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем : учеб. для машиностроительных вузов / Д. Н. Попов. – М. : Машиностроение, 1976. – 424 с.
3. Бажин, И. И. Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода / И. И. Бажин, Ю. Г. Беренгард, М. М. Гайцори. – М. : Машиностроение, 1988. – 312 с.

УДК 621.778.073

ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРОВ РОЛИКОВ И ИХ УГЛОВ ОХВАТА В КАНАТНОЙ МАШИНЕ НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛОКОРДА

О. Ю. Ходосовская

Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», г. Жлобин

Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Предложено условие, согласно которому рассчитывается суммарная кривизна канатной машины с учетом охвата роликами металлокорда. Рассмотрен подход по уменьшению суммарной кривизны канатной машины и приближению значения суммарной кривизны к нулю. Определены ролики канатной машины, в наибольшей степени влияющие на суммарную кривизну роликов канатной машины и прямолинейность металлокорда. Предлагаемые диаметры дополнительных роликов апробированы в промышленных условиях с подтверждением эффективности решения.

Ключевые слова: проволока, металлокорд, напряжения, кривизна, прямолинейность.

INFLUENCE OF ROLLER DIAMETERS AND THEIR ANGLES OF COVERAGE IN A ROPE MACHINE ON THE STEEL CORD PROPERTIES

O. Yu. Khodosovskaya

*OJSC “BSW – management company of “BMC” holding”,
Zhlobin, the Republic of Belarus*

Yu. L. Bobarikin, Yu. V. Martyanov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

A condition is proposed according to which the total curvature of the rope machine is calculated, considering the coverage of the steel cord by the rollers. An approach is proposed to reduce the total curvature of the rope machine and bring the value of the total curvature to zero. The most important rollers of the rope machine that most affect the total curvature of the rollers of the rope machine and the straightness of the steel cord are proposed. The proposed diameters of additional rollers are tested in industrial conditions with confirmation of the effectiveness of the solution.

Keywords: wire, metal cord, stress, curvature, straightness.

В процессе свивки металлокорд подвергается сложным напряжениям, которые приводят к проявлению остаточных напряжений [1]. Для снижения эффекта релаксации остаточных напряжений используются деформаторы, которые состоят из направляющих и деформирующих роликов [2]. Существуют способы для определения оптимального диаметра деформирующего ролика деформатора [3].

Остаточные напряжения влияют на технологические свойства металлокорда, главными из которых являются отклонение от прямолинейности и относительная обрывность. Остаточные напряжения в металлокорде в течение примерно семи суток переходят в пластическую деформацию металлокорда, что проявляется в искажении формы металлокорда при его размотке с катушки перед использованием.

46 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

На прямолинейность металлокорда влияют ролики самой канатной машины, через которые проходит проволока в процессе свивки. Исследование влияния диаметров роликов и их углов охвата в канатной машине на свойства металлокорда является актуальной научной задачей.

Цель данной работы – определить влияние диаметров роликов и их углов охвата в канатной машине на свойства металлокорда.

Предлагается принять следующее условие: произведение коэффициента степени проработки металлокорда и суммарной кривизны всех роликов канатной машины равняется нулю. Под кривизной ролика понимается величина, обратная радиусу ролика. Общее выражение имеет вид:

$$K \sum \frac{1}{R} = 0; \quad (1)$$

$$\sum \frac{K}{R} = \frac{K_1}{R_1} + \frac{K_2}{R_2} + \frac{K_3}{R_3} + \dots + \frac{K_n}{R_n} + \frac{K_{\text{доп}}}{R_{\text{доп}}} = 0; \quad (2)$$

$$K = \frac{\alpha}{360}, \quad (3)$$

где K – коэффициент степени проработки металлокорда; $\frac{1}{R}$ – кривизна соответствующего ролика, мм^{-1} ; $K_{\text{доп}}$ – коэффициент степени проработки металлокорда на дополнительном ролике; $R_{\text{доп}}$ – радиус дополнительного деформирующего ролика, мм; α – угол охвата соответствующего ролика, град.

При расчетах по формуле (2) необходимо принять условное направление изгиба проволоки в канатной машине. При проходе по ролику по часовой стрелке принимается положительное значение кривизны, против часовой стрелки принимается отрицательное значение кривизны. Суммарная кривизна должна стремиться или быть равна нулю. Если значение ненулевое, то необходимо добавить ролик, кривизна которого приводила бы значение суммарной кривизны к нулю. В процессе свивки металлокорда напряженно-деформированное эквивалентное состояние металлокорда неравновесное. Размеры используемых роликов на примере канатной машины TD 2/401 представлены в таблице.

Размеры используемых роликов на канатной машине

Наименование	Обозначение	Значение диаметра, мм	Кривизна, мм^{-1}	Угол охвата ролика, град
Питающая катушка	R_1	135	0,0148	360
Обводной ролик	R_2	40	0,05	44
Обводной ролик	R_3	40	-0,05	55
Обводной блок	R_4	43	0,0465	25
Обводной блок	R_5	43	0,0465	25
Обводной ролик	R_6	40	0,05	55

Наименование	Обозначение	Значение диаметра, мм	Кривизна, мм ⁻¹	Угол охвата ролика, град
Обводной ролик	R_7	38	0,0536	25
Обводной ролик	R_8	36	-0,055	25
Профилирующий ролик	R_9	3,125	0,64	10
Обводной ролик	R_{10}	36	-0,055	39
Обводной ролик	R_{11}	30	0,066	25
Обводной ролик	R_{12}	40	-0,05	55
Обводной блок	R_{13}	43	-0,0465	25
Обводной блок	R_{14}	43	-0,0465	25
Обводной ролик	R_{15}	56	0,0357	55
Ролики торсионного блока	R_{16}	56	0,0357	190
Тяговый кабестан	R_{17}	134	0,0149	190
Тяговый кабестан	R_{18}	134	0,0149	175
Направляющий ролик к рихтовальному устройству	R_{19}	100	-0,02	30
Направляющий ролик к рихтовальному устройству	R_{20}	100	-0,02	35
Ролик рихтовального устройства	R_{21}	14	-0,1428	140
Направляющий ролик намоточного устройства	R_{22}	100	0,02	290
Направляющий ролик намоточного устройства	R_{23}	195	0,01	180
Направляющий деформирующий ролик	$R_{доп}$	–	0	–
Деформирующий ролик	R_n	–	0	–
Приемная катушка	R_{24}	167,5	0,0119	360

Принимается, что ролики торсионного устройства имеют суммарную кривизну, равную нулю. Торсионное устройство в расчет не принимается.

Согласно таблице и выражению (2) суммарная кривизна с учетом угла охвата роликов составляет 0,0428 мм⁻¹. При использовании направляющего деформирующего ролика $R_{доп}$ диаметром 84 мм, а деформирующего ролика R_n диаметром 44 мм суммарная кривизна с учетом угла охвата роликов составляет 0,0415 мм⁻¹, что приблизительно на 30 % лучше, чем без использования дополнительных роликов.

Выполнен эксперимент по свивке металлокорда с использованием деформирующего ролика. Для определения влияния деформирующего ролика на прямолинейность металлокорда было проведено исследование при изготовлении металлокорда конструкции 2 × 0,30НТ. На канатной машине типа ТД 2/401 изготовили 3 катушки металлокорда: одна катушка с использованием деформирующего ролика диаметром 56 мм, одна катушка с использованием деформирующего ролика диамет-

ром 44 мм без дополнительной настройки канатной машины, одна катушка с использованием деформирующего ролика диаметром 44 мм с дополнительной настройкой канатной машины.

Оценка прямолинейности металлокорда производилась с учетом релаксации остаточных напряжений в течение семи суток. Съём данных осуществлялся сразу после наработки – через одни сутки, через трое суток и через семь суток.

В случае свивки с использованием деформирующего ролика диаметром 56 мм значительное изменение прямолинейности металлокорда (в 3–4 раза) происходило в течение первых суток выдержки металлокорда на приемной катушке. Релаксация остаточных напряжений в течение трех суток также проходила со значительным изменением прямолинейности металлокорда. Прямолинейность металлокорда по истечении семи суток составила 60 мм. Это в 6 раз выше значения прямолинейности металлокорда при съеме с приемной катушки канатной машины.

В случае свивки с использованием деформирующего ролика диаметром 44 мм также происходило изменение значения прямолинейности металлокорда, но с меньшей интенсивностью: после трех суток выдержки прямолинейность металлокорда в среднем составила 34–37 мм, а через семь суток – 38–40 мм. Наличие дополнительной настройки канатной машины незначительно улучшает результат (< 5 %).

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования деформирующего ролика диаметром 44 мм для повышения прямолинейности металлокорда.

Исследовано влияние диаметров роликов и их углов охвата в канатной машине на свойства металлокорда. Предложено положение для повышения свойств металлокорда, которое основано на определении суммарной кривизны всех роликов канатной машины с учетом их угла охвата. При использовании рекомендуемых диаметров дополнительных роликов суммарная кривизна роликов канатной машины на 30 % ближе к нулевому значению, чем без использования дополнительных роликов.

Экспериментальные значения прямолинейности металлокорда, полученные с применением деформирующего ролика диаметром 44 мм на канатной машине TD 2/401, показали работоспособность предложенного положения в определении оптимального диаметра деформирующего ролика канатной машины для улучшения свойств металлокорда.

Л и т е р а т у р а

1. Бобарикин, Ю. Л. Тонкое волочение и свивка в металлокорд стальной латунированной проволоки / Ю. Л. Бобарикин, М. Н. Верещагин, Ю. В. Мартьянов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – 304 с.
2. Бобарикин, Ю. Л. Исследование влияния изгиба металлокорда перед намотом на его прямолинейность после намота / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов, А. В. Веденеев // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси ; редкол.: А. В. Белый (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2018. – Кн. 3: Обработка металлов давлением. – 137 с.
3. Бобарикин, Ю. Л. Способы повышения прямолинейности металлокорда / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси ; редкол. : А. В. Белый (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – Кн. 3: Обработка металлов давлением. – 129 с.

УДК 621.778

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ТОНКОГО ВОЛОЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ПРОВОЛОКИ И МЕТАЛЛОКОРДА

Е. С. Ельцова

Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», г. Жлобин

Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Показано влияние скорости волочения тонкой проволоки на механические свойства. Исследовано изменение микроструктуры тонкой проволоки в зависимости от изменения скорости волочения. Проведены механические испытания тонкой проволоки. Определены зависимости механических свойств тонкой проволоки от скорости волочения.

Ключевые слова: проволока, металлокорд, деформация, волочение.

INFLUENCE OF THE THIN DRAWING RATE ON THE PROPERTIES OF WIRE AND STEEL CORD

E. S. Eltsova

*OJSC “BSW – management company of “BMC” holding”,
Zhlobin, the Republic of Belarus*

Yu. L. Bobarikin, Yu. V. Martyanov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The influence of the drawing speed of a thin wire on mechanical properties was studied. The change in the microstructure of a thin wire depending on the change in the drawing speed was investigated. Mechanical tests of a thin wire were carried out. The dependencies of the mechanical properties of a thin wire on the drawing speed were determined.

Keywords: wire, steel cord, deformation, drawing.

Повышение качества тонкой проволоки и металлокорда обеспечит снижение количества и времени технологических пауз, а также позволит повысить технологичность свивки металлокорда. Учитывая, что при деформации проявляется анизотропия свойств тонкой проволоки, прогнозирование физико-механических свойств и степени неравномерности деформации становится актуальной задачей.

Большинство моделей технологических процессов, создаваемых в компьютерных системах инженерного моделирования, таких как *MSC.Nastran*, *MSC.Marc*, *QForm*, рассматривают обрабатываемый материал изотропным, без учета его структурных составляющих и анизотропии, в итоге снижается точность определения значений напряженно – деформированного состояния (НДС) обрабатываемой заготовки и инструмента, а также основных технологических параметров процессов.

Моделированию подлежит конкретный материал, а для этого в программе должны быть вводные данные об этом материале. Сбор данных проводят на мини-образцах исследуемого материала. Результатом физического моделирования является серия кривых «напряжение – деформация» при различных скоростях и темпера-

50 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

турах деформации, которые загружаются в программу, работающую по алгоритму метода конечных элементов.

Обычно после получения кривых проводят другую серию таких же испытаний. При испытании нового образца процессу позволяют идти чуть дальше, чем в предыдущем для изучения микроструктуры на каждом этапе деформации [1].

Для определения микроструктуры тонкой проволоки, изготовленной на различных скоростях волочения (1 м/с, 4 м/с, 6 м/с, 8 м/с и 10 м/с), были отобраны образцы проволоки, произведенные из стали 80. Образцы одинакового диаметра (0,35 мм) и класс прочности (НТ). Для анализа микроструктуры, изготовленных микрошлифов из выбранных образцов, используется метод выявления и определения величины зерна, установленный в ГОСТ 5639–82. Анализ микрошлифов производился с помощью микроскопа «ЛОМО МЕТАМ РВ-21-2» при увеличении 800 крат. Сталь 80 является эвтектоидной и состоит преимущественно из перлита, поэтому для выявления и определения величины зерна сталей и сплавов выбран метод травления сетки перлита.

Полученные средние численные значения площади зерна, количество зерен на площади 1 мм², а также другие параметры представлены в таблице.

Из данных таблицы видно, что при увеличении скорости волочения балл зерна увеличивается, структура становится более равномерной и мелкозернистой. Мелкозернистая структура позволяет повысить качество производимой тонкой проволоки. Мелкозернистая структура более пластична и, следовательно, менее подвержена трещинам [2]. С увеличением скорости волочения неметаллические включения распределяются ближе к центру сечения проволоки. Это происходит предположительно из-за увеличения интенсивности деформации. Осевые слои металла, которые при волочении вытягиваются наиболее сильно, из-за дробления зерна стягивают все включения в зону наиболее интенсивной деформации.

Параметры микроструктуры образцов

Скорость волочения, м/с	Балл зерна <i>G</i>	Средняя площадь сечения зерна <i>a</i> , мм ²	Число зерен на площади 1 мм ²			Среднее число зерен, 1 мм ³	Средний диаметр зерна <i>dm</i> , мм	Средний условный диаметр зерна <i>du</i> , мм
			минимальное	среднее	максимальное			
1	11	0,000061	12288	16384	24576	2097152	0,0079	0,0069
4	11	0,000061	12288	16384	24576	2097152	0,0079	0,0069
6	12	0,000030	24576	32768	49152	5931008	0,0056	0,0049
8	12	0,000030	24576	32768	49152	5931008	0,0056	0,0049
10	13	0,000015	49152	65536	98304	16777216	0,0039	0,0032

Образцы проволоки были свиты на лабораторном стенде в металлокорд конструкции 2 × 0,35НТ, количество витков равно 21, шаг свивки равен 14 мм. Свивка происходила с дополнительным перекручиванием в пять оборотов. Итого – финальная схема свивки равна 21 ± 5 оборотов.

Для изучения влияния процесса свивки проведены механические испытания на разрыв тонкой проволоки до свивки, тонкой проволоки после свивки (выплетена из металлокорда) и цельной конструкции металлокорда.

После завершения проверки всех значений, полученных в экспериментальных измерениях проволоки и металлокорда, были исключены грубые ошибки согласно правилу трех сигм.

По результатам определено, что имеется небольшое снижение предела прочности металлокорда, обусловленное наличием касательных напряжений и крутящих деформаций в проволоке. Изменение предела прочности по скоростям волочения проволоки и металлокорда обусловлено квадратичной зависимостью предела прочности от скорости волочения. Это может быть вызвано изменением свойств смазки и условиями трения при увеличении скорости тонкого волочения, а также изменением сопротивления пластической деформации при увеличении скорости волочения.

Для практического использования выведены зависимости механических свойств тонкой проволоки класса прочности НТ от скорости волочения, представленные в формулах (1), (2) для тонкой проволоки и (3), (4) – для металлокорда.

Предел прочности тонкой проволоки:

$$\sigma B = -8,6429\vartheta^2 + 53,157\vartheta + 3076,2, \quad (1)$$

где σB – предел прочности, МПа; ϑ – скорость волочения, м/с.

Относительное удлинение тонкой проволоки:

$$\delta = 0,1143\vartheta^2 - 0,8057\vartheta + 3,92, \quad (2)$$

где δ – относительное удлинение, %.

Предел прочности металлокорда:

$$\sigma B = 38,084\vartheta^2 + 207,63\vartheta + 2158,8. \quad (3)$$

Относительное удлинение металлокорда:

$$\delta = 0,0161\vartheta^2 - 0,0947\vartheta + 1,8138. \quad (4)$$

Полученные результаты могут быть использованы для обеспечения увеличения технологичности изготовления металлокорда с учетом влияния скорости тонкого волочения. Свойства тонкой проволоки отразятся на величине обрывности металлокорда при свивке, на отбраковке металлокорда по прямолинейности и кручению.

Предложенные зависимости механических свойств тонкой проволоки класса прочности НТ от скорости волочения могут быть использованы на практике и при математическом моделировании процессов волочения и свивки.

Л и т е р а т у р а

1. Бобарикин, Ю. Л. Тонкое волочение и свивка в металлокорд стальной латунированной проволоки / Ю. Л. Бобарикин, М. Н. Верещагин, Ю. В. Мартьянов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – 304 с.
2. Константинов, И. Л. Основы технологических процессов обработки металлов давлением : учебник / И. Л. Константинов, С. Б. Сидельников. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 488 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАБОТЫ ЗЛОТНИКОВОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО КЛАПАНА

Ю. И. Железнякова, Д. Л. Стасенко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Приведены порядок моделирования динамики работы золотникового гидравлического клапана и основное уравнение равновесия запорно-регулирующего элемента под действием приложенных сил.

Ключевые слова: динамика, математическая модель, моделирование, гидравлический клапан, золотниковый клапан.

MODELING OF DYNAMIC OPERATION OF A SPOOL HYDRAULIC VALVE

Y. I. Zheleznyakova, D. L. Stasenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The article presents the sequence of modeling dynamic work of a spool hydraulic valve and the basic equation of the equilibrium of the spool under the action of applied forces.

Keywords: dynamics, mathematical model, modeling, hydraulic valve, spool valve.

Целью исследования является формирование математической модели динамики работы золотникового гидравлического клапана.

Объектом исследования является золотниковый гидравлический распределитель со встроенным клапаном предохранительным MR100.T2. На рис. 1 представлена конструкция модернизированного гидрораспределителя с принципиальной гидравлической схемой, где линия P – отверстие для подачи рабочей жидкости под давлением; A – отверстие для подключения к рабочему органу; T – линия слива рабочей жидкости в бак; a – линия для подачи сигнала управления; $KП$ – клапан предохранительный [1].

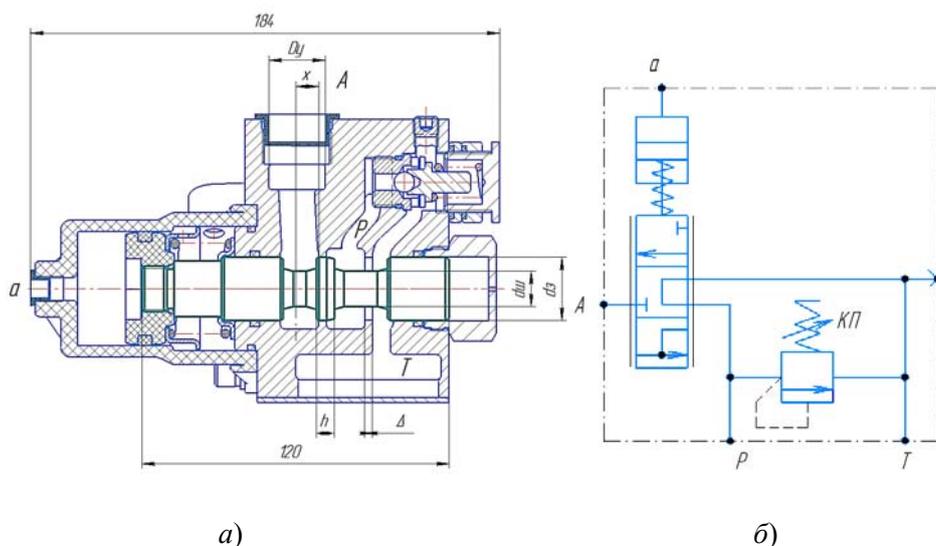


Рис. 1. Модернизированный распределитель MR100.T2:
а – конструкция гидрораспределителя; б – схема гидравлическая принципиальная

В качестве основных исходных данных приняты конструктивные размеры модернизированного гидрораспределителя: $D_y = 22$ мм – условный диаметр внутренних каналов; $d_3 = 25$ мм – диаметр запорно-регулирующего элемента; $d_{ш} = 14$ мм – диаметр шейки золотника; $h = 11$ мм – длина рабочего пояса золотника; $\Delta = 3$ мм – величина перекрытия; $F_{упр} = 180$ Н – максимальное усилие управления; $c = 12500$ Н/м – жесткость пружины; $z = 16$ мм – величина предварительного сжатия пружины; $Q_{max} = 150$ л/мин – максимальный расход рабочей жидкости; $P_{сл} = 0,15$ МПа – давление на сливе; $P = 16$ МПа – давление в системе.

Для моделирования динамических процессов согласно гидравлической принципиальной схеме и конструкции гидрораспределителя составлена расчетная схема запорно-регулирующего элемента (рис. 2).

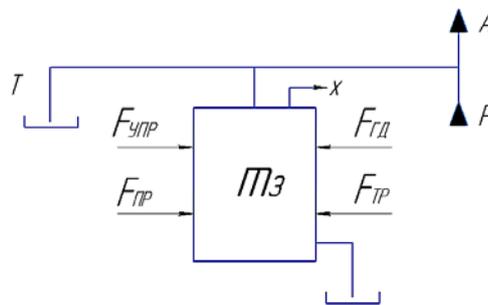


Рис. 2. Расчетная схема золотника:

m_3 – масса золотника; x – перемещение золотника;
 $F_{упр}$ – усилие управления; $F_{пр}$ – усилие сжатия пружины, обеспечивающей принудительное возвращение золотника в нейтральное положение; $F_{гд}$ – гидродинамическая сила, действующая в каждом из окон распределителя и стремящаяся вернуть золотник в нейтральное положение;
 $F_{тр}$ – сила трения, действующая на золотник

Для анализа влияния различных параметров на динамические характеристики гидравлического распределителя необходимо разработать математическую модель, позволяющую адекватно описать внутренние динамические процессы, происходящие в исследуемом распределителе [2].

Для этого необходимо составить уравнение движения подвижных элементов распределителя, которое формируется на основе равновесия движущих элементов под действием приложенных сил в соответствии со вторым законом Ньютона:

$$ma = \sum F_a - \sum F_c, \quad (1)$$

где m – масса подвижных элементов распределителя; a – ускорение поступательно движущих элементов; $\sum F_a$ – сумма активных сил, действующих на элементы распределителя; $\sum F_c$ – сумма сил сопротивления.

Согласно расчетной схеме золотника (рис. 2) дифференциальное уравнение движения золотника исследуемого распределителя будет иметь вид:

$$m_3 \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{упр} + F_{тр} - F_{тр} - F_{гд}. \quad (2)$$

Силу трения можно представить в виде двух составляющих:

$$F_{тр} = F_{тр.п} \operatorname{sign} \frac{dx}{dt} + F_B, \quad (3)$$

где $F_{тр.п}$ – сила трения покоя; F_B – сила трения со смазочным материалом:

$$F_B = \nu \rho \frac{A_{\max}}{\varepsilon} \frac{dx}{dt}, \quad (4)$$

где ν – вязкость рабочей жидкости; ρ – плотность рабочей жидкости; A_{\max} – площадь дроссельной щели, перекрываемая золотником; ε – радиальный зазор между золотником и корпусом распределителя.

Усилие пружины, обеспечивающее принудительное возвращение золотника в нейтральную позицию, определяется по формуле

$$F_{пр} = c_{пр}(z + x), \quad (5)$$

где $c_{пр}$ – коэффициенты жесткости пружины; z – предварительный натяг пружины.

Если пренебречь инерционностью жидкости внутри распределителя, гидродинамическую силу, действующую в каждом из окон распределителя и стремящуюся вернуть золотник в нейтральное положение, можно определить по выражению

$$F_{гд} = 2\mu^2 \pi d_3 x \cos \theta (P_n - P_A + P_B - P_{сл}), \quad (6)$$

где μ – коэффициент расхода жидкости в окне распределителя; θ – угол наклона вектора гидродинамической силы к оси золотника; P_n , P_A , P_B – соответственно давление жидкости перед распределителем, на входе в трубопровод высокого давления и на выходе трубопровода низкого давления.

Результаты расчетов сил, действующих на золотник в крайнем правом положении, представлены в таблице.

Значения сил, действующих на золотник в распределителе

Параметры	Значение, Н
Сила трения, $F_{тр}$	50
Гидродинамическая сила, $F_{гд}$	330
Усилие управления, $F_{упр}$	180

С учетом данных, приведенных в таблице, результирующее дифференциальное уравнение движения золотника будет иметь вид:

$$0,27 \frac{d^2 x}{dt^2} = 180 + 12500(0,016 + x) - 5 \cdot \frac{dx}{dt} - 330x. \quad (7)$$

В результате проведенных работ получена математическая модель, описывающая динамический режим работы модернизированного гидрораспределителя MR100.T2 с улучшенными динамическими характеристиками, которая может быть использована для выбора рациональных параметров распределителя, обеспечивающих требуемые характеристики качества переходных процессов.

Л и т е р а т у р а

1. Гидрораспределители : каталог продукции «Гидросила». – Режим доступа: <http://www.hydrosila.com/files/catalog/en-catalog-11.pdf>. – Дата доступа: 10.09.2022.
2. Лаевский, Д. В. Рекомендации по проектированию направляющих аппаратов / Д. В. Лаевский, Д. Л. Стасенко // Современные проблемы машиноведения : тез. докл. XI Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 20–21 окт. 2016 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. С. И. Тимошина. – Гомель, 2016. – С. 63–64.

УДК 621.74:004

ПРИНЦИПЫ КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЛОЖНОСТИ 3D-МОДЕЛЕЙ ОТЛИВОК

И. Б. Одарченко, В. А. Жаранов, И. В. Предчанко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

При решении задач кластеризации предложено использование интеллектуального подхода с помощью самоорганизующихся нейронных сетей, в которых информация о каждой отливке представлена в виде вектора конструктивных и технологических характеристик.

Ключевые слова: кластеризация, технологичность, геометрическая сложность, анализ.

PRINCIPLES OF COMPUTER ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL COMPLEXITY OF 3D-MODELS OF CASTINGS

I. B. Odarchenko, V. A. Zharanov, I. V. Predchanko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

When solving clustering problems, it is proposed to use an intelligent approach using self-organizing neural networks, in which information about each casting is presented as a vector of design and technological characteristics.

Keywords: clustering, manufacturability, geometric complexity, analysis.

Современный аппарат компьютерного моделирования создает возможность проведения комплексной разработки литейной технологии на основе оценки геометрической сложности параметров трехмерных моделей отливок. При этом возможности создания алгоритма компьютеризированной оценки сложности геометрии тела отливки не раскрыты в полной мере. В частности, отсутствует универсальная система признаков, характеризующих критериальные связи между параметрами геометрической сложности и критериями технологичности отливки, а также производственно-технологическими условиями и режимами их изготовления. Разработка методики кластеризации групп отливок, связывающих их конструктивные особенности (признаки) и необходимые техно-

логические параметры процесса производства, созданные на основе методов параметрического калькулирования, по нашему мнению, позволит перейти к универсальной системе признаков, способных охарактеризовать требования к технологии изготовления любой отливки. Кроме того, следует отметить, что геометрическая сложность отливок коррелирует с затратами на обеспечение качества, трудоемкостью и ресурсоемкостью процессов их производства [1]. В этом смысле рассматриваемая система кластеризации отливок может быть доработана и использована в качестве основы при создании автоматизированного продукта для оценки себестоимости отливок и экономической эффективности процессов их производства.

При решении задач кластеризации, отличающихся открытым множеством возможных классов, предлагается использовать интеллектуальный подход, который называется «кластеризация с помощью самоорганизующихся нейронных сетей». Суть этого подхода состоит в том, что нейрон с вектором веса, наиболее близким к вектору входа, выигрывает конкуренцию в борьбе за этот вектор. Последующий рекуррентный алгоритм приведет к тому, что, когда на вход сети поступит достаточно большое количество векторов, каждая группа близких из них окажется связанной только с одним из нейронов слоя.

Подобная кластерная система позволяет осуществить разбиение отливок на однородные группы (кластеры или классы) [2]. Графически выборки представлены точками в признаковом пространстве, а задача кластеризации сводится к определению «сгущений точек» (рис. 1).

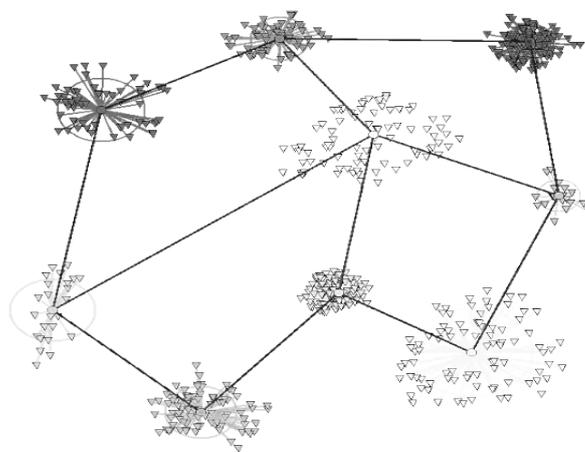


Рис. 1. Метаструктура кластеризованного блока диапазона записей базы данных

В рамках проделанной работы нейросетевая кластеризация более объективна при генерации матрицы групп отливок в количестве 6×6 (36 индивидуальных групп отливок по комплексной технологической сложности), матрицы 3×3 (9 индивидуальных групп отливок по технологической идентичности) и матрицы 6×6 (по геометрическому подобию). При кластеризации отливок нейронная сеть обучалась по важнейшим параметрам технологии, таким, как геометрические характеристики 3D-модели отливки, особенности заполнения формы расплавом, требования к качеству изготовления и допускаемые дефекты (рис. 2).

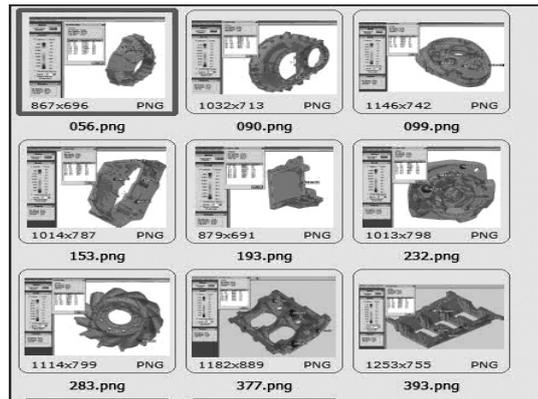


Рис. 2. Иллюстрация подгруппы отливок по конструктивной идентичности

Установлено, что в процессе обучения нейронной сети особенности, отличающие отливки друг от друга, составляют информационную базу, позволяющую отнести отливку к соответствующему классу по назначению. При этом информация о каждой отливке представлена в виде вектора конструктивных и технологических характеристик, которые наиболее достоверно соответствуют требованиям моделирования нейронной сети.

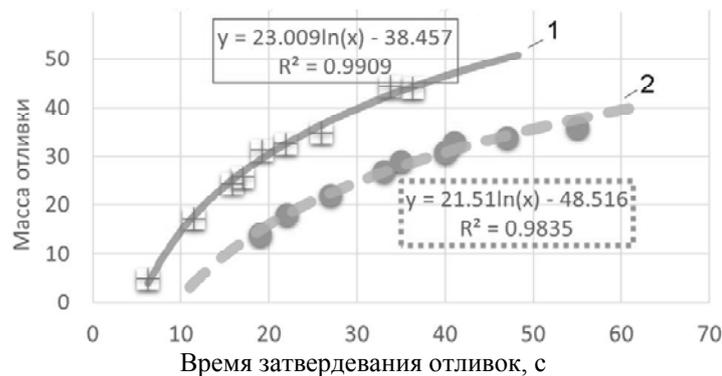


Рис. 3. Регрессионный анализ продолжительности затвердевания группы отливок одного кластера в зависимости от массы отливки:

- 1 – группа отливок типа «плита корпусная»;
2 – группа отливок типа «ступица»)

Регрессионный анализ зависимости продолжительности затвердевания двух кластеризованных групп из базы данных отливок (рис. 3) показал высокую степень точности прогностических зависимостей в пределах одного кластера отливок, а именно – коэффициент R^2 (стремится к 1) показывает, что кластерный анализ позволяет выделить подобную группу отливок и открывает широкий потенциал использования данного вида анализа для решения инженерно-технических задач.

Литература

1. Одарченко, И. Б. Интеграция нейросетевых моделей в процессы технологической подготовки производства отливок / И. Б. Одарченко, В. А. Жаранов, И. Н. Прусенко // Литье и металлургия. – 2018. – № 4 (93). – С. 45–49.

2. Прусенко, И. Н. Применение средств компьютерного анализа в классификации сложности отливок / И. Н. Прусенко, В. А. Жаранов ; науч. рук. И. Б. Одарченко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2020. – С. 107–110.

УДК 621.225

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ГИДРОСИСТЕМ С КЛАПАННОЙ И ОБЪЕМНОЙ АДАПТАЦИЕЙ К НАГРУЗКЕ ПРИ РАВНОМЕРНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ РАСХОДА

А. А. Гинзбург

Открытое акционерное общество «Гомельское специальное конструкторско-техническое бюро гидронневоавтоматики», Республика Беларусь

Ю. А. Андреевец

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Проведен анализ потерь мощности в двухпоточных гидравлических системах с объемной адаптацией к нагрузке (использующих насос с регулятором разности давлений) и с клапанной адаптацией к нагрузке (использующих клапан разности давлений и нерегулируемый насос) для случая равномерного распределения суммарного расхода, настроенного на исполнительных органах в течение рабочего цикла. Гидросистемы с объемной адаптацией проигрывают гидросистемам с клапанной адаптацией по стоимости и надежности, но считается, что потери мощности в них являются меньшими. Определены условия, при которых двухпоточные системы с клапанной адаптацией являются предпочтительными по сравнению с гидросистемами с объемной адаптацией по энергетической эффективности в зависимости от уровня рабочего давления. Предложен способ выбора подач нерегулируемых насосов двухпоточной системы с клапанной адаптацией, обеспечивающий наименьший уровень потерь энергии при равномерном случайном распределении суммарного настроенного расхода в гидросистеме, получены применимые на практике выводы.

Ключевые слова: гидравлические системы, адаптация к нагрузке, LS-системы, потери мощности, энергетическая эффективность.

ANALYSIS OF POWER LOSSES OF HYDRAULIC LS-SYSTEMS WITH THE PUMP AND THE VALVE CONFIGURATIONS UNDER CONDITIONS OF UNIFORM FLOW DISTRIBUTION

A. A. Hinzburh

OJSC “Gomelskoe spetsialnoe konstruktorsko-tekhmitscheskoe bjuro gidropneumoavtomatiki”, the Republic of Belarus

Yu. A. Andreyevets

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The comparison of power losses in the double-flow hydraulic LS-systems with a pump configuration (using the variable displacement LS-pump) and with a valve configuration (using the fixed displacement pump) is theoretically investigated. Hydraulic systems with a pump configuration concede to the hydraulic systems with a valve configuration on the cost and reliability,

but it is believed that the power losses in them are smaller. The conditions under which double-flow LS-systems with a valve configuration (using the fixed displacement pump) are preferable in comparison with LS-systems with a pump configuration (using the variable displacement LS-pump) depending on the working pressure level are defined. A method is proposed for selecting of fixed displacement pump flows for double-flow hydraulic LS-systems valve configuration that provides the lowest level of energy losses in the case of uniform random distribution of the total adjusted flow rate in the hydraulic system. Practical conclusions have been obtained.

Keywords: hydraulic systems, load sensing, LS-systems, power loss, energy efficiency.

Гидравлические системы с адаптацией к нагрузке (LS-системы) решают основную проблему увеличенных потерь мощности в гидросистеме за счет того, что входное давление гидросистемы изменяется в соответствии с изменением давления на наиболее нагруженном исполнительном органе, превышая его на небольшую постоянную величину [1].

Гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке используют более дешевые, надежные и неприхотливые нерегулируемые насосы [2, 3], но считается, что для них характерны более высокие потери мощности, так как подача насоса превышает расход, потребляемый рабочими органами, и неиспользованный избыток подачи переливается через клапан разности давлений. Однако уточненные расчеты потерь мощности показывают [3], что во многих случаях однопоточные системы с клапанной адаптацией могут по своей энергетической эффективности не уступать гидравлическим системам с объемной адаптацией.

Существуют системы с клапанной адаптацией, позволяющие снизить величину избыточной подачи при использовании двух или более насосов [4], в которых входной расход не является постоянным, так как насосы автоматически разгружаются от давления при снижении потребляемого в гидросистеме расхода и подключаются к напорной магистрали при его повышении. Типовая гидравлическая схема таких систем приведена на рис. 1, а.

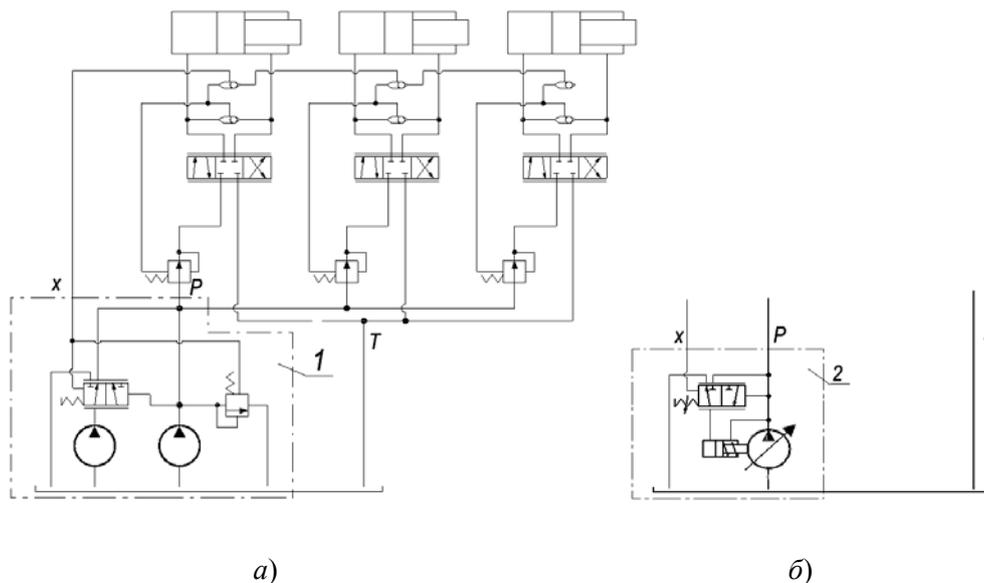


Рис. 1. Принципиальные гидравлические схемы с адаптацией к нагрузке двухпоточной системы с клапанной адаптацией со двоянным насосом 1 (а); однопоточной системы с объемной адаптацией с регулируемым насосом 2 (б)

60 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

В системах с адаптацией к нагрузке расход, потребляемый исполнительными органами, равномерно распределяется в некотором заранее известном диапазоне от нулевого до максимального значения, при этом в двухпоточных системах установлены два насоса с подачами Q_1 и Q_2 , причем разгружаемым является насос с подачей Q_2 , а сумма подач насосов равна Q_{\max} .

Оптимальное соотношение подач насосов в двухпоточной гидросистеме, при котором обеспечивается минимальный уровень энергетических потерь для первого, постоянно работающего насоса $Q_{1\text{opt}}$ и для второго, разгружаемого насоса $Q_{2\text{opt}}$ [4]:

$$Q_{1\text{opt}} = \frac{Q_{\max} + Q_{\min}}{2}; \quad Q_{2\text{opt}} = Q_{\max} - Q_{1\text{opt}} = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{2}.$$

Средние за длительное время потери мощности в гидросистеме равны:

$$\Delta N_{m\text{Kopt}} = 0,25 p_0 (Q_{\max} - Q_{\min}) + \Delta p_{LSK} Q_{\max} + \frac{\int_{t=0}^T \Delta N_{LS} dT}{T}.$$

В гидросистеме с объемной адаптацией к нагрузке (рис. 1, б) подачу насоса считают равной максимальному расходу, потребляемому исполнительными органами гидропривода. Средние за длительное время потери мощности в такой гидросистеме:

$$\Delta N_{mO} = \frac{1}{2} \Delta p_{LSO} (Q_{\max} + Q_{\min}) + \frac{\int_{t=0}^T \Delta N_{LS} dT}{T}.$$

Потери мощности в таких гидросистемах становятся равными при следующем условии:

$$\frac{Q_{\min}}{Q_{\max}} = 1 - 4 \frac{\Delta p_{LSO} - \Delta p_{LSK}}{p_0 + 2\Delta p_{LSO}}. \quad (1)$$

При меньшем соотношении расходов более энергетически эффективной является гидросистема с объемной адаптацией к нагрузке, при большем – двухпоточная гидросистема с клапанной адаптацией.

Характерной величиной LS -перепада для систем с объемной адаптацией с использованием регулируемых самовсасывающих насосов является $\Delta p_{LSO} = 1,8\text{--}2,5$ МПа. Применение регулируемых несамовсасывающих насосов с контуром подпитки приводит к появлению дополнительных потерь мощности, в том числе и на фильтре тонкой очистки, что увеличивает перепад на 20–50%. С учетом динамических характеристик аппарата для гидросистем с клапанной адаптацией к нагрузке обеспечивает поддержание величины Δp_{LSK} на уровне 0,6–1,3 МПа [3].

Таким образом, анализируя характерные давления в гидросистемах [4] и характерные настроенные LS -перепады для насосов и гидроаппаратуры [3], по формуле (1) определили, что двухпоточные гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке являются более энергетически эффективными, чем гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке в следующих случаях:

– для систем низкого (до 12 МПа) давления при потребляемых расходах – от $(0,3-0,5)Q_{\max}$ до Q_{\max} ;

– для систем среднего давления (от 12 до 20 МПа) – от $(0,5-0,7)Q_{\max}$ до Q_{\max} ;

– для систем высокого давления (свыше 20 МПа) – от $0,7Q_{\max}$ до Q_{\max} при использовании в системе с объемной адаптацией самовсасывающего насоса и приблизительно от $0,6Q_{\max}$ до Q_{\max} – при использовании несамовсасывающего насоса.

При большем диапазоне изменения суммарного настроенного расхода более энергетически выгодными оказываются гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке.

Литература

1. Гинзбург, А. А. Дроссельное регулирование в гидросистемах и адаптация гидропривода к нагрузке (LS-принцип) : курс лекций для студентов специальности 1-36 01 07 «Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин» днев. и заоч. форм обучения / А. А. Гинзбург. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 77 с.
2. Гинзбург, А. А. Сравнение эффективности гидравлических систем с объемной и клапанной адаптацией к нагрузке по уровню потерь мощности. / А. А. Гинзбург // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 24–25 апр. 2014 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2014. – С. 30–33.
3. Гинзбург, А. А. Сравнение однопоточных гидросистем с объемной и клапанной адаптацией к нагрузке по уровню потерь мощности / А. А. Гинзбург, Д. Л. Стасенко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – № 3 (44). – С. 67–74.
4. Гинзбург, А. А. Направления повышения энергетической эффективности гидравлических LS-систем с клапанной адаптацией к нагрузке / А. А. Гинзбург, Ю. А. Андреевец // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. тез. докл. 5-й Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 17 нояб. 2021 г. / Науч.-техн. центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2021. – С. 75–83.

УДК 62-33

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ДРОССЕЛИРУЮЩЕМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЕ В ПРОГРАММЕ KompasFlow

А. В. Ковалев, Ю. А. Андреевец

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Выполнена твердотельная модель дросселирующего распределителя типа РАМ в графической системе трехмерного моделирования КОМПАС-3D. Применение данного программного продукта сокращает сроки разработки новой продукции, снижает себестоимость и повышает качество выпускаемых изделий. В последних версиях программы встроено приложение KompasFlow, которое позволяет производить экспресс-анализ геометрии деталей устройства на ранних этапах проектирования. Выделена проточная часть распределителя, установлены граничные условия, созданы визуализационные слои, получены результаты расчета и распределение скоростей в дросселирующих канавках. Установлено, что приложение KompasFlow можно использовать для исследования скорости жидкости через сложную геометрию внутренних проточек в гидравлических аппаратах.

Ключевые слова: приложение KompasFlow, моделирование течения жидкости, дросселирующий распределитель

LIQUID FLOW SIMULATION IN THROTTLE DISTRIBUTOR IN KompasFlow SOFTWARE

A. V. Kovalev, YU. A. Andreyevets

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

A solid-state model of a PAM-type throttling distributor has been made in the KOMPAS-3D graphical three-dimensional modeling system. The use of this software product reduces the development time for new products, reduces the cost and improves the quality of manufactured products. In the latest versions of the program, the KompasFlow application is built-in, which allows you to perform a rapid analysis of the geometry of device parts at the early stages of design. The flow part of the distributor was identified, boundary conditions were established, visualization layers were created, calculation results and velocity distribution in the throttling grooves were obtained. It is established that the KompasFlow application can be used to study the liquid velocity through the complex geometry of internal grooves in hydraulic devices.

Keywords: KompasFlow app, liquid flow simulation, throttling valve.

Система КОМПАС-3D предназначена для создания трехмерных ассоциативных моделей отдельных деталей и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы. Параметрическая технология позволяет быстро получать модели типовых изделий на основе проектированного ранее прототипа. Многочисленные сервисные функции облегчают решение вспомогательных задач проектирования и обслуживания производства [1].

Приложение KompasFlow представляет собой интегрированный в КОМПАС-3D инструмент экспресс-анализа аэрогидродинамики проектируемого устройства. KompasFlow обладает простым интерфейсом для экспресс-анализа устройства на ранних этапах его проектирования и позволяет сделать первичную оценку влияния вносимых изменений в геометрию устройства на его эффективность [2].

Целью данной работы является изучение возможностей программного обеспечения KompasFlow для моделирования течения жидкости в гидравлической аппаратуре. Подобное моделирование применяется для поиска уязвимых участков конструкции гидроаппарата, проверки рабочих характеристик на этапе проектирования.

В рамках исследования было проведено моделирование течения жидкости в напорной линии дросселирующего распределителя типа РАМ со следующими характеристиками: давление на входе – 32 МПа; расход рабочей жидкости – 250 л/мин; диаметр условного прохода – 20 мм [3]. Выполнена твердотельная модель дросселирующего распределителя (рис. 1, а).

В системе KompasFlow расчетной областью является объем жидкости внутри элементов конструкции, поэтому для расчета необходимо выделить данную область внутри корпуса дросселя как самостоятельный замкнутый объем. Для решения данной задачи при помощи стандартных инструментов КОМПАС-3D была проведена операция выделения проточной части. Так как в данном исследовании золотник находится в положении, когда линия подвода P соединена с рабочей линией A (левое положение, рис. 1, б), то для построения проточной области используем только этот канал (рис. 1, в, г).

В качестве рабочей среды задается масло индустриальное И-46ПВ со следующими характеристиками: вязкость – 0,035 кг/(м · с); плотность – 877 кг/м³; температура рабочей среды – 40 °С; теплопроводность – 0,136 Вт/(м · К); удельная теплоемкость – 1950 Дж/(кг · К).

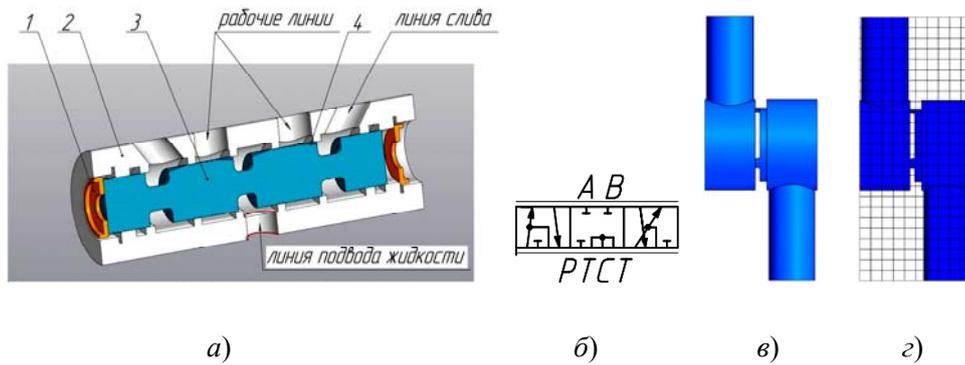


Рис. 1. Твёрдотельная модель дросселирующего распределителя:
 а – разрез по оси; б – условное графическое обозначение;
 в – модель проточной полости; г – расчетная сетка;
 1 – упорное кольцо; 2 – корпус; 3 – золотник;
 4 – дросселирующая проточка

Были установлены следующие граничные условия: вход, выход, стенка, для которых заданы массовый расход на входе 3,65 кг/с и давление на выходе – 31 МПа.

Для визуализации были созданы визуализационные слои (рис. 2): сечение по расчетной сетке; распределение векторов скоростей; линии тока при течении; скорость в основной плоскости (сечение по оси золотника) и скорость в проточке (в плоскости, перпендикулярной оси золотника и проходящей через вход жидкости в дросселирующую канавку).

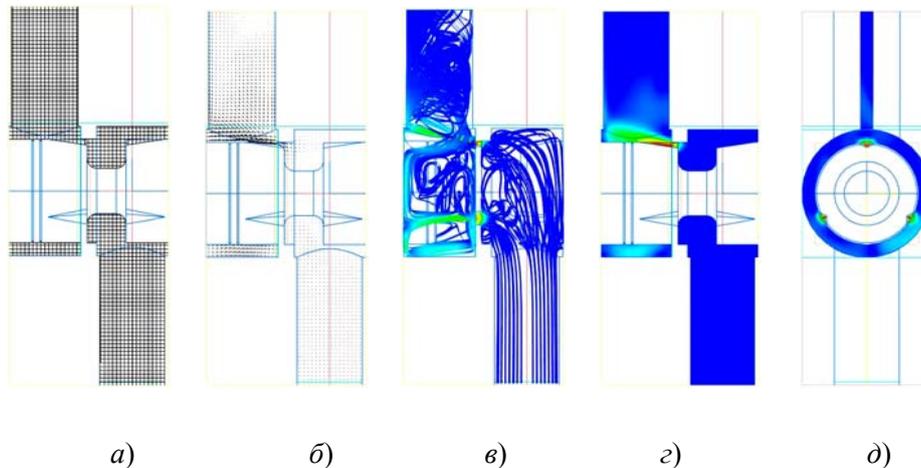
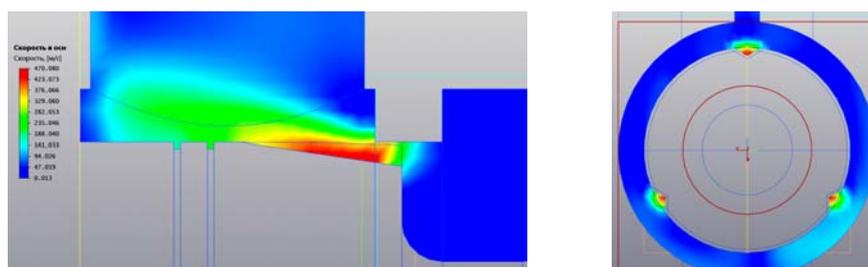


Рис. 2. Визуализационные слои:
 а – расчетная сетка; б – векторы; в – линии тока; г – скорость
 в основной плоскости; д – скорость в дросселирующей канавке

Приложение KompasFlow за счет встроенного решателя позволяет наблюдать течение жидкости, определять без длительных математических расчетов величины скоростей и их распределение по сечению (рис. 3). В данном случае при заданном расходе через золотник – 250 л/мин и диаметре условного прохода – 20 мм скорости течения через дросселирующие пазы в наиболее узком сечении достигают 450 м/с. Кроме того, в верхней дросселирующей канавке скорости больше, чем в боковых канавках из-за траектории течения жидкости в проточной области распределителя.



а)

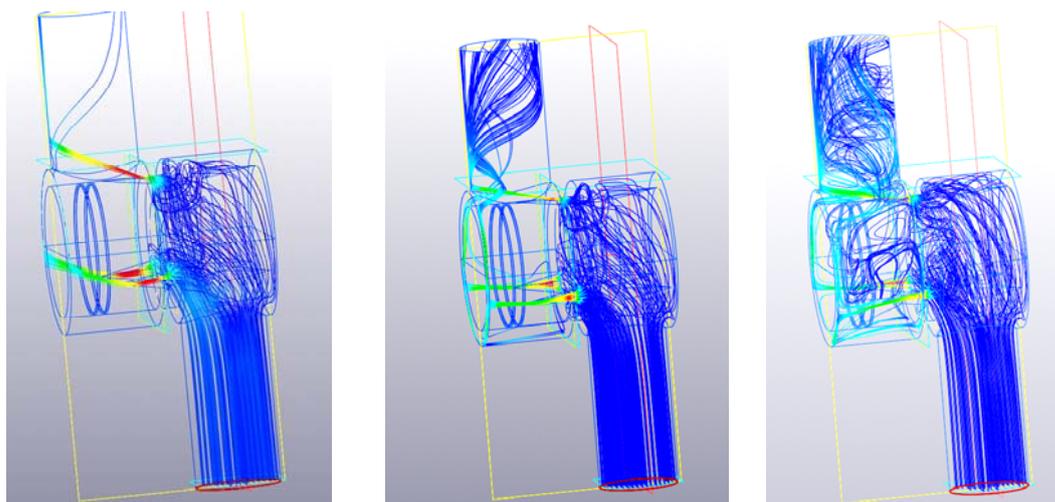
б)

Рис. 3. Результат расчета:

а – распределение скоростей в основной плоскости;

б – распределение скоростей в дроселирующей канавке

Данное приложение позволяет визуализировать течение потока жидкости (слой «линии тока») с помощью трех режимов отрисовки: линии, ленты и трубки. Причем первый режим является менее энергозатратным. Данный слой позволяет наблюдать развитие течения жидкости через аппарат во времени (рис. 4).



а)

б)

в)

Рис. 4. Линии тока:

а – в первоначальный момент; б – в промежуточный момент расчета;

в – в установившемся режиме

Таким образом, применение приложения KompasFlow позволяет с достаточной точностью определять распределение скоростей внутри потока жидкости, визуализировать течение жидкости в гидравлических аппаратах, производить анализ геометрии проточной части гидроаппаратов, определять наличие конструктивных элементов детали с более высокой вероятностью разрушения и производить оперативное изменение конструкции без изготовления опытного образца и проведения длительных ресурсных испытаний. Однако данное приложение некорректно производит расчет давления при течении жидкой среды, так как разработано для моделирования течения газообразных потоков.

Литература

1. КОМПАС-3D V17 : рук. пользователя / АСКОН – Системы проектирования. – СПб. : ОАО «Аскон – Системы проектирования», 2017. – 2920 с.
2. Kompas Flow. Система гидродинамического и термодинамического экспресс-анализа для КОМПАС-3D : рук. пользователя / АСКОН – Системы проектирования. – СПб. : ОАО «Аскон – Системы проектирования», 2018. – 2920 с.
3. Распределители гидравлические секционные типа РАМ-20/3 : каталог изделий Гомел. ОАО «ГСКТБ ГА». – Гомель : ОАО «ГСКТБ ГА», 2010.

УДК 004.9

**ВЛИЯНИЕ ЦВЕТА PLA НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ИЗДЕЛИЙ,
НАПЕЧАТАННЫХ НА 3D-ПРИНТЕРЕ**

А. А. Михальченко

*Учреждение образования «Белорусский государственный
университет транспорта», г. Гомель*

В последнее время количество принтеров для потребителей стремительно увеличивается, и они составляют большую часть рынка 3D-принтеров. Среди них преобладают принтеры с открытым исходным кодом RepRap. Эти принтеры имеют потенциал для использования в более масштабном производстве. Недавнее исследование показало, что детали, напечатанные на принтере с технологией RepRap, могут соответствовать и даже превосходить по производительности и прочности на разрыв при использовании тех же полимеров коммерческие 3D-принтеры, использующие запатентованную технологию FDM. Однако прочность на разрыв набора образцов, изготовленных на принтерах с технологией RepRap, колеблется. Чтобы объяснить эти колебания, в данном исследовании определяется влияние цвета и температуры обработки на свойства материала Lulzbot TAZ, полученного из PLA пяти различных цветов.

Ключевые слова: механические свойства; распределенное производство; RepRap; цвет пластика; кристалличность.

**THE EFFECT OF PLA COLOR ON THE PROPERTIES
OF MATERIALS OF PRODUCTS PRINTED ON A 3D PRINTER**

A. A. Mikhalchenko

Educational Institution “Belarusian State University of Transport”, Gomel

Recently, the number of printers for consumers has been rapidly increasing, and they make up a large part of the 3D printer market. RepRap open source printers are among them. These printers have the potential to be used in larger scale production. A recent study has shown that the details printed on a printer with RepRap technology can match and even exceed in performance and tensile strength when using the same polymers, commercial 3D printers using the patented FDM technology. However, the tensile strength of a set of samples made on printers with RepRap technology varies. To explain these fluctuations, this study determines the effect of color and processing temperature on the properties of the Lulzbot TAZ material obtained from PLA of five different colors of colors.

Keywords: mechanical properties; distributed production; RepRap; plastic color; crystallinity.

В настоящее время на рынке представлено множество различных материалов для трехмерной печати, включая ABS, нейлон, поликарбонат, полиэтилен высокой плотности, высокопрочный полистирол, PLA (полилактид) и др. PLA стал одним из фаворитов среди пользователей потребительских 3D-принтеров. PLA имеет отно-

нительно низкую температуру плавления (150–160 °C), поэтому для печати из этого материала требуется меньше энергии, что также дает преимущества для применения в автономных сетях в развивающихся странах. Современные исследования описывают влияние ориентации слоев на свойства при использовании порошковых принтеров, а использование принтеров с методом послойного наплавления (FDM) показало зависимость прочности от различных типов рисунков заполнения и внутренних структур [1]. Также на коммерческих принтерах была продемонстрирована разница в адгезии слоев при печати деталей с использованием различных параметров изготовления, включая температуру [1]. Недавно было проведено исследование механических свойств деталей, которое показало, что образцы RepRap могут соответствовать и даже превосходить коммерческие 3D-принтеры, использующие запатентованный FDM, в плане прочности на разрыв с теми же полимерами [2]. Предварительная оценка результатов показала, что некоторые различия в прочности могут быть связаны с цветом нити. Уже было доказано, что полимеры содержат различные степени кристалличности в зависимости от обработки и температуры [2].

Методы и материалы. Тестовые образцы были напечатаны на 3D-принтере Lulzbot TAZ 4 с открытым исходным кодом с использованием PLA нити, диаметром 3 мм, от Lulzbot следующих цветов: прозрачный, белый, черный, серебристый и синий. Все детали были напечатаны с идентичными параметрами при температуре 190 °C – для экструдера и 60 °C – для платформы сборки. Образцы печатались со 100%-м заполнением и чередующимся рисунком заполнения. Кроме того, белые образцы печатались при различной температуре экструдера: от 190 до 215 °C. Затем напечатанные образцы подвергались испытаниям на растяжение. В испытаниях на растяжение и испытаниях на разрыв использовалось по десять образцов различных цветов, напечатанных при 190 °C, и по пять образцов, напечатанных при повышенной температуре. Для проведения данного испытания использовалась машина серии ProLine с программным обеспечением фирмы «ZwickRoell». Технические характеристики: диапазон измерения сил (нагрузок) – от 5 до 10000 Н (от 0,5 до 1000,0 кгс); погрешность $\pm 1,0\%$. На рис. 1 представлены образцы, прошедшие испытания на растяжение и на разрыв, изготовленные из PLA-пластика белого цвета при температуре 190 °C.

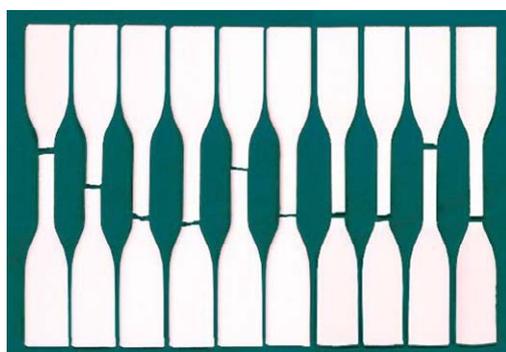


Рис. 1. Образцы из PLA-пластика белого цвета, изготовленные при температуре 190 °C, после испытаний на разрыв и растяжение

Результаты. Результаты исследований показывают, что процентная кристалличность деталей зависит от цвета, как показано в таблице. Прозрачный PLA (без добавления красителя) содержит самый низкий процент кристаллических областей – 0,93 %. Напротив, белый материал содержит наибольший процент кристаллических областей – 5,05 %. В таблице показаны предел прочности при растяжении, деформация при данном пределе прочности при растяжении и средние значения процента кристалличности для каждого цвета вместе с соответствующими ошибками.

Предел прочности при растяжении, максимальная деформация и процент кристалличности в зависимости от цвета PLA

Цвет	Предельная прочность, МПа	Предел текучести, МПа	Максимальное напряжение, %	Кристалличность, %
Прозрачный	57,16 ± 0,35	52,47 ± 0,35	2,35 ± 0,05	0,93 ± 0,06
Черный	52,81 ± 1,18	49,23 ± 1,18	2,02 ± 0,08	2,62 ± 0,09
Серый	50,84 ± 0,23	46,08 ± 0,23	1,98 ± 0,04	4,79 ± 0,10
Синий	54,11 ± 0,30	50,10 ± 0,30	2,13 ± 0,02	4,85 ± 0,15
Белый	53,97 ± 0,26	50,51 ± 0,26	2,22 ± 0,04	5,05 ± 0,18

Обсуждение. Представленные данные подтверждают утверждение о том, что 3D-принтеры RepRap могут производить детали с равной или большей прочностью на растяжение, чем детали, полученные с помощью 3D-принтеров с технологией FDM. Стоит отметить, что все образцы имели достаточно постоянный модуль Юнга 2,78 ГПа (+/- 0,35), что находится в приемлемом диапазоне для PLA [3]. Каждый из представленных цветов при печати при температуре 190 °C имел различную прочность на разрыв и процент кристалличности. Это показывает, что для достижения желаемых свойств материала может быть принято решение о выборе цвета, с которым печатается деталь. Также показана относительная температурная зависимость прочности материала на разрыв и опять же процентной кристалличности. В то время как прочность на разрыв увеличивается с температурой, кристалличность возрастает от 190 °C до максимума при 210 °C и обратно снижается до более низкого значения при 215 °C. Используя эти данные, можно предположить, что может существовать критическая температура процентной кристалличности, присутствующей в данном материале. Это соответствует традиционной экструзии полимеров PLA, поскольку хорошо известно, что кристаллизация PLA может быть инициирована отжигом при температурах, выше температуры стеклования, но ниже температуры плавления для улучшения их термической стабильности [1, 2]. Поскольку сырой PLA имеет 0–1 % кристалличности [3] и представленные здесь данные соответствуют этому диапазону, добавление других красителей, усилителей или других агентов должно быть фактором, способствующим различным процентам кристалличности, наблюдаемым в окрашенных образцах. Различия в прочности при растяжении можно объяснить поведением самого материала. Когда кристалличность очень низкая, прочность зависит от самого материала, что приводит к высокой прочности на разрыв. Кристалличность увеличивается по мере увеличения температуры печати до достижения максимального значения, в данном случае – 210 °C, и снижается по мере увеличения температуры выше максимальной. Прочность на разрыв увеличивалась при каждой температуре, кроме 200 °C, что, возможно, связано с преимущественной

ориентацией кристаллических зерен перпендикулярно направлению, в котором образцы растягивались при этой температуре. На рис. 4 и 5 показана эта потенциальная зависимость, где при температуре 200 °С наблюдается минимальное значение как прочности, так и процентной кристалличности. При рассмотрении температурной зависимости прочности материала тенденция изменения прочности при растяжении в зависимости от кристалличности не прослеживается. После печати материала при температуре 215 °С прочность на разрыв становится выше, но процент кристалличности ниже критической кристалличности при 210 °С. Из-за слоистой природы процесса 3D-печати более высокая температура печати может дать различным слоям больше времени для сцепления друг с другом перед охлаждением до температуры стеклования.

Согласно результатам данного исследования для каждого цвета существует критическая температура печати для оптимизации кристалличности, исходя из результатов для белого материала. В будущем необходимо исследовать влияние температуры печати в зависимости от других цветов, чтобы создать матрицу свойств, позволяющую провести более полный выбор материала.

Литература

1. Polymer Recycling Codes for Distributed Manufacturing with 3D printers / E. J. Hunt [et al.] // Resources, Conservation and Recycling. – 2015. – Vol. 97. – P. 24–30.
2. Mobile Open-Source Solar-Powered 3D Printers for Distributed Manufacturing in Off-Grid Communities / D. L. King [et al.] // Challenges in Sustainability . – 2014. – N 2 (1). – P. 18–27.
3. Groenendyk, M. 3D printing and scanning at the Dalhousie University Libraries: a pilot project / M. Groenendyk, R. Gallant // Libr. Hi Tech. – 2013. – N 31 (1). – P. 34–41.

УДК 62-82-112.6

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МОНТАЖНОГО КОРПУСА ГИДРОБЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ МАШИН

В. В. Пинчук

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

А. А. Гинзбург

Открытое акционерное общество «Гомельское специальное конструкторско-техническое бюро гидроннеавтоматики», Республика Беларусь

О. К. Гурбан

Учреждение образования «Гомельский государственный профессионально-технический колледж электротехники», Республика Беларусь

Получены значения критерия оптимальности монтажного корпуса гидроблока управления машин, позволяющие выполнить параметрический синтез гидроблока управления с учетом условий эксплуатации машин и количества гидроаппаратов в гидросхеме привода.

Ключевые слова: гидроблоки управления, технологические машины, параметрический синтез.

**CALCULATION AND DESIGN OF THE MOUNTING HOUSING
FOR HYDRAULIC CONTROL UNITS OF MACHINES**

V. V. Pinchuk

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

A. A. Ginzburg

*Open Joint Stock Company "Gomel Special Design and Technical Bureau
of Hydropneumautomatics", the Republic of Belarus*

O. K. Gurban

*Educational Institution "Gomel State Vocational
College of Electrical Engineering", the Republic of Belarus*

The values of the criterion of optimality of the mounting body of the hydraulic control unit of machines are obtained, which make it possible to perform a parametric synthesis of the hydraulic control unit, taking into account the operating conditions of the machines and the number of hydraulic devices in the hydraulic circuit of the drive.

Keywords: hydraulic control units, technological machines, parametric synthesis.

Совершаемый в последнее время переход к агрегатному конструированию и в дальнейшем развивающаяся тенденция агрегатно-модульного конструирования гидроблоков управления (ГУ) гидроприводов технологических машин позволяет снизить негативное влияние фактора вариативности процесса проектирования на выходные показатели создаваемых ГУ (материало- и энергоемкость, затраты и сроки создания).

В свою очередь, внедрение в практику конструирования агрегатно-модульного подхода при создании гидроблоков управления гидроприводов технологического оборудования ставит задачу выработки рекомендаций оптимального их проектирования.

Вместе с тем при разработке конструкций гидроаппаратов монтажные корпуса, как правило, во внимание не принимаются, что ухудшает показатели конструкций ГУ в целом.

Установлено [1–3], что разработка и обоснование параметров монтажных корпусов гидроблоков управления позволяет выполнить проектирование гаммы компонентов агрегатно-модульных ГУ. Для оптимизации параметров монтажного корпуса гидроблоков управления получено выражение общего критерия оптимальности:

$$X = \left(C_1 \frac{V}{V^*} + C_2 \frac{S}{S^*} + C_3 \frac{\Delta P_B}{\Delta P_B^*} + C_4 \frac{\Delta P_\Gamma}{\Delta P_\Gamma^*} \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где C_1 – C_4 – коэффициенты взаимной важности критериев, назначаемые экспертным путем; ΔP_B – потери давления в вертикальных каналах монтажного корпуса, далее соединительно-монтажного модуля (СММ); ΔP_Γ – потери давления в горизонтальных каналах СММ; V и S – соответственно объем и полная поверхность СММ; ΔP_B^* , ΔP_Γ^* , V^* , S^* – нормирующие множители.

Однако общий критерий оптимальности СММ (1) лишь сужает допустимое множество вариантов проектируемой конструкции соединительно-монтажного модуля, задавая в нем множество компромиссных оптимальных проектов – область Парето. То есть оптимизировать параметры СММ возможно на основе исследований

общего критерия оптимальности X , используя в качестве варьируемых параметров коэффициенты важности критериев C_1 – C_4 и соотношения диаметров вертикальных d_v и горизонтальных d_r каналов, d_v/d_r [3]. Результаты таких исследований критерия X позволяют разработать алгоритм проектирования компонентов агрегатно-модульных ГУ для машин с различными условиями эксплуатации. Вместе с тем процесс оптимизации параметров СММ при таком подходе, без учета технологии его изготовления, существенно затруднен, так как в этом случае приходится рассматривать чрезмерно большое количество значений критерия оптимальности X .

Целью настоящего исследования является упрощение процесса оптимизации параметров СММ.

Методика проведения исследований. Для решения поставленной задачи проведем анализ общего критерия оптимальности СММ (1). При этом анализ формулы будем проводить с учетом технологического процесса (ТП) его изготовления, который в общем случае включает следующие операции: 1 – вертикально фрезерная (черновая); 2 – горизонтально фрезерная (черновая); 3 – шлифовальная (черновая); 4 – сверлильная; 5 – шлифовальная (чистовая).

Параметры, составляющие формулу (1), имеют разные размерности, но для упрощения расчета приведем их к стоимостному выражению. Для этого объем заготовки V будем отражать как стоимость использованного металла C_m . Площадь S обработанной поверхности СММ также отразим как стоимость обработки поверхностей C_o , используя стоимость нормочаса операций 1–3, 5 технологического процесса изготовления СММ. Потери мощности при проходе рабочей жидкости по каналам СММ, связанные с гидравлическими потерями давления $\frac{\Delta P_B}{\Delta P_B^*} + \frac{\Delta P_r}{\Delta P_r^*}$, определим

как стоимость энергии C_e , используя стоимость единицы мощности (например, кВт/ч электроэнергии).

Однако, учитывая ТП изготовления СММ, нам необходимо учесть операцию 4 – сверлильную. Для этого введем понятие «структура каналов СММ», которая учитывая ТП его изготовления, будет включать стоимость сверления каналов C_{cb} , ее можно оп-ределить на основе учета конфигурации каналов СММ, полученной при расчетах минимальных гидравлических потерь давления [2]. То есть в дальнейшем будем рассматривать:

$\frac{C_V}{C_V^*}$ – как отношение стоимостей объема первоначальной заготовки;

$\frac{C_S}{C_S^*}$ – как отношение стоимостей площадей обработанных поверхностей СММ;

$\frac{C_{cb}}{C_{cb}^*} + \frac{C_e}{C_e^*}$ – как стоимость структуры каналов СММ (включает стоимость

потерь энергии при проходе рабочей жидкости по каналам СММ и стоимость свер-ления этих каналов).

Таким образом, рубль (например) будет являться единым параметром для всех частей уравнения (1), а оптимизация будет сводиться к расчету минимальной стои-мости готового изделия.

Формула (1) примет следующий вид:

$$X = \left(C_1 \frac{\Pi_M}{\Pi_M^*} + C_2 \frac{\Pi_o}{\Pi_o^*} + C_3 \frac{\Pi_{св}}{\Pi_{св}^*} + C_4 \frac{\Pi_э}{\Pi_э^*} \right) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где Π_M – стоимость материала, руб.; Π_o – стоимость обработки (за операции фрезеровки и шлифовки), руб.; $\Pi_{св}$ – стоимость операции сверления каналов СММ, руб.; $\Pi_э$ – цена затраченной энергии на гидравлические потери давления в каналах СММ, руб.

Анализ формулы (2) показывает, что определение первых двух слагаемых затруднений не вызывает, так как стоимость материала, из которого предполагается изготавливать СММ, и трудоемкость, а следовательно, стоимость обработки его поверхностей являются широко распространенной информацией, которую можно легко получить, например, из общедоступных справочников [4]. В то же время оптимизация стоимости структуры каналов вызывает определенные затруднения из-за вариативности.

Анализ графиков на рис. 1 показывает, что на начальных этапах эксплуатации СММ расходы на сверления каналов $\Pi_{св}^{ij}$ превосходят расходы на затраты энергии $\Pi_э^{ij}$ в пределах 10–30 раз. Однако, если учитывать весь срок эксплуатации изделия, то даже за год эксплуатации при двухсменной работе оборудования (годовой фонд рабочего времени – 4018 ч) это соотношение резко изменяется в сторону увеличения $\Pi_э^{ij}$ против $\Pi_{св}^{ij}$ свыше 300 раз.

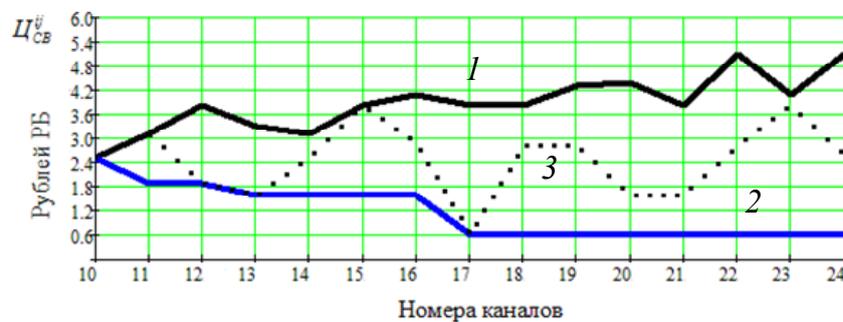


Рис. 1. Стоимость затрат $\Pi_{св}^{ij}$ на сверление каналов СММ (область Парето):

- 1 – стоимость затрат на сверление каналов СММ (верхняя граница области Парето);
- 2 – минимальная стоимость затрат на сверление каналов СММ;
- 3 – стоимость сверления каналов СММ, имеющих 9-е входное отверстие

Таким образом, при назначении коэффициентов важности критериев C_1 – C_4 по формуле (1), учитывая длительность срока эксплуатации СММ, которая может достигать 10 лет и более, затратами на стоимость материала (которая находится на уровне затрат на обработку) и обработку заготовки СММ можно пренебречь, а расчет и выбор оптимальной конструкции СММ вести исключительно на основе учета $\Pi_э^{ij}$.

Литература

1. Создание конструкций гидроприводов машин методом агрегатирования / А. Я. Оксененко [и др.]. – М. : НИИМАШ, 1985. – 77 с.
2. Пинчук, В. В. Минимизация гидравлических потерь давления в каналах соединительно-монтажного модуля при построении структурных схем агрегатно-модульных гидроблоков

- управления технологического оборудования / В. В. Пинчук, С. Ф. Андреев, Е. В. Иноземцева // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2016. – № 4. – С. 41–45.
3. Пинчук, В. В. Расчет и конструирование агрегатно-модульных гидроблоков управления гидроприводов технологических машин / В. В. Пинчук, В. К. Шеле. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 270 с.
4. Справочник технолога машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещярокова. – 4-е изд. – М. : Машиностроение. – 1986. – Т. 1. – 656 с.

УДК 004.942:532

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С АДАПТАЦИЕЙ К НАГРУЗКЕ В ПРОГРАММЕ
LMS Imagine.Lab AMESim**

А. С. Колодко, Ю. А. Андреев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Исследованы возможности применения программы LMS Imagine.Lab AMESim для моделирования гидравлических систем с адаптацией к нагрузке. Применение программы LMS Imagine.Lab AMESim позволяет в короткие сроки исследовать системы без физической модели, а также позволяет сразу оптимизировать систему. Помимо исследования отдельного элемента также можно исследовать несколько систем одновременно и то, как они между собой взаимодействуют. Возможности данного продукта позволяют проводить моделирование не только гидравлических систем, но и систем других видов. Произведено компьютерное моделирование гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке и дроссельным регулированием, получены характеристики систем с установкой дросселя на напорной и сливной гидролиниях, произведено сравнение параметров гидросистем.

Ключевые слова: гидропривод, моделирование, адаптация к нагрузке, LMS Imagine.Lab AMESim.

**SIMULATION OF THE HYDRAULIC SYSTEM
WITH ADAPTATION TO THE LOAD
IN THE LMS Imagine.Lab AMESim PROGRAM**

A. S. Kolodko, YU. A. Andreyevets

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The possibilities of using the LMS Imagine.Lab AMESim program for modeling hydraulic systems with load adaptation are studied. The use of the LMS Imagine.Lab AMESim program allows you to quickly investigate systems without a physical model, and also allows you to immediately optimize the system. In addition to studying a single element, it is also possible to study several systems at the same time and how they interact with each other. The capabilities of this product allow you to simulate not only hydraulic systems, but also systems of other types. A computer simulation of a hydraulic system with volumetric adaptation to the load and throttle control was performed, the characteristics of systems with a throttle installed on the pressure and drain hydraulic lines were obtained, and the parameters of the hydraulic systems were compared.

Keywords: hydraulic system, simulation, load adaptation, LMS Imagine.Lab AMESim.

AMESim – это система моделирования, позволяющая виртуально оценивать и оптимизировать производительность систем. Это возможность оптимизировать динамическое поведение гидравлических и пневматических компонентов, делая физическое прототипирование необязательным. Благодаря широкому выбору компонентов, функций и инструментов, Simcenter позволяет моделировать жидкостные системы широкого спек-

тра, такие как мобильные гидравлические приводные системы, системы силовых агрегатов или авиационные топливные системы и системы контроля окружающей среды [1–3].

Целью данной работы является исследование системы с адаптацией к нагрузке с дроссельным регулированием.

При моделировании с использованием AMESim реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом пользователю не нужно изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере, и знаний той предметной области, в которой он работает.

Объектом исследования в данной работе являются гидросистемы (рис. 1), в которых реализован принцип LS-регулирования (load sensing) – принцип адаптации к нагрузке, который используется в современных гидравлических приводах мехатронных систем. Принцип адаптации к нагрузке позволяет осуществлять регулирование входного давления системы по давлению на наиболее нагруженном рабочем органе, обеспечивает одновременное независимое управление при приемлемом уровне энергетических потерь, что расширяет область применения и технические характеристики системы.

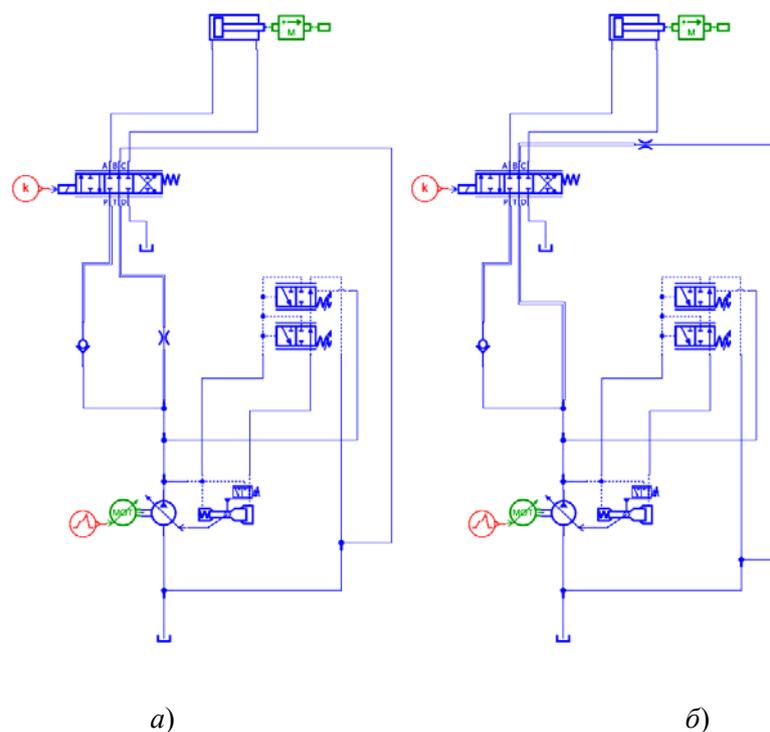


Рис. 1. Принципиальная схема гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке:
а – с регулятором давления золотникового типа и дросселем в напорной линии; *б* – с регулятором давления золотникового типа и дросселем в сливной линии

Исследуемая система состоит из одинакового набора элементов, принципиальным различием является место установки дросселя: на напорной линии до гидроцилиндра (рис. 1, *а*) и на сливной линии после цилиндра (рис. 1, *б*). Большинство элементов входит с библиотеку программы, однако не все. Программа позволяет разрабатывать ори-

74 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

гинальные гидроаппараты с помощью небольшого набора операций. Остальные параметры системы заданы самой программой автоматически.

Параметры системы: диаметр поршня равен 25 мм, диаметр штока – 12 мм, длина штока – 300 мм, расход жидкости – 0,02 л/мин; параметры на управляющем поршне: эквивалентная предварительная нагрузка пружины – 10 бар, дифференциальное давление пилота для минимального рабочего объема – 1 бар.

В результате моделирования в программе LMS Imagine.Lab AMESim получены графики изменения давления (рис. 2, а) и расхода (рис. 2, б) на гидродвигателе для исследуемых случаев установки дросселя в гидросистемах.

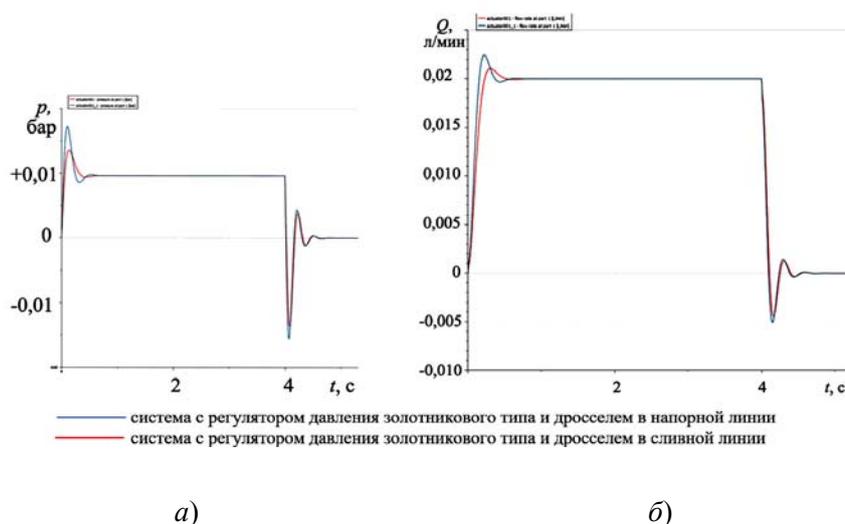


Рис. 2. Графики изменения параметров систем:
а – давления; б – расхода

Графически установлено, что система с дросселем, установленным после гидроцилиндра на сливной линии, имеет меньшую амплитуду пульсаций давления и расхода в начальный переходный период работы, т. е. обеспечивает более плавный запуск. В остальном же изменения давления и расхода абсолютно одинаковы.

На рис. 3 видна разница между регулирующим давлением. Также тут можно наблюдать, что при резком изменении параметров в системе происходит отдача давления для регулирования системы.

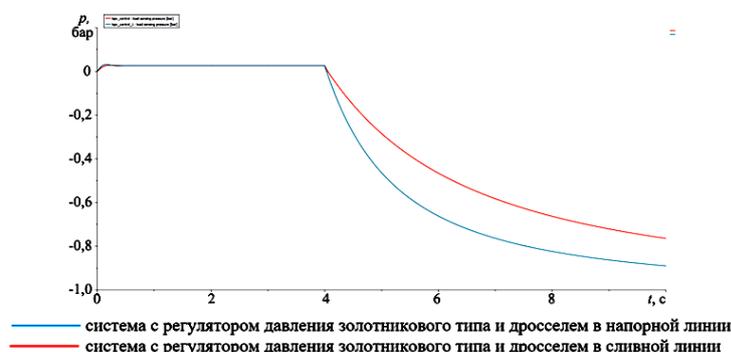


Рис. 3. Сравнение нагрузки давления в управляющих поршневых приводах

В данной работе был проведен анализ гидравлической системы в программе LMS Imagine.Lab Amesim. За счет широкой библиотеки элементов программный комплекс AMESim позволяет производить сложные исследования рабочего процесса гидро- или пневмопривода. Анализ данных систем позволил увидеть и сравнить результаты и выявить, что дроссель, установленный на сливе, обеспечивает более плавную работу системы.

Литература

1. Гимадиев, А. Г. LMS Imagine.Lab AMESim как эффективное средство моделирования динамических процессов в мехатронных системах / А. Г. Гимадиев, П. И. Грешняков, А. Ф. Синяков. – Самара : Изд-во Сам. НЦ РАН, 2014.
2. Мельниченко, М. С. Компьютерное моделирование гидросистем с LS-регулированием / М. С. Мельниченко, Ю. А. Андреевец, Д. Л. Стасенко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2019. – С. 45–48.
3. Хазеев, Е. В. Анализ имитационного моделирования гидравлических систем мобильных машин в различных программных комплексах / Е. В. Хазеев, Ю. А. Андреевец, К. В. Пупенко // Машиностроение: инновационные аспекты развития : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 26 апр. 2022 г. / Науч.-исслед. центр «Машиностроение». – СПб., 2022. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48655231_94822366.pdf.

УДК 629.114.2

АГРЕГАТИРОВАНИЕ БЕЛОРУССКИХ ТРАКТОРОВ С РОССИЙСКИМИ НАВЕСНЫМИ МАШИНАМИ

В. Б. Попов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

В. П. Бойков

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Результаты агрегатирования машинно-тракторных агрегатов на базе тракторов «БЕЛАРУС» зависят от параметров их подъемно-навесных устройств. Рациональный выбор последних улучшает количественные показатели агрегатирования.

Ключевые слова: сельскохозяйственный трактор, подъемно-навесное устройство, навесная машина, передаточное число, устойчивость.

AGGREGATION OF BELARUSIAN TRACTORS WITH RUSSIAN MOUNTED VEHICLES

V. B. Popov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

V. P. Boykov

Belarusian National Technical University, Minsk

76 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

The results of aggregation of machine-tractor units based on tractors "BELARUS" depend on the parameters of their lifting and attachment devices. The rational choice of the latter improves the quantitative indicators of aggregation.

Keywords: agricultural tractor, lifting and attachment device, mounted machine, gear ratio, stability.

Машинно-тракторный агрегат (МТА), состоит из сельскохозяйственного трактора и агрегируемых с ним навесной машины (НМ) или орудия. Наличие широкого шлейфа сменного рабочего оборудования позволяют МТА успешно решать проблему механизации труда в случаях, когда применение специализированных машин нецелесообразно.

Использование в сельском хозяйстве стран СНГ прогрессивных технологий возделывания и уборки сельскохозяйственных культур с применением НМ или орудий на базе тракторов «БЕЛАРУС» позволяет модернизировать комплексы машин. Это содействует широкомасштабному применению почвообрабатывающих машин и комбинированных почвообрабатывающе-посевных агрегатов с активными и активно-пассивными рабочими органами.

Агрегатирование тракторов с НМ существенно зависит от выходных параметров подъемно-навесного устройства (ПНУ) трактора, определяющих количественную оценку и качественный характер агрегатирования. Подъемно-навесное устройство (ПНУ) как часть трактора функционирует в трех основных режимах [1] – рабочем, транспортном и режиме перевода навесной машины из рабочего положения в транспортное.

Для большинства отечественных МН его 2D-модель, полученная из 3D-модели проецированием центров шарниров МН на продольную плоскость симметрии трактора, представляет одноподвижный восьмизвенный шарнирно-рычажный механизм (рис. 1, б).

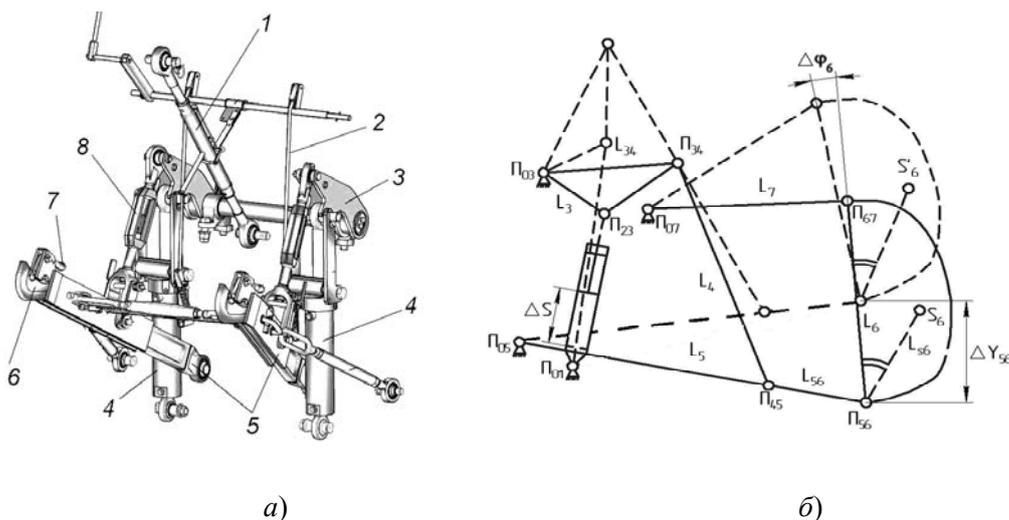


Рис. 1. Подъемно-навесное устройство трактора (а) и схема плоского аналога механизма навески в рабочем и транспортном положениях (б):

- 1 – тяга верхняя; 2 – тяга механизма фиксации; 3 – рычаг поворотный; 4 – гидроцилиндры; 5 – тяги нижние;
6 – захват; 7 – ручка фиксатора; 8 – раскос

Тяги МН через присоединительный треугольник (рис. 1, а) связаны с НМ, принимаемой за выходное звено МН. Рама трактора, звенья МН и НМ вместе образуют замкнутую кинематическую цепь. Расчет выходных параметров МН проводится на базе его плоского аналога. Изменение входной координаты (ΔS) МН однозначно связано с изменением его выходных координат ($\Delta\varphi_6, \Delta Y_{S6}, \Delta X_{S6}$).

Большинство выходных параметров МН определяются в режиме перевода НМ из рабочего положения в транспортное. Геометрический анализ замкнутой кинематической цепи выполняется по методу замкнутых векторных контуров [2]. В результате определены координаты подвижных шарниров МН и характерных точек замкнутой кинематической цепи, например, координаты оси подвеса МН – Π_{05} :

$$X_{S6}(S) = X_{05} + L_{S6} \cos \varphi_5(S); \quad Y_{S6}(S) = Y_{05} + L_{S6} \sin \varphi_5(S), \quad (1)$$

где X_{05}, Y_{05} – координаты неподвижного шарнира Π_{05} на раме УЭС; φ_i – угол, образуемый соответствующим звеном, в правой декартовой системе координат.

Координаты характерной точки – центра тяжести НМ определяются как:

$$X_{S6}(S) = X_{S6}(S) + L_{S6} \cos[\varphi_6(S) + \varphi_{S6}]; \quad (2)$$

$$Y_{S6}(S) = Y_{S6}(S) + L_{S6} \sin[\varphi_6(S) + \varphi_{S6}], \quad (3)$$

где L_{S6} и φ_{S6} – характеристики вектора, проведенного от оси подвеса в центр тяжести рабочего орудия.

Аналитические выражения (1)–(3) представляют собой функции положения звеньев для МН и необходимы для формирования процедур кинематического и силового анализа.

Передаточное число МН представляет собой аналог вертикальной скорости центра тяжести навесной машины [3], зависящий от внутренних параметров МН и координат центра тяжести навесной машины относительно оси подвеса:

$$I_{S6}(S) = \varphi_3'(S) [L_{S6} \cos \varphi_5 + U_{65} L_{S6} \cos(\varphi_6 + \varphi_{S6})], \quad (4)$$

где $\varphi_3'(S)$ – аналог угловой скорости поворотного рычага; U_{53}, U_{65} – передаточные отношения, показывающие соотношения угловых скоростей звеньев; $\varphi_5(S), \varphi_6(S)$ – углы, образуемые аналогами звеньев в правой декартовой системе координат.

Развиваемая на штоке гидроцилиндра сила зависит от давления в его напорной полости $p_{гц}$, площади поршня $F_{п}$ и приведенных к штоку сил трения $F_{тр}^{np}(S)$ и инерции $F_{ин}^{np}(S)$:

$$F_{шт} = p_{гц} F_{п} - [F_{тр}^{np}(S) + F_{ин}^{np}(S)]. \quad (5)$$

Грузоподъемность ПНУ определяется весом поднимаемой НМ при максимально развиваемой силе $F_{шт}^{max}$ на штоке гидроцилиндра МН:

$$G_S = \frac{p_{гц}^{max} F_{п} - [F_{тр}^{np}(S^o) + F_{ин}^{np}(S^o)]}{I_{S6}(S^o)}, \quad (6)$$

где S° – значение обобщенной координаты, соответствующее максимальному значению передаточного числа МН.

Из выражения (6) следует, что для повышения грузоподъемности ПНУ за счет внутренних параметров МН следует уменьшать максимальное значение передаточного числа $I_{S_6}(S)$, величина которого связана с расположением центра тяжести конкретной НМ. Одновременно, как это следует из выражения (4), рекомендуется уменьшать и передаточное число на оси подвеса, зависящее только от внутренних параметров МН.

В режиме транспортного переезда для расчета параметра управляемости трактора составляется уравнение равновесия моментов сил, действующих на МТА относительно точки опоры В ведущих колес. Решив уравнение моментов сил, получим:

$$R_A = \frac{P_{тр}(a + L) + P_{тр}b - P_6 X_{S_6}}{L}.$$

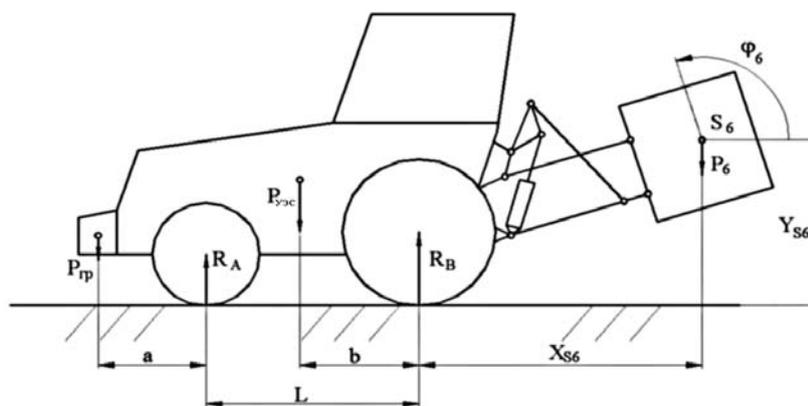


Рис. 2. Схема сил, действующих на МТА при поднятой навесной машине

Вместе с ограничением получим систему из уравнения и неравенства:

$$\begin{cases} R_A = \frac{P_{тр}b - P_6 X_{S_6} + P_{тр}(L + a)}{L}; \\ R_A \geq k(P_{тр} + P_6 + P_{тр}). \end{cases} \quad (7)$$

Решив систему (7), получим условие соблюдения управляемости МТА, которое состоит в ограничении веса, агрегируемой с трактором навесной машины:

$$P_6 \leq \frac{P_{тр}(b - kL) + P_{тр}[a + L(1 - k)]}{X_{S_6} + kL}. \quad (8)$$

В режиме транспортного переезда МТА из-за кинематического возбуждения со стороны микрорельефа [3] центры тяжести трактора и НМ совершают сложные колебания в продольной плоскости, получая ускорения, вызванные контактированием колес трактора с агрофоном. При этом нагрузка, передающаяся на тяги МН, также приобретает вероятностный колебательный характер, что приводит к переменному

характеру силового воздействия на раму трактора и перераспределению нормальных реакций между его мостами.

Расширение шлейфа навесного рабочего оборудования за счет зарубежных НМ позволяют тракторам «БЕЛАРУС» успешно решать проблему механизации труда в составе новых МТА. Примерами таких МТА могут служить тракторы «БЕЛАРУС 1523/1822» с плугом навесным ПЛН 5-35 и трактор «БЕЛАРУС 3022» с плугом ПЛН 8-35.

Расширение шлейфа навешиваемой техники косвенно способствует распространению как иностранной техники в Беларуси, так и отечественных тракторов за рубежом. При этом для оценки возможности агрегатирования белорусских тракторов с российскими НМ (в том числе плугами) необходимо, как минимум, выполнить расчеты по выражениям (4)–(7).

Литература

1. Попов, В. Б. Анализ режимов работы подъемно-навесного устройства универсального энергетического средства УЭС-290/450 «Полесье» / В. Б. Попов // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. / Объед. ин-т машиностроения НАНБ ; редкол.: А. А. Дюжев [и др.]. – Минск, 2012. – Вып. 1. – С. 99–102.
2. Попов, В. Б. Математическое моделирование подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В. Б. Попов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 251 с.
3. Попов, В. Б. Влияние колебаний мобильного сельскохозяйственного агрегата на его управляемость и нагруженность звеньев механизма навески / В. Б. Попов // Вестн. Брян. гос. с.-х. акад. – 2017. – № 6. – С. 43–51.

УДК 631.352.02

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ НОЖЕЙ ИЗМЕЛЬЧАЮЩЕГО БАРАБАНА НА ИХ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ

К. М. Михайлов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Выполнен расчет собственных частот и форм колебаний системы крепления ножа с демпфирующим покрытием базовых поверхностей ножей и без него. Полученные результаты позволили установить влияние условий крепления на виброустойчивость системы крепления.

Ключевые слова: кормоуборочный комбайн, измельчающий аппарат, виброустойчивость, нож измельчающего барабана.

INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE KNIVES LOCKING SYSTEM OF THE CHOPPING DRUM ON THEIR VIBRATION RESISTANCE

K. M. Mikhailov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The calculation of natural frequencies and modes of oscillation of the knife attachment system with and without damping coating of base surfaces of knives is carried out. The results obtained made it possible to establish the influence of fastening conditions on the vibration resistance of the fastening system.

Keywords: Forage harvester, chopping drum, vibration resistance, chopping drum knife.

80 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

Важным технологическим параметром работы измельчающего аппарата является не только измельчение растительной массы, но и ее дальнейшая транспортировка. Улучшение транспортировки облегчает работу ускорительного барабана, создающего плотный поток измельченной массы [1].

С целью повышения транспортирующей способности создана модель ножа с плавно изогнутой гранью, поверхность которой выступает в роли лопатки [2]. Загнутые вперед по ходу вращения ножи обеспечивают высокое давление воздуха и, следовательно, большую транспортирующую способность.

Согласно проведенным ранее расчетам оптимальным креплением такого ножа является четырехболтовое крепление [2].

В процессе работы возникают динамические воздействия на измельчающий нож, что снижает надежность его крепления.

Целью работы является повышение надежности работы измельчающего аппарата.

Методика исследований. Исследование влияния параметров системы крепления ножей измельчающего барабана на их виброустойчивость производилось путем сравнения форм и собственных частот колебаний ножей с различными вариантами условий контакта.

Для проведения исследований разрабатывалась 3D-модель узла крепления ножей измельчающего барабана (рис. 1).

Собственные частоты определялись методом конечных элементов [2]. На рис. 1 представлена модель системы крепления ножа, разбитая сеткой на конечные элементы. Максимальный размер элемента сетки – 2 мм.

В исследованиях учитывалось влияние композиционных покрытий на основе эпоксиполиэфирных смол, наносимых на базовую поверхность ножа.

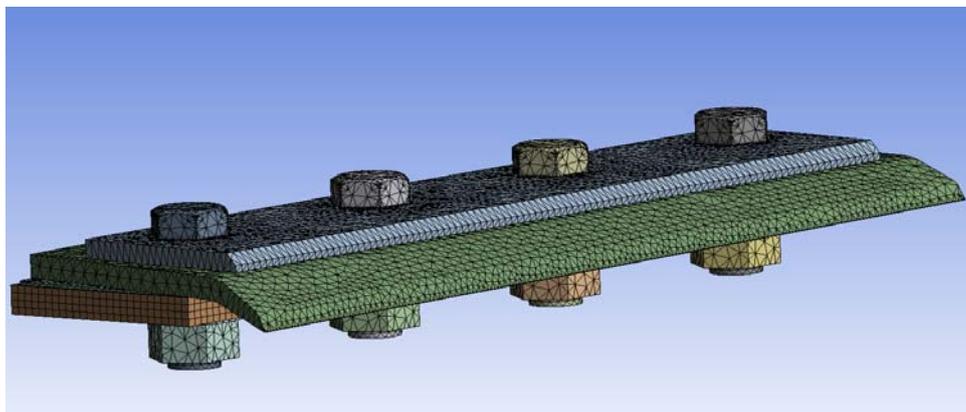


Рис. 1. 3D-модель, разделенная на конечные элементы

Результаты исследований. В таблице приведены собственные частоты 6 форм двух моделей системы крепления ножа.

Собственные частоты

Вариант модели	Частота, Гц					
	Формы собственных колебаний					
	1	2	3	4	5	6
Базовая	1983	2063	2563	3109	3422	3718
С демпфирующим слоем	2054	2154	2510	3036	3764	3809

Картины собственных колебаний системы креплений ножа для двух вариантов моделей представлены на рис. 2 и 3.

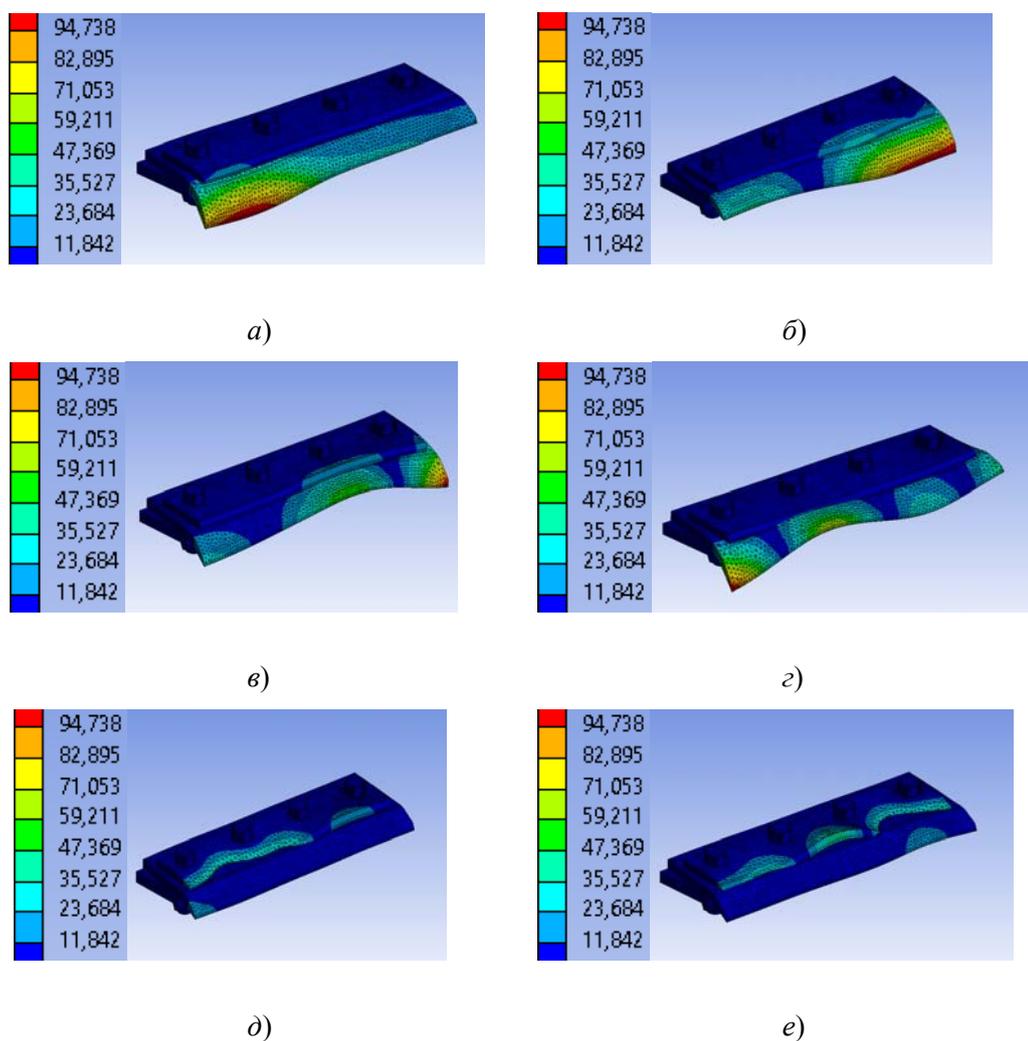


Рис. 2. Картины форм собственных колебаний системы креплений ножа первого варианта:
а – первая; *б* – вторая; *в* – третья; *г* – четвертая;
д – пятая; *е* – шестая

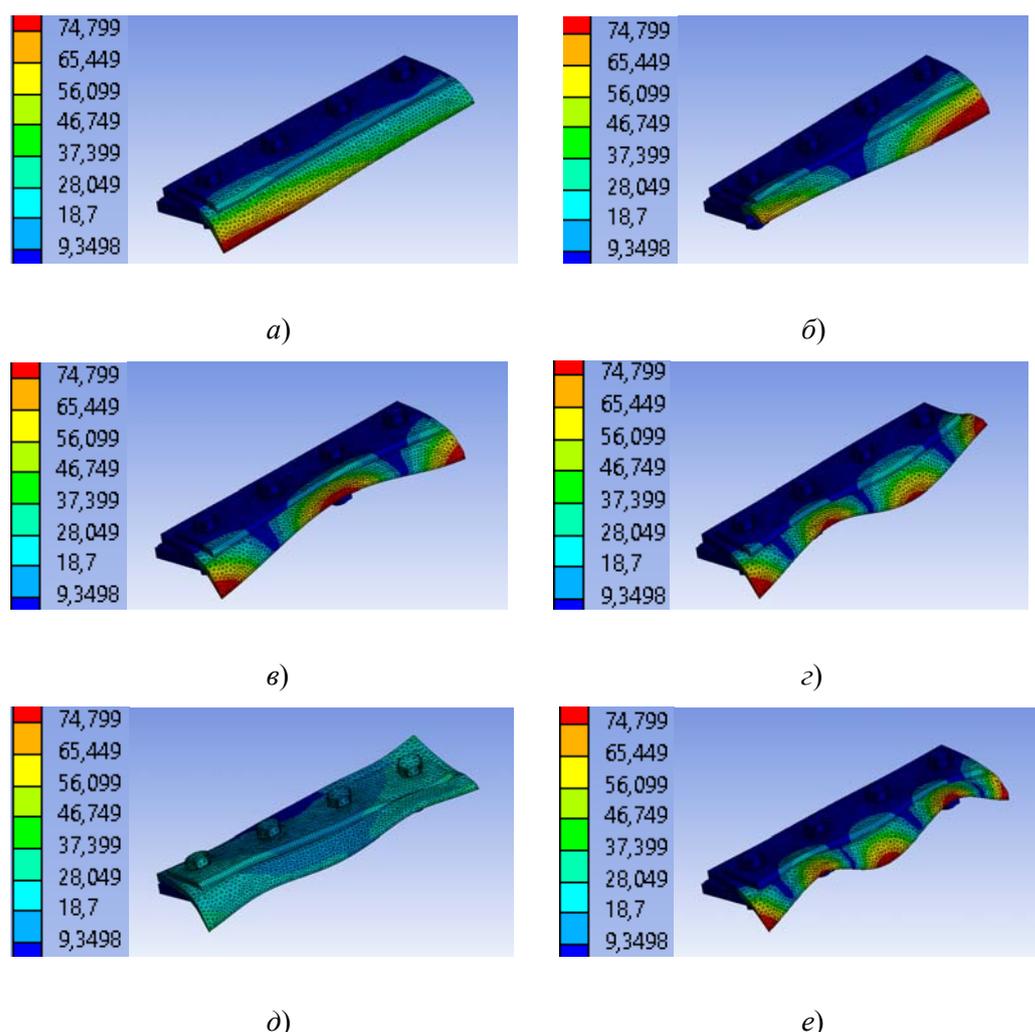


Рис. 3. Картины форм собственных колебаний системы креплений ножа с демпфирующим слоем:
 а – первая; б – вторая; в – третья; г – четвертая;
 д – пятая; е – шестая

Как видно на рис. 2 и 3, применение демпфирующего покрытия приводит к уменьшению относительных амплитуд колебаний и повышению виброустойчивости системы крепления.

Литература

1. Резник, Н. Е. Кормоуборочные комбайны / Н. Е. Резник. – М. : Машиностроение, 1980. – 375 с.
2. Михайлов, К. М. Исследование влияния технологических параметров ножей режущего барабана на его напряженно-деформированное состояние / К. М. Михайлов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XV Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2015 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2015. – С. 71–74.
3. Оценка стойкости ножей питающе-измельчающих аппаратов сельскохозяйственных комбайнов: теория, стендовые и полевые испытания / А. А. Новиков [и др.] // Вестн. Белорус. гос. ун-та транспорта: Наука и транспорт. – 2016. – № 1 (32). – С. 201–208.

СЕКЦИЯ 2. СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАНОМАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 678

ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ И АГРЕГАТОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ф. А. Насонов^{1,2}, Б. Б. Морозов¹

¹Публичное акционерное общество
«Объединенная авиастроительная корпорация» ОКБ Сухого,
г. Москва, Российская Федерация

²Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
Российская Федерация

Рассмотрен и проанализирован проблемный аспект определения прочности клеевых соединений деталей из композитов, включающий, в частности, высокую трудоемкость и низкую информативность некоторых стандартных методов, а также отсутствие полной эквивалентности этих показателей фактическим значениям в реальных деталях и агрегатах. Даны альтернативные способы оценки прочности клеевых соединений деталей из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, клеевые соединения, прочность клеевых соединений.

QUESTION OF STRENGTH DETERMINATION OF ADHESIVE JOINTS OF PARTS AND AGREGATES MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

F. A. Nasonov^{1,2}, B. B. Morozov¹

¹Public Joint Stock Company "United Aircraft Corporation"
Sukhoi Design Bureau, Moscow, Russian Federation

²Moscow aviation institute (national research university),
Russian Federation

The paper considers and analyzes the problematic aspect of determining the strength of adhesive joints of composite parts, in particular, the high labor intensity and low information content of some standard methods, as well as the lack of full equivalence of these indicators to the actual values in real parts and aggregates. Alternative methods of assessing the strength of adhesive joints of parts from PCM are considered.

Keywords: polymer composite material, adhesive joint, strength of adhesive joints.

Один из способов снижения общей трудоемкости изготовления и стоимости изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) – повышение степени их интегральности, когда финишное изделие изготавливается за один цикл формования и представляет собой комбинацию предварительно сформированных элементов, имеющих различную конфигурацию, внутреннее строение либо функциональное на-

значение. Однако не всегда максимальное интегрирование компонентов в единую деталь экономически оправдано, так как обратными сторонами этого являются усложнение технологической оснастки, усложнение процессов формования, а также повышение риска выбраковки сложного изделия из-за дефектов в его составных частях, которые не могут быть выявлены на более ранних стадиях вследствие их совместного формования.

В этой связи актуальными остаются вопросы соединения композиционных изделий. Детали из ПКМ могут соединяться с помощью клеевых, резьбовых соединений, с помощью механического крепежа, а также применяются комбинированные способы соединений. Целью данной работы является определение возможных методов измерения прочности клеевых соединений композитов с учетом прочности, получаемой в реальных изделиях при изготовлении.

Широкому применению клеевых соединений в ответственных изделиях препятствует сложность контроля их качества. Существующие способы неразрушающего контроля (например, акустические, тепловые, радиационные) позволяют качественно оценить зону склейки деталей. Количественная оценка прочности склейки может быть получена только разрушающими методами.

Одним из способов оценки качества является определение прочности клеевого соединения при сдвиге, например, по стандартам ГОСТ 14759–69, ГОСТ Р 57834–2017. К достоинствам рассмотренного метода можно отнести его относительную простоту. Метод достаточно давно используется в лабораториях и на производственных предприятиях, не требует сложного специфического оборудования либо приспособлений. С помощью рассматриваемого метода возможно проведение оценки прочности клеевого соединения разнородных материалов (рис. 1).

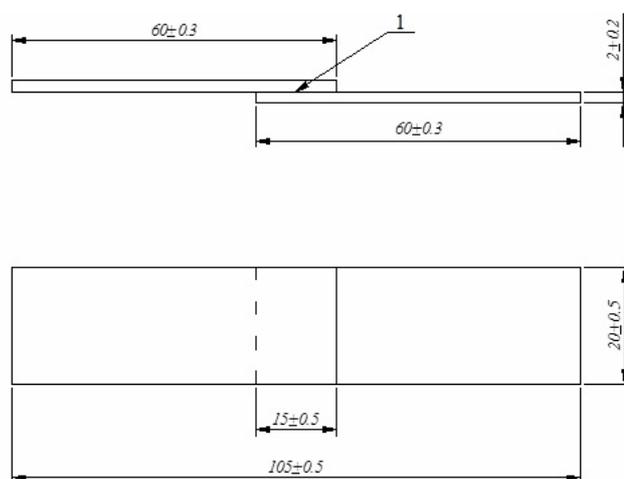


Рис. 1. Схема стандартного образца:
1 – клеевой слой

Однако упомянутый выше метод не лишен недостатков. Как показано в [1], при нагружении нахлесточного соединения, особенно при недостаточной жесткости пластин, возникает явление искажения результатов из-за высокого уровня изгибающих и отслаивающих усилий. Для исключения влияния отрывающих напряжений изменяют конфигурацию образцов. Используют образцы с двунахлесточным соединением (рис. 2). Действительно, клеевое соединение в таких образцах нагружено более

равномерно. Однако образцы существенно более трудоемки в изготовлении и также не лишены основного недостатка применительно к образцам-свидетелям – не полностью повторяют особенности контролируемого изделия.

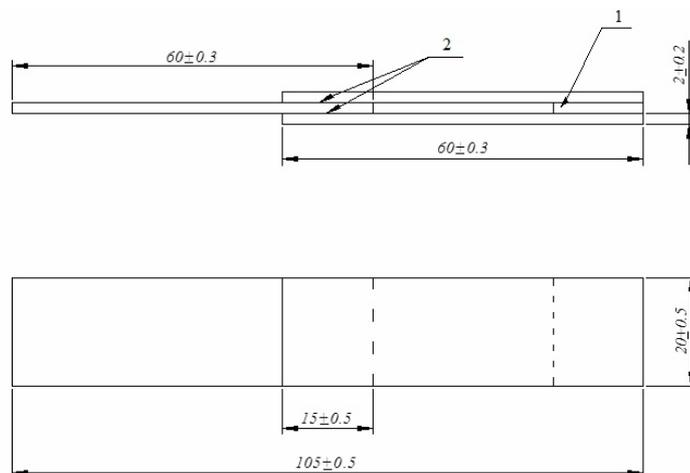


Рис. 2. Схема образца двойной нахлесткой:
1 – прокладка; 2 – клеевой слой

В связи с тем, что при производстве изделий из ПКМ наиболее часто встречаются соединения однородных материалов, предлагается проводить оценку сдвиговой прочности клеевых соединений также с помощью испытаний на трехточечный изгиб короткой балки (ОСТ 1 90199–75). Предлагаются следующие способы изготовления и испытания образцов-свидетелей:

1. Одновременно с деталями, в последующем подлежащими склейке, из тех же материалов и по тому же технологическому процессу изготавливаются плоские пластины толщиной 3 мм.

2. Одновременно с поверхностями деталей, предназначенных под склейку, и по одному и тому же технологическому процессу производится подготовка поверхности пластин.

3. Одновременно со склеиваемыми деталями по одному и тому же режиму склейки производится склеивание пластин.

4. Из пластин производится вырезка и испытание образцов для определения прочности при межслоевом сдвиге путем испытаний на изгиб.

Разрушение образцов должно происходить от сдвиговых напряжений, достигающих максимума на середине сечения образца, т. е. по клеевому шву. Необходимо подчеркнуть, что условия склейки образцов-свидетелей при предлагаемом методе определения прочности клеевого шва абсолютно идентичны реализуемым на склеиваемом изделии – полностью повторяются способ подготовки поверхности, способ приложения давления и температуры (при необходимости), длительность выдержки, а также учитывается масштабный фактор. В случае соединения деталей, идентичных по толщине, образцы-свидетели могут вырезаться из технологического припуска изделия, что способствует повышению достоверности результатов испытаний. Предлагаемый способ испытаний клеевого соединения может быть полезен при выполнении экспериментальных работ. С его помощью достаточно просто реализовать исследование зависимости сдвиговой прочности клеевого соединения от толщины

клеевого шва [2]. Это особенно актуально для оценки свойств зазорозаполняющих клеевых композиций, широко применяемых при сборке изделий авиационной техники. В настоящее время в ОКБ Сухого проводится экспериментальная работа по оценке влияния толщины клеевого шва, выполненного с использованием зазорозаполняющего клея [3], на прочность соединения эпоксипластиков. Некоторые результаты представлены в таблице.

Зависимость результатов предела прочности при сдвиге методом изгиба от толщины клеевой прослойки

Толщина клеевого шва, мм	Предел прочности при сдвиге, МПа
0,2	9,2
1,0	5,4
1,3	6,1

Необходимо обратить внимание на адгезионный характер разрушения образцов, по которым представлены результаты испытаний. Таким образом, имеется резерв по повышению прочности клеевых соединений за счет организации когезионного механизма разрушения (улучшение сочетаемости компонентов, подготовка поверхности и др.).

Л и т е р а т у р а

1. Выбор конструктивно-технологических параметров при ремонте авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов / Ф. А. Насонов, Б. Б. Морозов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2014. – № 12. – С. 11–16.
2. Influence of adhesive bond line thickness on joint strength of composite aircraft structures / V. Kostin, F. Nasonov, A. Zinin // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – N 19. – P. 012070. DOI 10.1088/1742-6596/1925/1/012070
3. Mode of access: <https://itecma.ru/products/klei-i-kleevye-plenki/temperatura-ekspluatatsii-do-180-s/50/>. – Date of access: 27.08.2022.

УДК 621.891:620.22

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНОЙ МИКРОРАЗМЕРНОЙ МЕДНОЙ МАТРИЦЫ И НАНОРАЗМЕРНОГО УГЛЕРОДНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ

В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун

*Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты*

*Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»,
г. Минск*

Разработана теоретическая модель формирования структуры порошковых композиционных материалов на основе дисперсной микроразмерной медной матрицы и наноразмерного углеродного наполнителя, основанная на рассмотрении протекающих физических процессов структурообразования на технологических стадиях активирования, уплотнения, упругого и пластического деформирования, спекания. Модель учитывает форму, размеры и свойства исходных дисперсных компонентов различного структурного уровня и позволяет прогнозировать прочностные и теплофизические характеристики композитов, получаемых с использованием методов механоактивации, прессования и электродного спекания.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, медь, порошковые композиционные материалы, теоретическая модель.

THEORETICAL MODEL OF THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF COMPOSITES BASED ON A DISPERSED MICROSIZED COPPER MATRIX AND A NANOSIZED CARBON FILLER

V. N. Pasovets, V. A. Kovtun

State Educational Institution "University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus", Minsk

A theoretical model of the formation of the structure of powder composite materials based on a dispersed microsized copper matrix and a nanosized carbon filler has been developed. This model is based on the consideration of the physical processes of structure formation at the technological stages of activation, compaction, elastic and plastic deformation, and sintering. This model takes into account the shape, size and properties of the initial dispersed components. This model makes it possible to predict the strength and thermal characteristics of the obtained composites.

Keywords: carbon nanotubes, copper, powder composite materials, theoretical model.

В широкой номенклатуре машиностроительных композитов особое место занимают порошковые материалы, в состав которых введены наполнители с наноразмерными частицами [1]. Данные материалы по устоявшейся терминологии относят к нанокомпозитам. При этом наиболее часто в качестве наноструктурного наполнителя применяют углеродные нанотрубки (УНТ). Формирование структуры и свойств таких композиционных материалов происходит постадийно. Основными стадиями при этом являются активирование, уплотнение, упругое и пластическое деформирование, спекание. Цель работы состояла в теоретическом описании процесса формирования структуры и свойств композиционных материалов на основе медной порошковой матрицы и УНТ.

Стадия активирования. На стадии активирования выполняется предварительная подготовка порошковой смеси, состоящей из микро- и наноразмерных компонентов. Для распределения наноструктур углерода в металлической матрице обоснованным является использование методов механоактивации [2]. Замена процесса смешивания механоактивацией препятствует сегрегации УНТ и их последующей повторной агломерации. При этом процесс механоактивации исходных компонентов характеризуется геометрическими параметрами активатора, частотой вращения и коэффициентом заполнения его рабочей камеры.

Немаловажную роль в процессе внедрения наночастиц в поверхностный слой материала играет длительность механоактивации. Чем больше время механоактивации при постоянных параметрах и энергии, подводимой к порошковой смеси, тем более интенсивно происходит насыщение поверхностного слоя частиц меди наночастицами, что способствует улучшению физико-механических свойств материала. Результаты проведенных исследований показали, что оптимальное время обработки составляет около 60 мин. При более длительной механической обработке прочность композиционного порошкового материала снижается, а его пористость увеличивается, что, вероятно, связано с нарушением однородности системы, заключающемся в разрушении частиц меди, выходе наноструктурного наполнителя из междендритного пространства с одновременным образованием агломератов УНТ [3].

Стадия уплотнения. Засыпанная в пресс-форму предварительно подготовленная порошковая смесь имеет хаотическое расположение частиц. При этом частицы порошка могут образовывать пустоты, мостики и арки, препятствуя тем самым плотной укладке.

При приложении внешнего давления происходит свободное перемещение частиц и разрушение арок, что ведет к уплотнению материала от насыпной плотности, составляющей для медной матрицы на основе порошка ПМС-1 ГОСТ 4960–2017 15–25 % плотности компактного материала, до плотности, соответствующей 45–50 % плотности компактного материала. Данная стадия характеризуется переукладкой порошковых частиц, что сопровождается уменьшением размеров порового пространства, изменением количества контактов, образовавшихся при засыпке порошковой смеси, разрушением мостиков и арок. После снятия нагрузки прессовка превращается в слабо связанное кластерное тело [4].

Стадия упругого деформирования. Нарастание давления прессования ведет к изменению структуры материала от высокопористой к более плотной за счет взаимного перемещения частиц матрицы. Протекание процессов переукладки, сопровождающихся скольжением металлических частиц с высоким коэффициентом трения (коэффициент трения пары «медь – медь» $f \approx 0,6–1$), значительно облегчается за счет наличия наноструктур углерода, обладающих коэффициентом трения менее 0,1. В процессе трения частиц матрицы частично разрушаются окисные пленки, обнажается металл матрицы, из неметаллических контактов между частицами матрицы формируются металлические контакты.

При повышении давления прессования рост плотности композита происходит монотонно. На данной стадии полностью завершается перекладка частиц матрицы и наполнителя, уменьшение размеров пор замедляется.

Дальнейшее нарастание давления прессования ведет к уменьшению порового пространства за счет упругой деформации металлических частиц и пластической деформации областей контактного взаимодействия частиц матрицы. Однако на данной стадии препятствием для образования прочных металлических контактов являются не полностью разрушенные окисные пленки, которыми изначально покрыты металлические частицы матрицы.

Данная стадия процесса прессования характеризуется тем, что частицы порошка, упакованные максимально плотно, оказывают определенное сопротивление сжатию, давление прессования возрастает, а плотность порошкового тела при этом практически не увеличивается. Относительная плотность формируемого материала в конце данной стадии составляет 50–60 %.

Стадия пластического деформирования. Стадия характеризуется преимущественно пластическим деформированием частиц микроразмерной металлической матрицы, которое изначально происходит в зонах контактного взаимодействия частиц, где напряжения достигают значений, соответствующих пределу текучести материала. На локальных участках могут происходить процессы схватывания. При этом структурообразование сопровождается выделением тепла.

На данной стадии частицы металлической матрицы интенсивно деформируются, композиционный материал уплотняется, увеличивается площадь металлических контактов, происходит внедрение наноразмерных частиц наполнителя в поверхность микроразмерных частиц матрицы, а также рост напряжений внутри наноструктур углерода. Относительная плотность в конце данной стадии составляет 70–80 %.

Стадия спекания. При пропускании электрического тока через предварительно спрессованную порошковую систему, находящуюся под давлением, уплотнение про-

текает по механизму пластического течения. При этом изначально выделение джоулева тепла, обусловленное протеканием тока через порошковый материал, преимущественно наблюдается на межчастичных контактах. Протекающий электрический ток образует отдельные цепочки. С течением времени происходит увеличение контактной поверхности за счет образования новых контактных участков при вращении и перемещении частиц матрицы, находящихся под действием давления и тока. Резкое выделение большого количества тепловой энергии, размягчение и деформация частиц порошковой матрицы под действием прилагаемых усилий создают условия для преимущественной ориентации УНТ в пространстве. Итогом вышеописанных процессов является образование незначительного количества жидкой фазы и интенсивное спекание порошковой системы с плотной упаковкой, а следовательно, с низкой пористостью. На стадии спекания формируется структура композиционного материала, имеющая относительную плотность 96–98 %.

Таким образом, разработана теоретическая модель формирования структуры порошковых композиционных материалов на основе дисперсной микроразмерной медной матрицы и наноразмерного углеродного наполнителя. Показано, что процесс получения порошковых композиционных материалов на основе микроразмерной металлической матрицы, модифицированной наноструктурами углерода, состоит из пяти стадий: активирования – характеризующейся протекающими процессами деагломерирования наноструктурного наполнителя с последующим его распределением в матрице; уплотнения – определяющей перемещением частиц и разрушением локальных дефектов первоначальной укладки; упругого деформирования – отличающейся нарастанием напряжений внутри компонентов материала; пластического деформирования – характеризующейся возникновением интенсивных пластических деформаций металлических частиц матрицы; спекания – характеризующейся резким нарастанием температуры, возникновением преимущественной ориентации углеродных нанотрубок и образованием жидкой фазы [5].

Литература

1. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / П. А. Витязь [и др.] ; под общ. ред. П. А. Витязя, К. А. Солнцева. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 283 с.
2. Research of the interaction energy of carbon nanotubes in the agglomeration process / V. Kovtun [et al.] // International Journal “NDT Days”. – 2020. – Vol. 3, iss. 2. – P. 72–79.
3. Пасовец, В. Н. Технологические особенности введения наноразмерных компонентов в порошковые композиты на основе меди / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 1. – С. 47–55.
4. Пасовец, В. Н. Модель процесса получения нанокоспозиционного материала / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов : материалы 8-й Междунар. конф., Москва, 19–22 нояб. 2019 г. / Ин-т металлов и материаловедения им. А. А. Байкова ; редкол.: О. А. Банных [и др.]. – М., 2019. – С. 746–747.
5. Пасовец, В. Н. Износостойкость наноструктурированных металлополимерных самосмазывающихся порошковых композитов / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун, Ю. М. Плескачевский // Вестн. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 154–160.

УДК 620.22

**К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ
НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ
В УСЛОВИЯХ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН
РУП «ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «БЕЛОРУСНЕФТЬ»**

Ю. И. Попкова, П. А. Петрикевич

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»,
г. Гомель*

Рассмотрена проблема коррозии насосно-компрессорных труб в условиях нагнетательных скважин Речицкого нефтяного месторождения РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»». В настоящее время защита от коррозии подземного оборудования скважин является достаточно актуальной задачей. Преждевременные подъемы по причине коррозии насосно-компрессионных труб приводят к увеличению себестоимости нефти. Одной из перспективных технологий антикоррозионной защиты является применением низколегированных сталей. Приведены результаты стендовых испытаний трубных сталей насосно-компрессионных труб, показавших технологическую эффективность в сравнении с промышленно применяемой трубной сталью 32Г1А группы прочности N80 (Q) API Spec 5CT, в условиях, моделирующих скважинные – трубная сталь 30Х группы прочности L80 (1) API Spec 5CT, 32ХГ группы прочности P110 API Spec 5CT, а также результаты их промысловых испытаний.

Ключевые слова: коррозия, насосно-компрессорные трубы, трубная сталь, низколегированная сталь, скважина.

**APPLICATION OF LOW-ALLOYED TUBE STEEL
IN THE INJECTION WELLS CONDITIONS OF PRODUCTION
ASSOCIATION BELORUSNEFT**

U. Popkova, P. Petrikevich

BelNIPIneft RUE “Production Association “Belorusneft”, Gomel

The paper describes the problem of tubing corrosion in the injection wells conditions of Rchitskoe oil field of Production Association «Belorusneft». Nowadays corrosion protection of well equipment is quite an urgent issue. Premature well equipment lifting due to tubing corrosion leads to an increase of oil production cost. One of the promising corrosion protection technologies is the use of low-alloyed steels. The paper presents the results of bench tests of tubing steel which showed technological efficiency in comparison with commercially used tubing steel grade 32Mn1N N80 (Q) API Spec 5CT in conditions simulating downhole – grade 30Cr L80 (1) API Spec 5CT, grade 32MnCr P110 API Spec 5CT and the results of their field tests.

Keywords: corrosion, tubing, tube steel, low-alloyed steel, well.

Для поддержания пластового давления на месторождениях Беларуси применяется технология закачки воды в пласт через нагнетательные скважины. По классификации В. А. Сулина нагнетаемая вода относится к хлоридно-кальциевому типу [1]. По минерализации относится к рассолам крепким [2]. По значению водородного показателя вода относится к слабокислым [2]. Попутно добываемая вода содержит растворенный углекислый газ CO_2 и гидрокарбонат HCO_3^- . Сероводород в продукции отсутствует. Коррозионное разрушение промышленно применяемой трубной стали насосно-компрессорных труб (НКТ) 32Г1А группы прочности N80 (Q) API Spec 5CT в таких условиях обусловлено электрохимической жидкостной коррозией в резуль-

тате ее контакта с агрессивной попутно добываемой водой, содержащей ионы растворенных солей и растворенный углекислый газ.

Одной из перспективных технологий антикоррозионной защиты является применение низколегированных хромом трубных сталей. Согласно данным литературных источников, трубные стали, легированные хромом, в определенных условиях могут показывать повышенную коррозионную стойкость, предотвращая локальную коррозию, и не отличаться от среднеуглеродистой, легированной марганцем, – в других [3]–[6].

Цель данной работы – подбор трубных сталей НКТ, легированных хромом, для условий нагнетательных скважин Речицкого нефтяного месторождения на основании результатов стендовых испытаний с последующим подтверждением технологической эффективности применения выбранных НКТ в промышленных условиях.

Методика проведения испытаний. Из патрубков трубных сталей, предоставленных производителями, изготавливались образцы-свидетели коррозии (ОСК). Стендовые испытания проводились на установке «АА-КОНКОР», воспроизводящей скважинные условия и представляющей собой замкнутый циркуляционный контур с вертикальной ячейкой для установки образцов-свидетелей коррозии. Все испытания проводились согласно разработанной методике в непрерывном режиме при поддержании постоянного давления, температуры, скорости потока [7]. Рабочие параметры среды соответствовали скважинным условиям, в которых были выявлены сквозные коррозионные повреждения НКТ: температура +40 °С, давление – 15 МПа, скорость потока – 0,5 м/с. Продолжительность испытаний была принята – 72 ч, по окончании экспериментов определялась скорость сплошной коррозии ОСК в мм/год [7]. После испытаний ОСК передавались в ГНУ «Институт порошковой металлургии имени О. В. Романа» НАН Республика Беларусь для проверки элементного состава, металлургических характеристик, выявления локальных коррозионных повреждений. При осмотре морфологии поверхности, увеличенной в 100 раз, в случае выявления коррозионных повреждений определялась их глубина, на основании которой рассчитывался показатель скорости локальной коррозии, выраженный в мм/год.

В дальнейшем НКТ из каждого вида трубной стали поочередно эксплуатировались в одной и той же скважине – объекте испытаний в течение определенного периода, по окончании которого проводился подъем и ревизия НКТ. Для определения толщины стенки и выявления локальных повреждений НКТ проходили проверку на установке неразрушающего контроля. Для детальной оценки состояния внутренней поверхности НКТ отрезались образцы и распиливались вдоль направляющей.

Результаты. После стендовых испытаний трубной стали 32Г1А N80 (Q) API Spec 5CT при визуальном осмотре поверхности ОСК выявлены локальные коррозионные повреждения в виде питтингов и язв, переходящие в «плато», степень поражения поверхности – до 90 %. Средний показатель скорости сплошной коррозии трубной стали составил 1,25 мм/год. При осмотре морфологии поверхности, увеличенной в 100 раз, выявлены локальные коррозионные повреждения глубиной до 0,03 мм. Расчетный показатель скорости локальной коррозии составил 3,7 мм/год. Локальный язвенный характер повреждения базовой среднеуглеродистой стали обусловлен низким содержанием хрома (0,05 %) и легированием марганцем. Марганец, обладая более высокой активностью, чем железо при реагировании с коррозионной средой, образует рыхлые (по структуре кристаллической решетки) продукты коррозии (оксиды и сульфида марганца), которые делают доступными проникновение к основному металлу агрессивных коррозионных компонентов [8]. Полученные данные коррелируются с промышленными, в условиях которых скорость локальной коррозии может

92 Секция 2. Современные материалы, наноматериалы в машиностроении

достигать 4 мм/год. Характер повреждения НКТ 32Г1А N80 (Q) API Spec 5СТ после эксплуатации в условиях нагнетательной скважины Речицкого месторождения представлен на рис. 1.



Рис 1. Состояние насосно-компрессионных труб 32Г1А N80 (Q) API Spec 5СТ при эксплуатации в условиях нагнетательной скважины Речицкого месторождения

После стендовых испытаний трубной стали 32ХГ Р110 API Spec 5СТ при визуальном осмотре поверхности ОСК выявлена общая коррозия, степень поражения – до 90 %. Скорость коррозии трубной стали 32ХГ Р110 API Spec 5 СТ составила 1,29 мм/год. При осмотре морфологии поверхности, увеличенной в 100 раз, локальные коррозионные повреждения не выявлены. Повышенная коррозионная стойкость против локальной коррозии данной стали в сравнении с промышленно применяемой обусловлена повышенным содержанием хрома в составе. Необходимо отметить высокую скорость общей коррозии (на уровне базовой стали) при отсутствии локальных повреждений, что обусловлено дополнительным легированием трубной стали марганцем. В настоящее время в условиях нагнетательных скважин Речицкого месторождения проводятся промысловые испытания, на одном из объектов проведен подъем подземного оборудования при наработке, превышающей в 2 раза аналогичный показатель, при котором была выявлена сквозная коррозия НКТ. По результатам проведенной ревизии установлена сходимость промысловых и фактических данных: локальные коррозионные повреждения не выявлены, имеет место неравномерная сплошная коррозия внутренней поверхности. Состояние НКТ после эксплуатации в условиях нагнетательной скважины Речицкого месторождения показано на рис. 2.

После стендовых испытаний трубной стали 30Х L80 (1) API Spec 5СТ при визуальном осмотре поверхности ОСК выявлена сплошная коррозия, степень поражения поверхности – до 10 %. Средний показатель скорости сплошной коррозии составил 0,14 мм/год. При осмотре морфологии поверхности, увеличенной в 100 раз, локальные коррозионные повреждения не выявлены. Как и указывалось ранее, повышенная коррозионная стойкость против локальной коррозии данной стали в сравнении с промышленно применяемой обусловлена повышенным содержанием хрома в составе. В настоящее время в условиях нагнетательных скважин Речицкого месторождения проводятся промысловые испытания. Подъем подземного оборудования не проводился, однако текущая наработка на скважинах – объектах опытно-промысловых испытаний превысила в 1,9 раз аналогичный показатель, при котором была выявлена сквозная коррозия НКТ.



Рис. 2. Состояние насосно-компрессионных труб 32ХГ Р110 API Spec 5СТ API Spec 5СТ при эксплуатации в условиях нагнетательной скважины Речицкого месторождения

На основании проведенной работы установлены следующие закономерности для условий нагнетания воды хлоридно-кальциевого типа, слабокислой, представляющей собой крепкие рассолы при температуре +40 °С, давлении – 15 МПа, скорости потока – 0,5 м/с:

- трубная сталь 32Г1А N80 (Q) API Spec 5СТ подвержена локальным коррозионным повреждениям, скорость развития которых может достигать 4,0 мм/год;
- трубная сталь 30X L80 (1) API Spec 5СТ подвержена сплошной коррозии при отсутствии локальных коррозионных повреждений, причем скорость сплошной коррозии в 9 раз меньше, чем у стали 32Г1А N80 (Q) API Spec 5СТ;
- трубная сталь 32ХГ Р110 API Spec 5СТ подвержена сплошной коррозии на уровне стали 32Г1А N80 (Q) API Spec 5СТ при отсутствии локальных коррозионных повреждений;
- применение трубных сталей 30X L80 (1) API Spec 5СТ и 32ХГ Р110 API Spec 5СТ не требует дополнительных антикоррозионных мероприятий, применение 30X L80 (1) API Spec 5СТ предпочтительнее;
- получена высокая сходимость результатов стендовых испытаний с промышленными.

Литература

1. Карцев, А. А. Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений / А. А. Карцев. – М. : Недра, 1972. – 280 с.
2. ОСТ 41-05-263–86. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре. – Введ. 12.05.86. – М. : ВСЕГИНГЕО, 1986. – 9 с.
3. Dugstar, A. Mechanism of protective film formation during CO₂ corrosion of carbon steel / A. Dugstar // Mechanism of CO₂ corrosion. – 2017. – P. 37–47.
4. Костицына, И. В. Исследование коррозионной стойкости материалов насосно-компрессорных и нефтегазопроводных труб на месторождениях ОАО «Лукойл» / И. В. Костицына // Инженерная практика. – 2011. – № 11. – С. 34–37.
5. Effect of chromium on corrosion behavior of P110 steels in CO₂ and H₂S environment with high pressure and high temperature / S. Jianbo [et al.] // Materials. – 2016. – № 9.
6. Ким, С. К. Результаты ОПИ нефтепроводных труб и НКТ из сталей с повышенной коррозионной стойкостью на месторождениях ООО «Лукойл-Коми» / С. К. Ким // Инженерная практика. – 2011. – № 11. – С. 65–69.
7. Методика проведения испытаний на установке для моделирования и изучения коррозионных процессов в скважинных условиях «АА-Конкор» / БелНИПИнефть. – Гомель, 2021. – 33 с.

8. Иоффе, А. В. Особенности коррозионного разрушения нефтегазопроводных труб в условиях эксплуатации Коми и Западной Сибири / А. В. Иоффе, В. А. Ревякин, С. А. Князькин // Вектор науки ТГУ : сб. науч. ст. / Самар. инженер.-технол. центр. – Самара, 2010. – С. 50–54.

УДК 621+669.018.73

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Т. М. Умарова

*Филиал Московского государственного университета
имени М. В. Ломоносова в городе Душанбе, Республика Таджикистан*

Исследованы физико-химические свойства синтезированных интерметаллидных сплавов на основе систем Al–Mn и Al–Fe, модифицированных металлом группы лантаноидов с целью возможности использования их в машиностроении.

Ключевые слова: материалы из алюминиевого сплава, интерметаллические соединения, алюминиды, микроструктура, физико-химические свойства.

MATERIALS DEVELOPMENT AND RESEARCH BASED ON ALUMINIDES FOR ENGINEERING

T. M. Umarova

Lomonosov Moscow State University in Dushanbe, Republic of Tajikistan

The physicochemical properties of the synthesized intermetallic alloys based on the Al–Mn and Al–Fe systems, modified by a metal of the lanthanide group with the aim of using them in mechanical engineering have been studied.

Keywords: aluminum alloy materials, intermetallic compounds, aluminides, iron, manganese, yttrium, microstructure, physical and chemical properties.

Алюминиевые сплавы широко используются в машиностроении, транспортной, авиационной, морской и аэрокосмической промышленности. Для некоторых ответственных деталей машин, применяемых в данных областях, алюминиевые сплавы незаменимы. Однако многие детали и механизмы машин подвержены значительным нагрузкам: удару, циклическому изменению температур, вибрации и т. п. Учитывая вышесказанное, при конструировании деталей и механизмов остается актуальной задача всестороннего изучения структуры, физико-химических, механических и эксплуатационных свойств разработанных сплавов.

Сплавы на основе алюминидов железа относят к сравнительно новому классу перспективных конструкционных материалов, предназначенных для работы в интервале температур выше 600 °С, для такого материала характерна низкая стоимость, удовлетворительное химическая стойкость против коррозионного разрушения и износа [1].

Наличие интерметаллических соединений (ИМС) всегда привлекает внимание материаловедов, поскольку, согласно правилу Курнакова, это дает возможность получить материал с высокими физико-химическими и технологическими свойствами. Алюминиды все чаще применяют в качестве конструкционных материалов, которые обладают отличительными механическими и физико-химическими свойствами – высокой твердостью, прочностью, износостойкостью и коррозионностойкостью. Потенциальным объектом применения ИМС в машиностроении является турбина низ-

кого давления, алюминиды железа находят применение как заменители стали в выхлопных системах, для производства отдельных узлов и дисков газовых турбин, работающих при температурах до 680 °С, в качестве резистивных нагревательных элементов и т. д. [2, 3]. Однако высокая твердость, сопровождаемая не менее высокой хрупкостью, сдерживает применение данных сплавов.

В связи с этим цель данной работы заключается в синтезе и изучении физико-химических свойств интерметаллидных сплавов на основе алюминия, рассмотрении возможности их применения в качестве конструкционного материала в машиностроении, авиационной технике. Данная работа является продолжением работ по изучению физико-химических, механических и эксплуатационных свойств алюминиевых сплавов, интерметаллических составляющих на основе алюминия, влияния легирующих компонентов (лантаноидов) на их свойства [4–6].

Методика. Сплавы для исследования получали из алюминия марки А995 (ГОСТ 11069–74), марганца электролитического Мр00 (ГОСТ 6008–82), железа – ЧДА, редкоземельных металлов чистотой не менее 99,9 %. Для синтеза и изучения физико-химических свойств сплавов на основе алюминия использована камерная печь KS 400/10 в условиях вакуума; микроструктурный анализ проводился на металлографическом микроскопе «Neophot-21» при 400-кратном увеличении с подготовкой образцов согласно источнику [7]; химический анализ проводили на сканирующем электронном микроскопе «SEM» марки «СAM-SCAN» с предварительной подготовкой поверхности образцов ИМС аналогично подготовке к микроструктурному анализу; электрохимический анализ проведен с помощью импульсного потенциостата ПИ-50-1.1 потенциостатическим методом со скоростью развертки 2 мВ/с с выходом на программатор ПР-8 в среде электролита 3%-го раствора хлористого натрия.

Растворимость железа в алюминии, как известно, невелика и составляет 0,03 ат. % при температуре эвтектики 654 °С. В процессе кристаллизации в структуре сплавов на основе системы Al–Fe появляются кристаллы ИМС FeAl₃ (Fe₄Al₁₃) с максимальным содержанием алюминия 77,5 ат. % среди существующих ИМС данной системы. Синтез алюминидов железа осложнен различием в температурах плавления и испарения чистых компонентов ИМС. Сплавы с высоким содержанием алюминия сложно выплавлять в печах, где необходимо обеспечить условия вакуума из-за высокой окисляемости алюминия. Структура химического соединения FeAl₃ является одной из самых сложных, с моноклинной элементарной ячейкой (с периодами решетки $a = 15,489 \text{ \AA}$; $b = 8,0834 \text{ \AA}$; $c = 12,476 \text{ \AA}$; $\beta = 107^\circ 43'$). В системе имеет место метастабильное соединение FeAl₆ с ромбической структурой (периоды решетки $a = 7,440 \text{ \AA}$; $b = 6,4644 \text{ \AA}$; $c = 8,779 \text{ \AA}$) [3].

Необходимо отметить, что неотожженные алюминиды на основе системы Al–Mn сложно поддаются травлению известными реактивами, поэтому из большого числа апробированных был выбран реактив 26 (0,5 мл 40%-го HF в 100 мл H₂O) [8], при этом фаза Al₆Mn растворялась реактивом в 50 быстрее, чем Al₄Mn. На рис. 1 представлены структуры поверхностей образцов ИМС, снятые на сканирующем электронном микроскопе «СAM-SCAN» при 300-кратном увеличении, представляющие собой общий вид образцов в отраженных электронах.

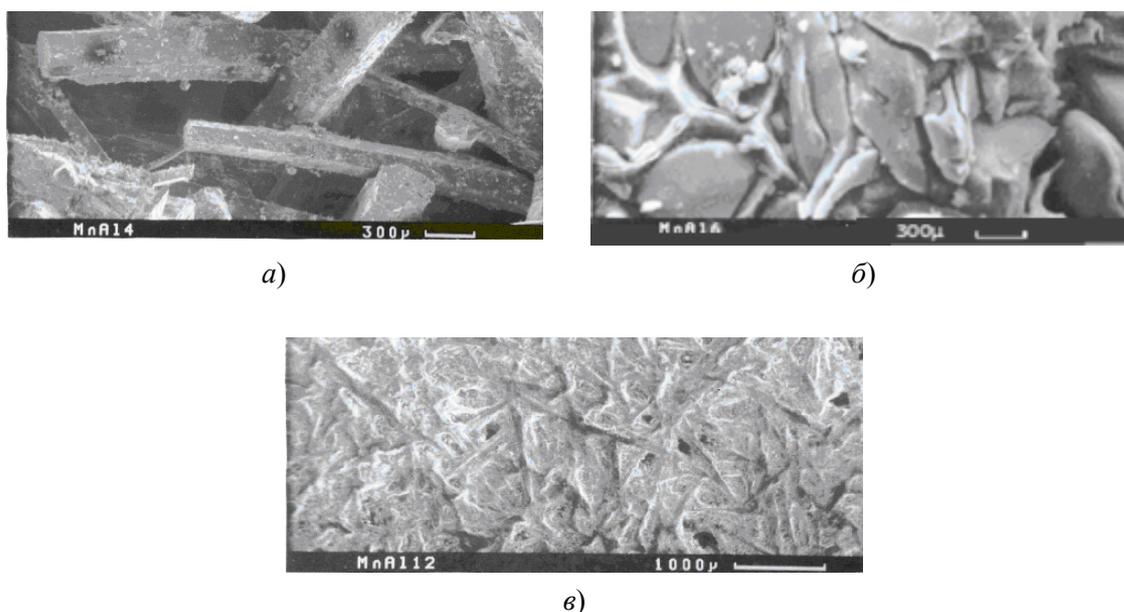


Рис. 1. Структуры поверхностей образцов алюминидов марганца: а – $MnAl_4$; б – $MnAl_6$; в – $MnAl_{12}$

Введение лантаноидов в качестве легирующей добавки к ИМС (причем их малые добавки, не более 0,5 %) благодаря модифицирующему эффекту улучшает структуру сплава, нейтрализует вредное влияние примесей, значительно повышает механические и технологические свойства. В качестве примера выбрана одна из изученных тернарных систем Al–Fe–Y. На рис. 2 показаны микроструктуры ИМС систем Al–Fe и Al–Fe–Y, снятые на металлографическом микроскопе «Neophot-21».

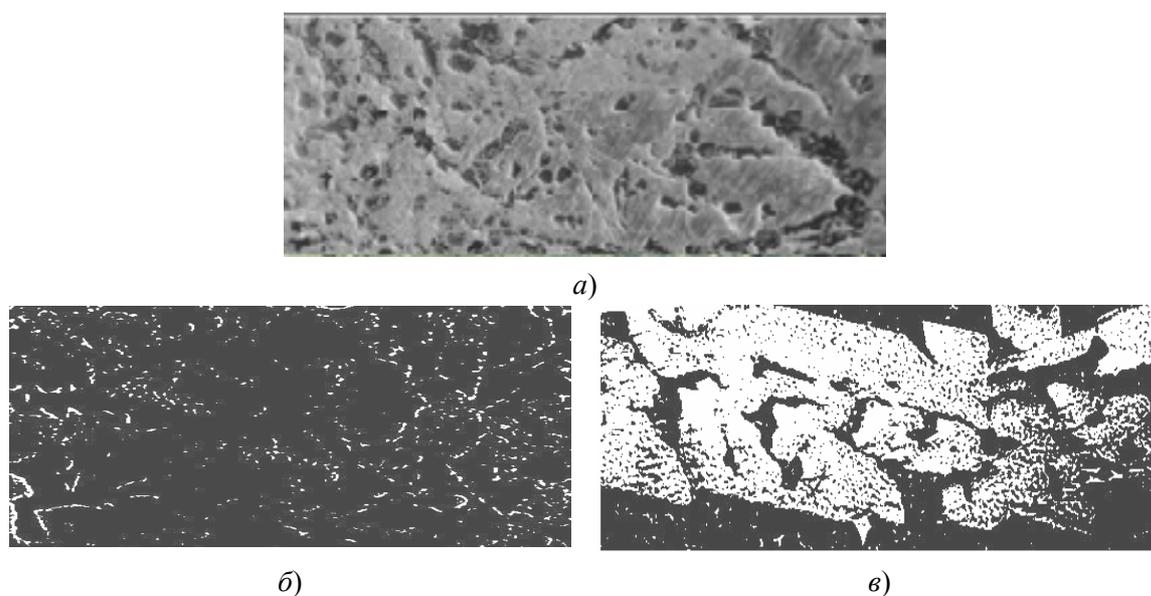


Рис. 2. Характерные микроструктуры $FeAl_3$ (а) и ИМС сплавов системы Al–Fe–Y ($\times 400$): 80 % – Fe_4Al_{13} и 20 % – YFe_2Al_{10} (б); 80 % – $YFe_{5,5}Al_{6,5}$ и 20% – Fe_2Al_5 (в)

В ходе проведенных исследований получены следующие результаты:

– полученные прямым сплавлением алюминиды идентифицированы дифференциально-термическим, рентгенофазовым, металлографическим и химическим методами анализов, подтверждена индивидуальность соединений;

– изучена система Al–Fe–Y в области, богатой алюминием; экспериментально подтверждено наличие двухфазных равновесий: Al–YFe₂Al₁₀, YFe₂Al₁₀–YAl₂, YAl₂–YFe_{5,5}Al_{6,5}–Fe₂Al₅, Fe₄Al₁₃–YFe₂Al₁₀. Установлено, что интерметаллическое соединение YFe_{5,5}Al_{6,5} плавится конгруэнтно при 990 °С, а YFe₂Al₁₀ – инконгруэнтно в интервале температур 790–930 °С;

– при исследовании коррозионно-электрохимических свойств выявлена следующая закономерность в ряду легирующих элементов (Y, Ce, Pr, Nd, Gd, Er): чем больше заряд ядра лантаноида (число электронов на *f*-подуровне), тем выше коррозионная стойкость алюминидов железа и марганца, легированных лантаноидами. В кислой среде подобной зависимости не наблюдается;

– изучение сплавов системы Al–Fe и присутствующих в них алюминидов представляет большой практический интерес, поскольку это дает возможность использовать вторичный алюминий в качестве материала-основы для разработки конструкционных материалов, рекомендуемых в качестве заменителей стали в выхлопных системах, для производства отдельных узлов и дисков газовых турбин.

Литература

1. Дресвянников, А. Ф. Синтез интерметаллида Fe₃Al / А. Ф. Дресвянников, Е. Колпаков // Прикл. химия и хим. технология неорган. и орган. веществ. – 2010. – № 3. – С. 7–10.
2. Ковтунов, А. И. Интерметаллидные сплавы : электрон. учеб. пособие / А. И. Ковтунов, С. В. Мямин. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2018. – 1 опт. диск.
3. Авиационные материалы : справочник : в 9 т. / науч. ред. С. И. Кишкина, И. Н. Фридляндер ; под общ. ред. Р. Е. Шалина. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : ОНТИ, 1982. – 625 с.
4. Умарова, Т. М. Синтез и исследование микроструктуры и теплофизических свойств интерметаллического соединения Al₃Fe / Т. М. Умарова, Ф. Джалолов // Вестн. Филиала Моск. гос. ун-та им. М. В. Ломоносова в городе Душанбе. Сер. Естеств. науки. – 2017. – № 1. – С. 128–133.
5. Umarova, T. M. Influence of micro alloying (including REM) on the phase composition and properties of aluminum alloys / T. M. Umarova // Material Science and Engineering Technology. – 2016. – Vol. 890. – P. 331–338.
6. Умарова, Т. М.,. Анодные сплавы алюминия с марганцем, железом и редкоземельными металлами / Т. М. Умарова, И. Н. Ганиев. – Душанбе : Дониш, 2008. – 273 с.
7. Умарова, Т. М. Сплав на основе алюминия : Евраз. пат. № 200500820 / Умарова Т. М., Ганиев И. Н., Джалолова З. С., Рахмонов К. А., Амонов И. Т. ; заявл. 16.05.05 ; опубл. 28.04.08. – 5 с.
8. Беккерт, М. Способы металлографического травления : пер. с нем. / М. Беккерт, Х. Клемм. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1988. – 400 с.

УДК 621.74

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗЕРНОВОЙ СТРУКТУРЫ КВАРЦЕВЫХ ПЕСКОВ НА ОБРАЗОВАНИЕ ПРОСЕЧЕК В ЧУГУННЫХ ОТЛИВКАХ

И. Н. Прусенко, И. Б. Одарченко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Представлены результаты исследований влияния однородности зерновой структуры формовочного песка на формирование просечек на внутренней поверхности чугунных отливок. Установлена существенная зависимость прочности и газопроницаемости литейного стержня от плотности зерновой структуры огнеупорного наполнителя.

Ключевые слова: однородность зерен песка, просечки, литейные стержни, отливки из чугуна.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE GRAIN STRUCTURE OF QUARTZ SANDS ON THE FORMATION OF VEINING IN CAST IRON CASTINGS

I. N. Prusenko, I. B. Odarchenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The results of studies of the influence of uniformity of molding quartz sand on the formation of veining on the inner surface of cast iron castings are presented. A significant dependence of the strength and gas permeability of the mold core on the density of the grain structure of the refractory filler has been established.

Keywords: uniformity of grain sand, veining, mold cores, cast iron castings.

Качественные характеристики огнеупорного наполнителя являются одним из важнейших критериев, формирующим основные эксплуатационные свойства литейных стержней. В свою очередь, свойства огнеупорного наполнителя определяются зерновым и химико-минералогическим составом применяемых формовочных песков. Предположительно, плотная концентрированная зерновая структура формовочных песков будет способствовать формированию перенапряженной структуры «тела» литейного стержня при модификационных превращениях кварцевых зерен, а наличие низкоогнеупорных примесей, выгорая, будет создавать пустые области в «теле» стержня, тем самым снижая степень термических напряжений. Поэтому для снижения вероятности образования просечек на внутренних поверхностях отливки следует оптимизировать однородность зерен кварцевых песков, содержание глинистой составляющей, низкоогнеупорных примесей.

В данной работе представлены исследования влияния однородности зерен кварцевого песка на образование просечек. Определение гранулометрического состава кварцевого песка проводилось на базе марки 1К₂О₁02 по стандартной методике ситового анализа. Для отсева был использован набор сит и установка для разделения песков на фракции по крупности зерен модели 029. Установлено, что исследуемая марка песка имеет концентрированную зерновую структуру, однородность зерен песка составила 95,52 %, средний размер зерен – 0,25 мм.

Для оценки влияния зерновой структуры формовочного песка 1К₂О₁02 на образование просечек проведено исследование, согласно которому были изготовлены

образцы литейных стержней с использованием искусственно созданных песков с различной однородностью зернового состава. Для этого уменьшалась (шагом 5 %) масса основной фракции песка (0,2 мм) и пропорционально увеличивалась доля других фракций. В результате чего было получено 13 песков с различной однородностью зерен, из которых были изготовлены образцы литейных стержней. Чтобы исключить влияние глинистой составляющей, низкоогнеупорных примесей, данные пески были предварительно очищены прокаливанием и отмучиванием.

Образцы литейных стержней изготавливались из стержневых смесей на основе наволачного фенолформальдегидного полиола ASKOCURE 4093 и полиизоционата ASKOCURE 4096, отверждение связующей системы происходило продувкой триметиламином. При этом для каждого образца количество связующего материала в составе стержневой смеси строго контролировалось и составляло полиола – 0,8 %, полиизоционата – 0,8 % на 100 % массы песка. Процессы смесеприготовления и формообразования осуществлялись при температуре окружающей среды – 20 °С, влажности воздуха – 50 %. Уплотнение образцов проводилось пескодувным способом формообразования давлением надува 3,2 атм., что соответствует плотности литейных стержней – 1,67 г/см³.

Во всех проведенных исследованиях для заливки использовался гравитационный способ литья сплавом СЧ20 ГОСТ 1412–85, нагретым до температуры 1380 °С. Технологические параметры плавки и заливки сплава во всех экспериментах выдерживались одинаковыми. Образцы отливок после выбивки подвергались пескоструйной обработке.

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние однородности зерновой структуры песка на образование просечек

Однородность зерновой структуры кварцевого песка, %	Просечки		Среднее значение прочности, Н/см ²		Средняя газопроницаемость, ед.
	Средняя длина, мм	Балл	моментальная	окончательная	
95	89	6	285	456	239
90	89	6	291	463	221
85	86	6	299	473	209
80	82	6	307	484	198
75	78	6	313	492	187
70	75	6	318	506	176
69	75	6	324	512	171
68	74	5	331	520	165
66	74	5	327	514	154
64	74	5	321	506	147
63	75	6	317	503	139
62	76	6	312	497	115
60	77	6	304	488	97

При исследовании было установлено, что при снижении значения однородности зерновой структуры песка средняя длина гребней просечек уменьшается с 89 мм (однородность песка – 95,5 %) до 74 мм (однородность песка – 68 %). При этом наи-

меньшая длина гребня просечки зафиксирована для песка с рассредоточенной зерновой структурой зерен.

Также при данном значении однородности зерновой структуры наполнителя были зафиксированы максимальные значения моментальной и окончательной прочности образцов стержней на разрыв по ГОСТ 23409.7–78. Рост значений прочности обусловлен увеличением количества адгезионных контактов между зернами огнеупорного наполнителя вследствие снижения его однородности. Однако дальнейшее снижение однородности наполнителя с 68 до 60 % привело к уменьшению как моментальной, так и окончательной прочности. Данный факт связан с увеличением удельной поверхности зерен песка и истончением манжеты связующего компонента.

Установлено, что снижение однородности зернового состава огнеупорного наполнителя с 95 до 60 % привело к снижению газопроницаемости стержневой смеси более чем в 2 раза (с 239 до 97 ед.), что увеличивает вероятность образования газовых дефектов. Для определения оптимального значения газопроницаемости стержневой смеси при газотворной способности выбранной связующей системы – 11 г/см³ (по методике согласно ГОСТ 23409.12–78) проведено дополнительное исследование.

Для изготовления образцов литейных стержней в качестве огнеупорного наполнителя использовались искусственно созданные монофракционные пески, что обеспечило различную пористость стержневой смеси и тем самым – условия выделения газов через стержневые знаки при заливке расплавом (табл. 2).

Таблица 2

Газопроницаемость стержневой смеси в зависимости от фракции песка

Фракция песка	063	04	0315	02	016	01	0063
Газопроницаемость, ед.	1070	760	392	245	143	98	52

Данные стержни использовались для получения отливок «Цилиндр», внутренняя поверхность которых обрабатывалась фрезерованием для учета скрытых газовых раковин, пористости. Для исследуемых отливок, полученных с применением литейных стержней, газопроницаемость которых составляла 52 ед. (фракция зерен песка – 0063), зафиксировано обширное поражение газовыми раковинами размером от 0,1 до 3 мм. Поверхность раковин гладкая, блестящая, светлая, преимущественно сферической формы (рис. 1, а).

При газопроницаемости литейного стержня – 98 ед. (фракция 01 огнеупорного наполнителя) отмечены единичные мелкие (до 1 мм) газовые раковины на внутренней поверхности чугуновых отливок (рис. 1, б).

С увеличением газопроницаемости литейного стержня размер и количество газовых раковин резко сократилось. При газопроницаемости литейных стержней – от 143 ед. и выше для исследуемого соотношения связующих компонентов стержневой смеси, газовых дефектов на внутренних поверхностях отливки обнаружено не было (рис. 1, в).

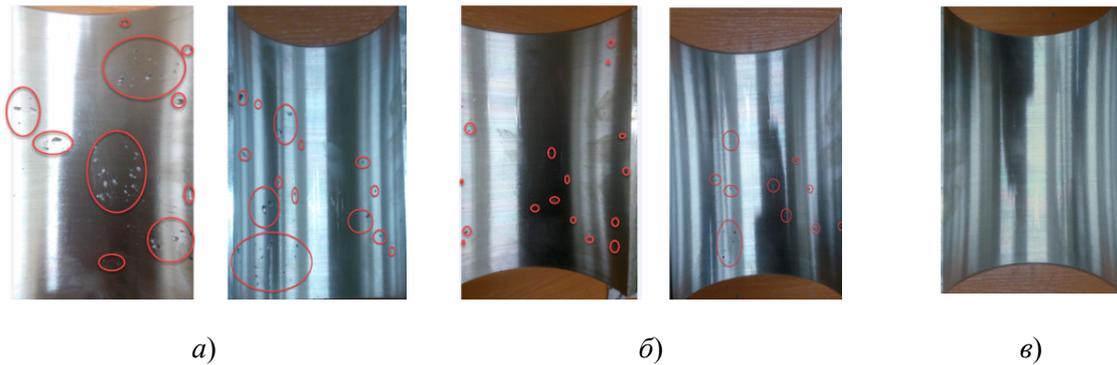


Рис. 1. Внутренняя поверхность образцов отливок при различной газопроницаемости образцов литейного стержня:
 а – газопроницаемость – 52 ед.; б – газопроницаемость – 98 ед.;
 в – газопроницаемость более – 143 ед.

Проведенное исследование позволяет заключить, что при использовании огнеупорного наполнителя с рассредоточенной зерновой структурой (при однородности зернового состава – 68 %) в составе стержневой смеси обеспечивается рост общей прочности стержневой смеси на 18 % и снижается на 16 % длина просечек. При этом обеспечивается необходимый отвод газов из зоны контакта «металл–стержень», снижая вероятность образования газовых дефектов на внутренних поверхностях чугунных отливок.

Таким образом, использование песков рассредоточенной зерновой структуры в составе стержневой смеси позволяет несколько снизить вероятность образования просечек на внутренней поверхности чугунных отливок и является значимым «технологическим рычагом» управления качеством отливок. Для полной ликвидации данного дефекта необходима комплексная оптимизация характеристик и свойств исходных формовочных материалов, стержневой смеси, свойств стержня, условий технологической подготовки стержней к использованию.

УДК 667.7

СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ ИЗ ОТХОДОВ ФАРФОРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

В. В. Невзоров

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

А. А. Бойко, Ю. А. Алексеенко, Е. В. Соболев

Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

На основании теоретических и экспериментальных исследований определен выбор оптимальной рецептурных и технологических параметров изготовления керамических изоляторов из отходов местного фарфорового производства, обеспечивающих высокие физико-механические свойства композиционного материала. В результате испытаний установлено, что эксплуатационная стойкость КИ возросла в 1,5–2,3 раз, долговечность деталей увеличилась на 15–25 %. Внедренные в эксплуатацию керамические изоляторы для печей обеспечивают решение двух задач: утилизацию отходов фарфорового производства и импортозамещение.

Ключевые слова: керамические изоляторы, местное сырье, отходы фарфорового производства.

PROPERTIES OF CERAMIC INSULATORS FROM PORCELAIN PRODUCTION WASTE

V. V. Nevzorov

Educational institution "Belarusian State University of Transport", Gomel

A. A. Boyko, Yu. A. Alekseenko, E. V. Sobolev

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

On the basis of theoretical and experimental studies, the choice of the optimal formulation and technological parameters for the manufacture of ceramic insulators (CI) from local porcelain production waste, providing high physical and mechanical properties of the composite material, has been determined. As a result of the tests carried out, it was found that the operational resistance of the CI increased by 1.5–2.3 times, the durability of the parts increased by 15–25%. Ceramic insulators for furnaces put into operation provide a solution to two tasks: recycling of porcelain production waste and import substitution.

Keywords: ceramic insulators, local raw materials, porcelain production waste.

Разработка и освоение новых энергоэффективных технологических процессов получения и изделий из различных керамических материалов, отвечающих заданным требованиям для серийного производства и конкурентоспособных к продукции зарубежных производителей, является актуальной задачей импортозамещения.

Керамические изоляторы (КИ) – это один из видов технической керамики, который часто используется в качестве огнеупорных и электроизоляционных материалов в деталях и узлах нагревательных и индукционных печей в промышленности [1, 2]. В этом случае керамические изоляторы служат диэлектрическими корпусами ТЭНов и нагревателей. Изоляторы имеют специальные отверстия для резистивных спиралей. В зависимости от уровня требований к эксплуатационным и качественным показателям материалов керамических изоляторов те или иные структурно-механические и рецептурные параметры, а также технологические параметры изготовления могут иметь главенствующую роль [3].

В условиях отсутствия возможности замены оригинальных деталей в немецких печах, которые эксплуатируются на машиностроительных белорусских предприятиях, стал вопрос о замене изоляторов, изготовленных из местного сырья. При этом необходимо было также разработать технологии, базирующиеся на местную сырьевую базу.

Цель работы – разработать рецептуру и технологию изготовления керамических изоляторов для нагревательных спиралей с включением отходов местного фарфорового производства с заданными свойствами по термостойкости.

Материалы. Состав керамической массы для изготовления керамических изоляторов имеет следующие наполнители, %: шамотный порошок зернистостью до 1 мм – 45; глина огнеупорная – 45; отходы фарфорового производства – 10. Отходы прошли систему очистки шламовых стоков и имеют следующий химический состав при содержании компонентов, мас. %: SiO_2 – 66,1–66,5; Al_2O_3 – 21,7–22,16; CaO – 1,06–1,16; MgO – 0,88–0,9; K_2O – 2,39–2,41; Fe_2O_3 – 0,3; N_2O – 1,35–1,37.

Технология изготовления включает нескольких стадий:

- первая – подготовка массы, которая заключалась в измельчении и однородном смешении всех компонентов с добавлением воды. Затем эта масса проходила подготовку в течение 48 ч при температуре окружающей среды – 20 ± 3 °C и влажности воздуха – 50–60 % для проведения химической реакции (так называемое «созревание») и получения достаточной степени пластичности подготовленной массы;

- вторая – формование заготовок и получение высокоплотного спрессованного полуфабриката из пластичных масс;

- третья – обжиг изделия в печи при температуре 1280 °С в течение 2 ч с последующей стадией остывания в печи до температуры окружающего воздуха.

Дополнительных операций готовым изделиям не требовалось.

Установлено, что изделия имеют однородную и гомогенную по всему объему структуру керамического материала, а разработанная технология изготовления позволяет получать изделия со стабильными и воспроизводимыми свойствами.

Физико-механические свойства такого материалы соответствуют заменяемым импортным деталям и находятся в пределах: плотность – 209 кг/м³; пористость – 20 %; коэффициент теплопроводности – 0,09–0,1 Вт/м · °С; прочность при сжатии – 2–2,5 МПа.

В результате испытаний установлено, что эксплуатационная стойкость КИ возросла в 1,5–2,3 раз, долговечность деталей увеличилась на 15–25 %.

Таким образом, использование керамической массы разработанного состава обеспечивает снижение себестоимости производства керамических изоляторов за счет уменьшения используемых сырьевых компонентов в составе керамической массы и утилизации отходов местного фарфорового завода при производстве изделий при одновременном улучшении качества.

Литература

1. Воронов, Г. В. Огнеупорные материалы и изделия в промышленных печах и объектах вспомогательного назначения / Г. В. Воронов, В. А. Старцев. – Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2006. – 303 с.
2. Салахов, А. М. Керамика для технологов : учеб. пособие / А. М. Салахов, Р. А. Салахова. – Казань : Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2010. – 232 с.
3. Балкевич, В. Л. Техническая керамика / В. Л. Балкевич. – М. : Стройиздат, 1984. – 310 с.

УДК 620.178

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАУГЛЕРОЖЕННЫХ СЛОЕВ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Е. П. Поздняков

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

И. Н. Степанкин

БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель

Д. В. Куис

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск

С. Н. Лежнев

Некоммерческое акционерное общество «Рудненский индустриальный институт», Республика Казахстан

Отображены результаты исследований цементованных слоев, сформированных на сталях 40Х, 35ХГСА и 42CrMoS4 в процессе 8- и 12-часового насыщения в древесноугольном карбюризаторе. Испытаниями на контактную усталость при напряжениях 1300 ± 65 МПа установлено, что у образцов стали 35ХГСА после 8- и 12-часовой химикотермической об-

работки и стали 40X после 8-часовой химико-термической обработки обнаружена высокая износостойчивость сплавов, которая сохраняется до 6,4 тыс., 10 тыс. и 12,9 тыс. циклов нагружения соответственно. Наибольшим сопротивлением к усталостному изнашиванию обладают науглероженные слои стали 40X, наработка которых при достижении глубины лунки износа 0,6 мм составила 30,2 тыс. и 32,4 тыс. циклов нагружения после 8- и 12-часового насыщения соответственно. Наличие молибдена в стали 42CrMoS4 не повысило износостойкость сплава.

Ключевые слова: износостойкость, усталостный износ, конструкционная сталь, цементация, легирующие элементы.

WEAR RESISTANCE OF CARBURATED LAYERS OF MEDIUM CARBON STRUCTURAL STEELS

E. P. Pozdnyakov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

I. N. Stepankin

BelNIPIneft RUE "Production Association "Belorusneft", Gomel

D. V. Kuis

Educational Institution "Belarusian State Technological University", Minsk

S. N. Lezhnev

*Non-commercial joint stock company "Rudny Industrial Institute",
Kazakhstan*

The paper presents the results of studies of carburized layers formed on steels 41Cr4, 35CrMnSi4 and 42CrMoS4 during 8 and 12 hours of saturation in a charcoal carburizer. Tests for contact fatigue at stresses of 1300 ± 65 MPa found that the specimens of steel 35CrMnSi4 after 8 and 12 hours of cold treatment and steel 41Cr4 after 8 hours of heat treatment showed high wear resistance of the alloys, which lasts up to 6.4 thousand, 10 thousand and 12.9 thousand loading cycles, respectively. The carburized layers of steel 41Cr4 have the highest resistance to fatigue wear, the operating time of which, when the wear hole depth reaches 0.6 mm, was 30.2 thousand and 32.4 thousand loading cycles after 8 and 12 hours of saturation, respectively. The presence of molybdenum in 42CrMoS4 steel did not increase the wear resistance of the alloy.

Keywords: wear resistance, fatigue wear, structural steel, carburizing, alloying elements.

Причиной выхода многих деталей машин, таких как зубчатые колеса, шестерни, подшипники качения, колеса железнодорожных составов, элементы штамповой оснастки и др., подвергающихся в процессе эксплуатации циклическим, пульсирующим и знакопеременным нагрузкам, является контактная усталость материала. На способность сопротивляться усталости первоочередное влияние оказывает твердость сплава [1]. Максимальную твердость поверхностных слоев можно получить посредством проведения цементации, которая получила наибольшее распространение в машиностроительной отрасли. Традиционно цементуемые стали после термической обработки обычно имеют низкую твердость сердцевины, которая не превышает 30–35 HRC. Такой величины твердости недостаточно для сопротивления подповерхностных слоев пульсирующим контактными нагрузкам свыше 1000 МПа. Поэтому для решения этой задачи можно применить среднеуглеродистые конструкционные стали 40X и 35ХГСА [2], которые содержат в качестве карбидообразующего элемента только хром. В настоящее время на ОАО «БМЗ – УКХ «БМК» произво-

дится новая марка стали 42CrMoS4, содержащая карбидообразующий молибден. Его наличие может повлиять на морфологию фазовых составляющих и изменить износостойкие характеристики.

Целью работы являлось установление влияния длительности цементации на износостойкость конструкционных среднеуглеродистых сталей 40X, 35ХГСА и 42CrMoS4.

Методика проведения исследований. Объектом исследований являлись цементованные слои конструкционных среднеуглеродистых низколегированных сталей 40X, 35ХГСА и 42CrMoS4. Упрочнение поверхностного слоя осуществлялось путем проведения цементации в древесно-угольном карбюризаторе с добавкой карбоната бария BaCO₃ при температуре 920 °С с длительностью активного насыщения 8 или 12 ч. Окончательные свойства формировались посредством проведения закалки в масле с температуры 860 °С и последующем низком отпуске при температуре 200 °С в течение 1 ч. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе «Метам-РВ22» и сканирующем электронном микроскопе «Vega II» LSH. Травление микрошлифов проводилось в 1–5%-м спиртовом растворе азотной кислоты. Измерение распределения микротвердости по толщине упрочненных слоев проводилось на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 1,962 Н. Интенсивность накопления усталостных повреждений в поверхностном слое образцов при многократном контактом воздействии на материал исследовали на установке для испытаний на контактную усталость и износ [3] при напряжениях 1300 ± 65 МПа.

Результаты исследований и их обсуждение. После проведения полного цикла упрочнения металлическая матрица науглероженных слоев состоит из мартенсита отпуска и остаточного аустенита, в которой присутствует карбидная фаза. В таблице 1 приведены размеры карбидов и их объемная доля, определенная в поверхностном слое толщиной 0,2 мм от поверхности образцов. Анализ данных показал, что минимальное содержание карбидов и их наименьший размер обнаружены у диффузионных слоев стали 35ХГСА. Максимальные размеры и процентное содержание включений выявлены у диффузионных слоев стали 42CrMoS4.

Объемная доля карбидной фазы и максимальный размер включений в науглероженных слоях сталей 40X, 35ХГСА и 42CrMoS4

Марка стали	Длительность ХТО, ч					
	8			12		
	Объемная доля, %	Максимальный размер включений, мкм	Микротвердость поверхности / сердцевины, ГПа	Объемная доля, %	Максимальный размер включений, мкм	Микротвердость поверхности / сердцевины, ГПа
40X	15	10	7,9 / 5,6	40	20	8,2 / 5,5
35ХГСА	10	2	9,1 / 6	15	3	9,1 / 6
42CrMoS4	30	10	8,2 / 6,0	40	30	7,3 / 5,6

После проведения испытаний на контактную усталость установлено, что у всех исследованных партий образцов присутствует этап приработки с контртелом, который длится около 1000–1500 циклов нагружения (рис. 1). У образцов стали 35ХГСА после 8- и 12-часовой химико-термической обработки (ХТО) и стали 40X – после

8-часовой – после этапа приработки обнаружена высокая износостойчивость, которая составила 6,4 тыс., 10 тыс. и 12,9 тыс. циклов нагружения соответственно. После чего интенсивность износа возрастает. У данных слоев величина стойкости, определенная при достижении лунки износа 0,6 мм, составила в интервале 20–30 тыс. циклов.

Для остальных диффузионных слоев зависимости износа несут иной характер. У цементованного слоя стали 40X, подвергнутого 12-часовой ХТО, зависимости износа имеют характер, близкий к равномерному. Максимальная стойкость данного слоя составила 32,5 тыс. циклов. Для цементованных слоев стали 42CrMoS4 после этапа приработки сохраняется высокая скорость износа, которая сохраняется при достижении лунки износа около 0,2 мм. После этого интенсивность изнашивания снижается, но указанные слои обладают минимальной стойкостью среди всех испытанных – 17,2 тыс. (12 ч ХТО) и 18,3 тыс. (8 ч ХТО) циклов нагружения.

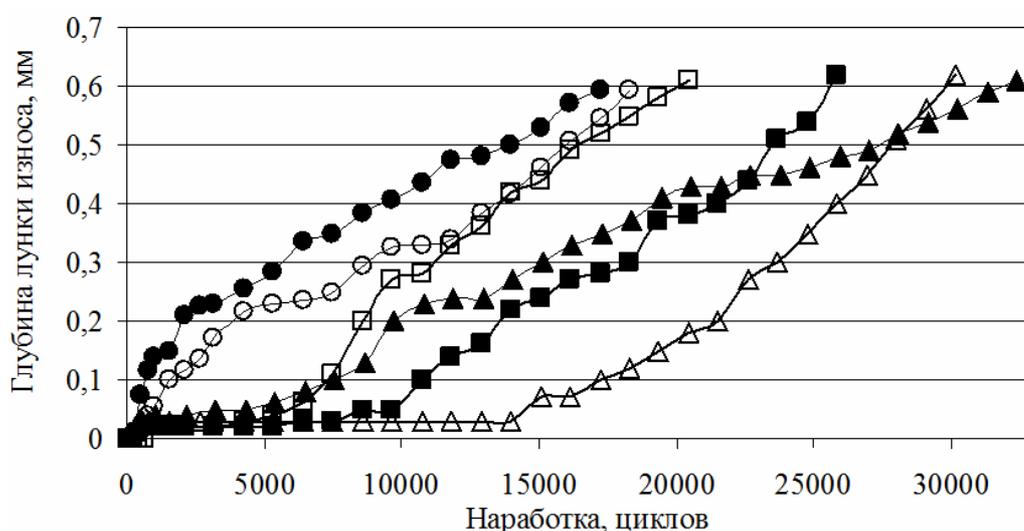


Рис. 1. Кривые износа науглероженных слоев стали 35ХГСА (■, □), 40Х (▲, △) и 42CrMoS4 (●, ○) при амплитуде контактных напряжений 1300 ± 65 МПа: светлые маркеры – 8-часовая химико-термическая обработка; темные маркеры – 12-часовая химико-термическая обработка

Металлографическим исследованием установлено, что все исследованные слои сопровождаются питтинговым изнашиванием. Уже на начальном этапе при первых контактах с контртелом материал образцов претерпевает пластическую деформацию. При увеличении наработки в деформированных объемах материала образуются зоны наклепа, в которых зарождаются и распространяются трещины контактной усталости, приводящие, в конечном счете, к выкрашиванию объемов деформированного материала. Образование питтингов сопровождается перераспределением действующих напряжений на контактной поверхности образцов и ускорению интенсивности износа.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Установлено, что у образцов стали 35ХГСА после 8- и 12-часовой ХТО и стали 40Х после 8-часовой ХТО обнаружена высокая износостойчивость материала, которая составила 6,4 тыс., 10 тыс. и 12,9 тыс. циклов нагружения соответственно.

2. Определено, что максимальной стойкостью к изнашиванию обладают науглероженные слои стали 40Х. Их наработка составила 30,2 тыс. и 32,4 тыс. циклов

нагрузки контактными напряжениями 1300 ± 65 МПа после 8- и 12-часового насыщения соответственно.

3. Присутствие молибдена в стали 42CrMoS4 не привело к увеличению износостойкости науглероженных слоев.

Литература

1. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали : справочник / Ю. А. Геллер. – М. : Металлургия, 1984. – 584 с.
2. К вопросу влияния остаточного аустенита на износостойкость науглероженных слоев стали 40X и 35ХГСА / И. Н. Степанкин [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. – Минск, – 2019. – С. 104–116.
3. Устройство для испытания на контактную усталость и износ : полезная модель ВУ 7093 / Степанкин, И. Н., Кенько, В. М., Панкратов, И. А. – Опубл. 28.02.2011.

УДК 539.216.2+666.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ Cu° В СТРУКТУРЕ SiO_2 ПЛЕНКИ

А. А. Бойко, М. Ф. С. Х. Аль-Камали, Е. Н. Подденежный

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Н. А. С. Аль-Арики

Таузский университет, Республика Йемен

На основании анализа СЭМ-изображения и масс-спектрометрии твердотельных образцов, полученных наноструктурированных $SiO_2 : Cu$ пленок, высказано предположение, что при высокой концентрации Cu° в пленке формируются изолированные наночастицы меди сферической формы. Построена модель распределения атомов меди в структуре высококремнеземистой матрицы, показано, что распределение меди в структуре пленки требует учета концентрации атомов меди в мишени, технологических режимов и среды формирования пленок. Обоснована перспективность таких материалов для датчиков интенсивности солнечного излучения.

Ключевые слова: наноструктурированные пленки, ионы меди, СЭМ-изображение.

MODELING OF Cu° DISTRIBUTION IN THE SiO_2 FILM STRUCTURE

A. A. Boika, M. F. S. H. Al-Kamali, E. N. Poddenezhny

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

N. A. S. Al-Areqi

Department of Chemistry, Taiz University, Republic of Yemen

Based on the analysis of the SEM-image and mass spectrometry of solid-state samples obtained from nanostructured $SiO_2 : Cu^{\circ}$ films, it is suggested that isolated spherical copper nanoparticles are formed in the film at a high concentration of Cu° . A model of the distribution of copper atoms in the structure of a high-silica matrix is constructed, it is shown that the distribution of copper in the film structure requires taking into account the concentration of copper atoms in the target, technological modes and the medium of film formation. The prospects of such materials for solar radiation intensity sensors are substantiated.

Keywords: nanostructured films, copper ions, SEM-image.

Одно из важных направлений тонкопленочного материаловедения, получившее ее активное развитие в течение последних двух десятилетий, – это разработка методов и способов формирования композиционных покрытий с высокой степенью однородности их структуры и свойств. Как правило, получить композиционные покрытия, стехиометрический состав которых соответствует структуре распыляемой мишени, является сложной задачей. Композиционные покрытия используются в различных областях электроники и оптики, на основе таких покрытий происходит формирование тонкопленочных конденсаторов, резисторов, а также формирование элементов оптоэлектронных устройств, в которых используются такие свойства покрытий, как просветление, изменение отражения в необходимом интервале длин волн, фильтрация, поляризация излучения и т. д. Применение покрытий существенно улучшает параметры и характеристики разрабатываемых изделий, устройств и аппаратуры. Покрытия сложного элементного состава и архитектуры используются при создании оптических систем для электронной техники (дисплеев, оптических устройств обработки и хранения информации и т. д.), в архитектуре (светоотражающие, светопоглощающие и энергосберегающие селективные покрытия), производстве солнечных элементов и др.

Для осаждения покрытий используются различные методы испарения, но при использовании сложных по химическому и элементному составу композиционных мишеней сталкиваются с трудностями получения мишеней больших геометрических размеров, поэтому в последнее время широко внедряются для формирования покрытий такие методы, как импульсное лазерное испарения [1–3], электронно-лучевое и резистивное испарение. Данные методы позволяют получать покрытия, используя в качестве источника материала мишени небольшого размера.

Другим «бурно» развивающимся направлением в технологии формирования покрытий являются разработка новых материалов и технологии получения наноструктурированных покрытий, реализующих даже при небольших толщинах слоев механизмы плазмонного и экситон-плазмонного поглощения. Сейчас является актуальным направление в области создания конструкционных тонкопленочных материалов для оптоэлектроники. Покрытия оптических элементов, содержащие прозрачную матрицу с введенными в ее состав наночастицами металлов, находят применение в преобразовании солнечной энергии [4, 5], электронике [6] и катализе [7]. В настоящей работе выбор пленок состава $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, обусловлен тем фактом, что при окислении меди образуются оксиды Cu_2O и CuO [7]. При этом оксиды меди Cu_2O , CuO обладают не только способностью увеличивать поглощение в определенном, заданном оптическом диапазоне, но и характеризуются высокотемпературной сверхпроводимостью [8], что делает такие покрытия, особенно при сверхмалых толщинах (не более 100 нм), перспективными для применения в солнечных элементах.

Целью данной работы было установление характера распределения частиц Cu^0 в высокоремнеземистой матрице формируемой пленки.

Нанесение тонких пленок осуществляли методом лазерного ассистирующего воздействия в процессе электронно-лучевого диспергирования мишени.

Режимы нанесения пленок $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, показатель преломления и геометрическая толщина полученных пленок $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, определенных с помощью лазерного эллипсометра и СЭМ, приведены в таблице.

Режимы нанесения, показатель преломления и геометрическая толщина пленок $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, определенных с помощью лазерного эллипсометра и СЭМ

Состав, мишень и концентрация в атомной массе	Время распределения	Показатель преломления, n	Толщина, нм	
			Эллипсометр	СЭМ
SiO_2	40	1,702	27,027	35,7
$\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$ (1Si : 0,20 Cu)	40	1,76	50,99	51,6
$\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$ (1Si : 0,30 Cu)	40	1,884	125,45	143
$\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$ (1Si : 0,40 Cu)	38	2,287	65,49	75,4

На рис. 1 приведено СЭМ-изображение скола пленки $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, нанесенной на кремниевую подложку. Видно, что в объеме покрытия отсутствуют сколы, поры и разрушения. Пленка формируется плотной и однородной. Режимы нанесения выбирались с условием, чтобы толщина была ~ 100 нм.

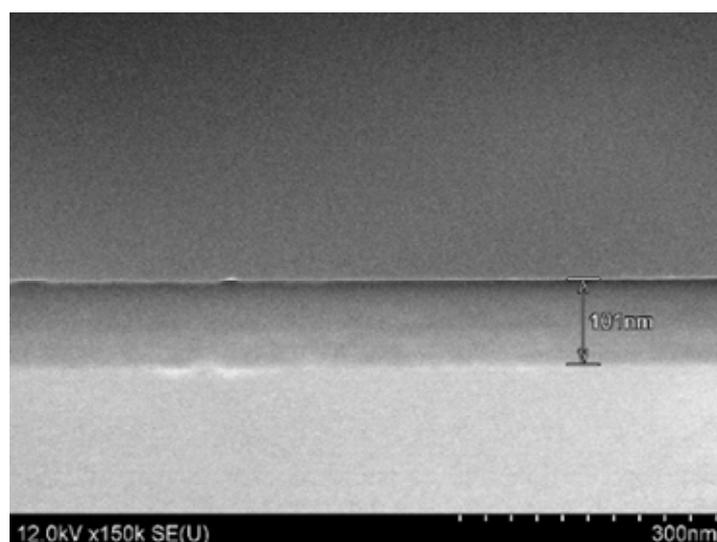


Рис. 1. СЭМ-изображение поверхности скола пленки $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, нанесенной методом импульсного лазерного (концентрация 1 моль Si : 0,4 моль Cu)

Для анализа характера распределения ионов меди в объеме пленки вначале были сформированы пленки толщиной ~ 300 нм. СЭМ-изображение поверхности и скола пленки приведены на рис. 2 и 3.

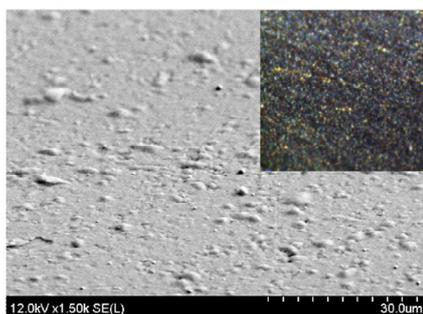


Рис. 2. СЭМ-изображение поверхности пленки $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$ (вставка – изображение, полученные ПЭМ)

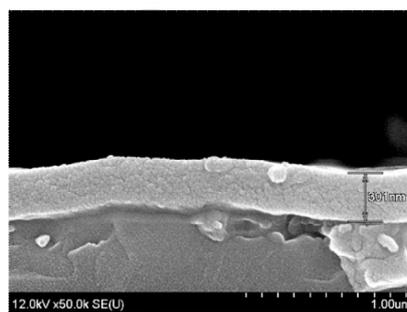


Рис. 3. СЭМ-изображение скола пленки $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$

Анализ проводили методом масс-спектрометрии твердотельных образцов. Для этого был использован времяпролетный масс-спектрометр вторичных ионов – TOF.SIVS.5-200. Это позволило получить химический профиль по глубине пленки (рис. 4) и построить трехмерную химическую топографию распределения меди в структуре SiO_2 пленки (рис. 5).

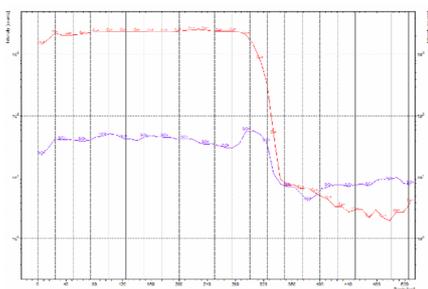


Рис. 4. Профиль распределения Cu в объеме пленки

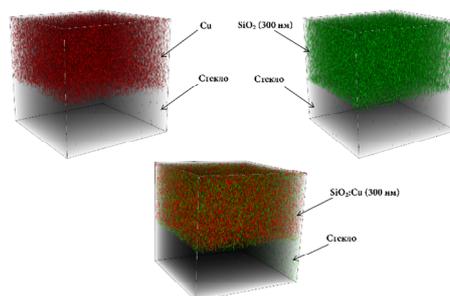


Рис. 5. 3D-модель распределения Cu в объеме пленки

Таким образом, предложена модель распределения ионов меди в структуре высококремнеземистой матрицы и сформированной пленки по результатам структурных и данных масс-спектрометрии твердотельных образцов, позволившая построить трехмерную химическую топографию распределения меди в структуре пленки и объяснить появление в ней плазмонного эффекта, связанного с наночастицами Cu° сферической формы.

Литература

1. Берлин, Е. В. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е. В. Берлин, С. А. Двинин, Л. А. Сейдман. – М. : Техносфера, 2007. – С. 11–17.
2. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика / под. ред. В. В. Лучинина, Ю. М. Таирова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – С. 284–304.
3. Иванов, А. Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование / А. Иванов, Б. Смирнов // Наноиндустрия. – 2012. – № 6. – С. 28–34.
4. An Overview of Stretchable Strain Sensors from Conductive Polymer Nanocomposites / J. Chen [et al.] // Journal of Materials Chemistry C. – 2019. – Vol. 38, N 7. – P. 11710–11730.

5. Synthesis and optical characterization of copper oxide nanoparticles / S. Amrut [et al.] // *Advances in Applied Science Research*. – 2010. – N 1 (2). – P. 36–40.
6. Thickness-dependent bending modulus of hexagonal boron nitride nanosheets / S. Barth [et al.] // *Nanotechnology*. – 2009. – N 20. – P. 1–6.
7. Коршунов, А. В. Особенности окисления нанопорошков меди при нагревании в воздухе / А. В. Коршунов, А. П. Ильин // *Изв. Том. политехн. ун-та*. – 2008. – Т. 313, № 3. – С. 5–13.
8. Naddaf, M. Characterization of nanostructured copper-porous silicon matrix formed on copper-coated silicon substrate via electrochemical etching / M. Naddaf, O. Mrad, A. Al-Zier // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. – 2014. – Vol. 115, N 4. – P. 1345–1353.

УДК 541.64:678.742.2

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИОЛЕФИНОВ
И МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕНТОНИТА**

Д. Л. Подобед

*Филиал «Институт профессионального образования» Университета
гражданской защиты МЧС Беларуси, г. Гомель*

В. М. Шаповалов

*Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси», г. Гомель*

Показано, что для смеси вторичных полиолефинов и диспергированного в планетарной мельнице бентонита, модифицированного кремнийорганической жидкостью и гудроном соап-стока, разрушающее напряжение при растяжении по сравнению с исходным композитом увеличивается в 1,5–2,0 раза. Для содержания в композите модифицированного бентонита в пределах 2,5–4,5 мас. % характерны стабильные показатели его прочности, что указывает на формирование в этих условиях более однородной структуры композиционной системы. Выдвинуто предположение о том, что при содержании до 42,5 мас. % частиц бентонита с дисперсностью 40 мкм и менее активируется межмолекулярное взаимодействие на границе раздела «полимер – наполнитель». Рассмотрен механизм повышения прочностных характеристик композитов с модифицированным бентонитом, обусловленный комплексом адгезионных взаимодействий и физико-химических превращений на межфазных границах.

Ключевые слова: композиционный материал, смеси вторичных полиолефинов, модификация, бентонит, прочностные свойства, рециклинг.

**COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF SECONDARY
POLYOLEFINS AND BENTONITE**

D. L. Podobed

*Branch “Institute of Professional Education”
of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations
of Belarus, Gomel*

V. M. Shapovalov

*Institute of Mechanics of Metal Polymer Systems named after V. A. Bely
of the National Academy of Sciences of Belarus”, Gomel*

It is shown that for a mixture of secondary polyolefins and bentonite dispersed in a planetary mill, modified with organosilicon liquid and soapstock tar, the destructive tensile stress increases

by 1.5–2.0 times compared to the initial composite. For the content of modified bentonite in the composite in the range of 2.5–4.5 wt. % is characterized by stable indicators of its strength, which indicates the formation of a more homogeneous structure of the composite system under these conditions. It has been suggested that with a content of up to 42.5 by weight. % of bentonite particles with a dispersion of 40 microns or less, the intermolecular interaction at the polymer-filler interface is activated. The mechanism of increasing the strength characteristics of composites with modified bentonite due to a complex of adhesive interactions and physico-chemical transformations at the interphase boundaries is considered.

Keywords: composite material, mixtures of secondary polyolefins, modification, bentonite, strength properties, recycling.

Проблема переработки полимерных отходов приобретает актуальное значение не только с позиций необходимости охраны окружающей среды, но и вследствие образования дефицита полимерного сырья, в результате чего полимерные отходы становятся мощным вторичным сырьевым ресурсом, в том числе в машиностроении [1]. Определенный интерес в качестве активных наполнителей полимеров представляет класс бентонитовых глин, которому применительно к композитам на основе первичных полимеров (ПЭТФ, полиолефины, полиамиды ПА и др.) уделено огромное внимание [2, 3]. В то же время композиты на основе вторичных термопластов, содержащих данный перспективный наполнитель, исследованы недостаточно.

Цель работы – получение и исследование композиционных полимерных материалов на основе смесей вторичных полиолефинов и модифицированного бентонита.

Материалы и методы исследований. В качестве наполнителей использовали бентонитовую глину, предварительно модифицированную кремнийорганической жидкостью ПМС-200 и гудроном soapстока, с последующим измельчением полученной массы в планетарной мельнице. В качестве полимерной матрицы использовали смеси полиолефинов (ПО) – вторичного полиэтилена низкого и высокого давления (вторичный ПЭНД и ПЭВД) и вторичный полипропилен (ТУ РБ 37391633.001–2000) при соотношении 1 : (1–0,5) соответственно. Композиции готовили смешиванием компонентов без кондиционирования проб. Из подготовленных составов методом литья под давлением на литьевой машине получали образцы в виде лопаток. Образцы ленты получали на экструзиографе «RHEOCORD 90 НААКЕ» путем экструдирования композиции через щелевую головку и каландры. Механическую прочность образцов определяли на комплексе «INSTRON 5567» (ГОСТ 11262–80). Состав анализировали с помощью ИК-спектрометра с Фурье-преобразованием фирмы NEXUS E.S.P. (Thermo Nicolet, США). Для определения степени кристалличности использовали метод дифференциальной сканирующей калориметрии (микрокалориметр ДСМ–10М). Микроструктурные исследования проводили с помощью растрового электронного микроскопа «VEGA II» LSH (TESCAN, Чехия).

Результаты и их обсуждение. Установлено, что при введении в смесь вторичных полиолефинов высокодисперсного наполнителя (модифицированная бентонитовая глина в концентрации 2,0–4,0 мас. %) достигается повышение разрушающего напряжения при растяжении по сравнению с исходным композитом в 1,5–2,0 раза. При этом для содержания в композите модифицированного бентонита в пределах 2,5–4,5 мас. % характерны стабильные показатели его прочности, что указывает на формирование в этих условиях более однородной структуры композиционной системы. Улучшение свойств обусловлено интенсификацией процесса диспергирования частиц бентонита при воздействии на поверхность бентонита смеси ПМС-200 и гудрона soapстока, что связано со способностью полярных групп ПМС-200 к адсорбции на поверхности наполнителя вследствие изменения ее физико-химической активно-

сти путем реализации эффекта Ребиндера. Показано, что в наполнителе объем частиц с размером 40 мкм и менее составляет около 42,5 %, что представляется достаточным для активирования межмолекулярных взаимодействий на границе раздела «полимер – наполнитель».

Механизм повышения прочности композитов, содержащих модифицированный бентонит, обусловлен комплексом процессов, протекающих в исследуемой композиционной системе. Физико-химическая активность на границе раздела фаз путем интенсификации в них окислительных реакций и реализации активирующего эффекта сдвига под давлением (Эффект Ениколопова) способствует усилению адгезионного взаимодействия полимера и наполнителя, о чем свидетельствуют результаты исследования прочности при сдвиге образцов из пластин ПЭНД. Так, этот показатель для образцов с использованием модифицированного бентонита составил 0,9–1,2 МПа, в то время как для исходных образцов – 0,6–0,7 МПа.

Предполагается, что одним из процессов, способствующих реализации механизма повышения прочности композитов, является взаимодействие окислившихся групп макромолекул полимеров с бентонитом, о чем свидетельствует (рис. 1) появление полос поглощения в области $900\text{--}1100\text{ см}^{-1}$, указывающих на наличие в структуре вторичного полимера кислородосодержащих групп (например, гидроксильных), а также полосы поглощения около 1500 см^{-1} (карбонильная группа). По-видимому, эти группы способны к взаимодействию с активированной поверхностью частиц бентонита по механизмам образования ван-дер-ваальсовых, водородных и донорно-акцепторных связей, что вносит основной вклад в адгезию. Также частицы модифицированного бентонита выступают центрами кристаллизации, способствующими образованию более совершенной мелкокристаллической структуры, что обеспечивает формирование более высокой однородности, и, как следствие, улучшение физико-механических характеристик композита. На это указывает структура композитов с внедренными в ее состав включениями модифицированного бентонитового наполнителя (рис. 2).

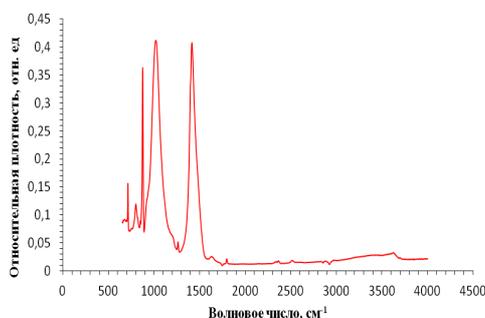


Рис. 1. ИК-спектр композиции на основе ПЭВД_{вт} + ПЭНД_{вт} в соотношении 50 : 50 соответственно + 2,5 мас. % модифицированного ПМС-200 бентонита

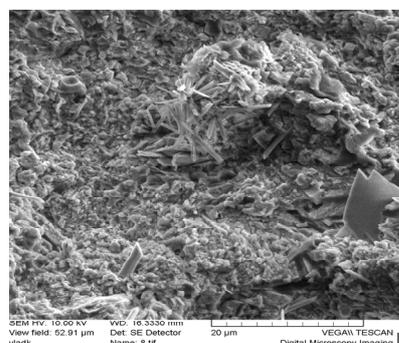


Рис. 2. Структура бентонитонаполненного композита

Для смесей на основе вторичных полимеров в присутствии высокодисперсных частиц модифицированного полидисперсного бентонита характерно улучшение прочности композита вследствие усиления в них межфазного взаимодействия и формирования структурной однородности материала. Представляется, что механизм улучшения свойств композитов основан на стимулировании адсорбции модифика-

тора на частицах наполнителя и активных групп полимера на активированной поверхности модифицированного наполнителя. В совокупности эти процессы улучшают условия для адгезии полимера к частицам активированного наполнителя.

Литература

1. Подобед, Д. Л. Улучшение эксплуатационных свойств композиционных материалов на основе вторичных полиолефинов с использованием дисперсных наполнителей и антипиреновых добавок / Д. Л. Подобед, В. М. Шаповалов // Вестн. Гродн. гос. ун-та им. Я. Купалы. Сер. 6. Техника. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 6–13.
2. Песецкий, С. С. Нанокompозиты, получаемые диспергированием слоистых силикатов в расплавах полимеров (обзор) / С. С. Песецкий, С. П. Богданович, Н. К. Мышкин // Полимерные материалы и технологии. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 7–37.
3. Заикин, А. Е. Совместимость полимеров в присутствии нанонаполнителей / А. Е. Заикин // Вестн. технол. ун-та. – 2020. – Т. 23. – № 3. – С. 53–66.

УДК 537.531:678.073:678.046

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИТОВ**

В. А Банний

Учреждение образования «Гомельский государственный медицинский университет», Республика Беларусь

И. В. Царенко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Дана характеристика материалов, применяемых в качестве электромагнитных экранов. Установлены основные технологические параметры формирования методом аэродинамического диспергирования расплава волокнистого композиционного радиопоглощающего материала на основе полиэтиленовой матрицы, наполненной магнитомягким ферритом. Методом электронной микроскопии изучены структурные особенности волокнистого радиопоглощающего материала, модифицированного мягкомагнитным ферритом.

Ключевые слова: радиопоглощающие материалы, волокнистые композиционные полимерные материалы, метод аэродинамического диспергирования расплава.

**TECHNOLOGICAL FEATURES OF RADIOABSORBING FIBROUS
POLYMER COMPOSITES FORMATION**

V. A. Bannyi

*Educational Institution “Gomel State Medical University”,
the Republic of Belarus*

I. V. Tsarenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Characterization of materials for electromagnetic screens was done. Basic technological parameters for formation of fibrous polymer radioabsorbing materials based on modified by soft ferrite polyethylene using the melt blowing technique. Structural features of fibrous soft ferrite containing radio-absorbing material were investigated by electron microscopy technique.

Keywords: radioabsorbing materials, fibrous polymer composites, melt blowing technique.

В связи с интенсивным развитием радио- и электронной техники к естественному фоновому радиоизлучению Земли добавились новые источники электромагнитного излучения. Это, прежде всего, сотовая и спутниковая связь, системы навигации и радиолокации, радиотехнические установки, бытовая и медицинская радиотехника и др. Во многих из этих технических систем используется энергия электромагнитных волн сверхвысоких частот (СВЧ). При эксплуатации радиотехнических систем СВЧ возникают проблемы электромагнитной безопасности. Повышенные уровни электромагнитных полей и излучений оказывают отрицательное влияние на биологические объекты, организм человека. Кроме этого, паразитные переотражения и интерференция электромагнитных волн могут быть серьезным источником помех для эффективного функционирования технических устройств СВЧ. Они обостряют проблему электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и систем защиты информации.

Эффективным средством обеспечения требований электромагнитной экологии, электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности являются электромагнитные экраны. Одним из наиболее перспективных способов экранирования СВЧ-излучений связан с применением полимерных композитных радиополагающих материалов (РПМ) [1–3]. Свою нишу в современном разнообразии РПМ занимают волокнистые полимерные композиты благодаря оптимальному сочетанию свойств. Они легкие и могут работать одновременно как радиопоглотители, теплозащита, шумоизоляция, что обуславливает эффективность их применения в гражданском и военном строительстве для создания маскирующих изделий военного и гражданского назначения. Необходимость такой защиты продиктована тем, что мощный электромагнитный импульс может моментально вывести из строя практически любую незащищенную радио- и электронную технику.

Данная работа посвящена разработке радиопоглощающего волокнистого полимерного композиционного материала на основе полиэтилена. Выбор полиэтилена в качестве полимерного связующего обусловлен выгодным сочетанием его свойств: высокой химической стойкостью, удовлетворительными механическими характеристиками, технологичностью переработки и низкой стоимостью. Основной акцент в исследовании сделан на изучении влияния технологических факторов процесса аэродинамического диспергирования расплава на структурные параметры радиопоглощающих волокнистых полимерных композитов.

Материалы и методика эксперимента. В качестве полимерного связующего использовали полиэтилен высокого давления (ПЭ), (ГОСТ 16803–070). В качестве наполнителя – магнитомягкий феррит (ММФ), (ТУ 6-09-5111–84 марка 2500 НМС). По проведенной ранее рецептурной оптимизации состава материала на образцах, полученных методом термического прессования [4], наилучшие радиопоглощающие характеристики показали материалы, содержащие 38 мас. % наполнителя. В качестве пластификатора использовали диоктилфталат в количестве 0,5 мас. %. Исходные компоненты смешивали и гранулировали, после чего из гранулята формировали волокнистый материал методом аэродинамического диспергирования расплава (метод melt-blowing) [5].

Исследование структурных элементов волокнистого материала, таких как диаметр волокна, плотность упаковки, проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа Leo 982.

Результаты исследования. Структурные особенности волокнистого РПМ определяются множеством технологических показателей процесса аэродинамического диспергирования расплава. Во-первых, плотность и в целом качество упаковки ма-

териала будут определяться достигнутой в результате нагрева в экструдере текучестью расплава полимера. Существует зависимость показателя текучести расплава от распределения температур по зонам экструдера (градиент температур) [5]. Всего в процессе экструзии выделяют три основные температурные зоны, определяющие достигаемую текучесть расплава (рис. 1): зона питания, характеризуемая температурой $T_{пит}$; зона сжатия (зона пластификации), характеризуемая температурой $T_{сж}$; зона дозирования (зона выдавливания), характеризуемая температурой $T_{доз}$. Очень важной характеристикой при формировании волокна является также температура экструзионной головки $T_{эг}$. Для наиболее эффективного выдавливания экструдата и получения качественного волокна необходимо добиться показателя текучести расплава около 0,2 г/мин. Значения температур в различных областях экструдера устанавливаются экспериментально в зависимости от материала гранулята (полимерной матрицы и наполнителей).

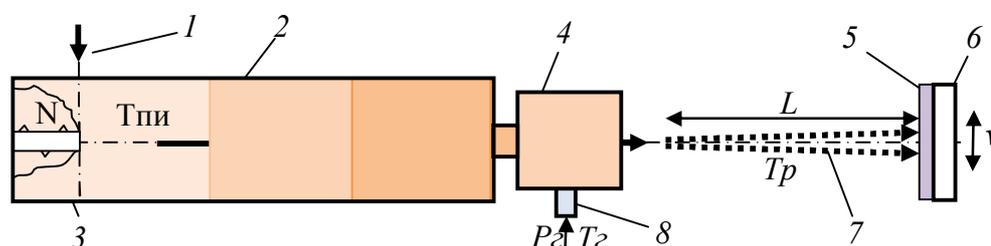
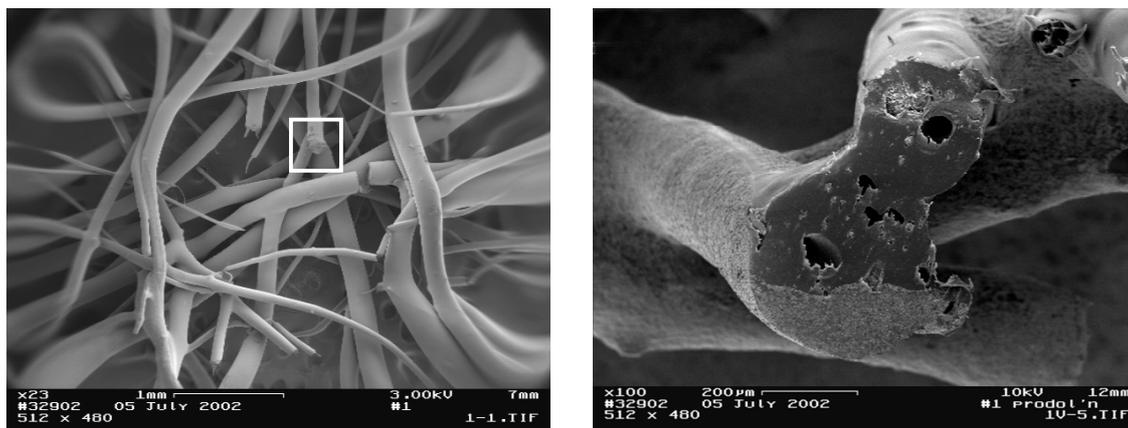


Рис. 1. Схема технологического процесса формирования волокнистого полимерного материала:

1 – бункер; 2 – экструдер; 3 – шнек; 4 – распылительная головка;
5 – волокнистая масса; 6 – формующая подложка; 7 – газополимерный
поток; 8 – патрубок подачи сжатого воздуха

Для исследуемого состава (ПЭ + 38 масс % ММФ) требуемая текучесть расплава достигается при $T_{пит} = 185$ °С, $T_{сж} = 325$ °С, $T_{доз} = 430$ °С, $T_{эг} = 420$ °С. Также на плотность упаковки волокон и их диаметр, прочность когезионного взаимодействия между слоями оказывает влияние частота вращения шнека N , расстояние от сопла до формующей поверхности L , температура распыляющего воздуха P . Экспериментальным путем были определены следующие технологические параметры: $N = 20$ мин⁻¹, $L = 18$ см, $T = 50$ °С. Такие режимы экструдирования позволяют получить структуру, представленную на рис. 2, характеризуемую стабильностью формы, объемной плотностью упаковки 0,3 г/см³, диаметром волокон, изменяющимся в диапазоне от 23 до 320 мкм. Частицы наполнителя не выступают за контуры волокна, не вызывают появления «бусинок» (затвердевших капелек расплава) и других неоднородностей волокнистого каркаса.

По данным электронно-микроскопических исследований нетканые волокнистые РПМ представляют собой совокупность наполненных полимерных волокон, когезионно связанных в местах контакта. Частицы наполнителя (ММФ с размером частиц 10–50 мкм) закапсулированы внутри волокон (рис. 2).



а)

б)

Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения:
 а – нетканый волокнистый РПМ состава ПЭ + ММФ (38 мас. %);
 б – поперечный срез волокон

Установлены основные технологические параметры для формирования волокнистого композиционного РПМ на основе полиэтиленовой матрицы, наполненной ММФ, методом аэродинамического диспергирования расплава. Методом электронной микроскопии изучены структурные особенности волокнистого РПМ.

Л и т е р а т у р а

1. Банний, В. А. Радиопоглощающие материалы на основе полимерных композитов как средства защиты от СВЧ-излучения / В. А. Банний, А. В. Макаревич // *Материалы международной науч. конф. по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения*, Минск, 13–16 мая 2003 г. – Минск, 2003. – С. 104–105.
2. Банний, В. А. Радиопоглощающие материалы на основе полимерных композитов как средства обеспечения электромагнитной совместимости и безопасности радиоэлектронных систем / В. А. Банний, А. В. Макаревич, Л. С. Пинчук // *ЭМС-2003 : материалы V Междунар. симп. по электромагнитной совместимости и экологии*, Санкт-Петербург, 2003 г. – СПб., 2003. – С. 95–97.
3. Банний, В. А. Радиопоглощающие материалы на основе наполненного полиэтилена / В. А. Банний, И. В. Царенко // *Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого*. – 2009. – № 3. – С. 3–6.
4. Банний, В. А. Влияние размерных и рецептурных параметров полимерных композитов на их радиофизические характеристики / В. А. Банний, А. В. Макаревич, Л. С. Пинчук // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси*. – 2000. – Т. 44, № 4. – С. 109–111.
5. *Melt blowing: equipment, technology and polymer fibrous materials* / L. S. Pinchuk [et al.]. – Berlin : Springer, 2002. – 212 p.

СЕКЦИЯ 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ, МЕХАНИЧЕСКИХ И БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.891

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ МНОГОДИСКОВОГО ТОРМОЗА

С. Н. Целуева, М. Ю. Целуев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Предложены эмпирические зависимости для величины коэффициента трения от скорости скольжения ряда фрикционных металлокерамических материалов при трении по углеродистой стали в среде масла. Выполнены численные исследования тепловой нагруженности фрикционных дисков для условий трения, имитирующих торможение колесного трактора. Получена зависимость для максимального приращения температуры фрикционных дисков при трении от ряда эксплуатационных параметров.

Ключевые слова: коэффициент трения, многодисковый тормоз, фрикционный диск, пара трения, фрикционный нагрев, численный эксперимент.

THERMAL CONDITION OF MULTIDISC BRAKE

S. N. Tselueva, M. Yu. Tseluev

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Empirical dependences are proposed for the value of the friction coefficient on the sliding speed of a number of friction materials during friction against carbon steel in an oil. Numerical studies of the thermal loading of friction discs for friction conditions simulating the braking of a wheeled tractor have been carried out. The dependence for the maximum increase in the temperature of friction discs during friction on a number of operational parameters has been obtained.

Keywords: friction coefficient, multidisc brake, friction disc, friction pair, friction heating, friction field, numerical simulation.

Повышение требований к ресурсу и энергоемкости тормозных систем привело к созданию и применению в тракторах и карьерных самосвалах многодисковых тормозов, фрикционные диски которых работают в среде масла [1, 2]. Несмотря на совершенствование конструкций, материалов и технологий изготовления, важной проблемой при эксплуатации остается влияние фрикционного нагрева дисков на параметры работы многодисковых тормозов. Высокие температуры трения являются причиной интенсивного изнашивания и коробления дисков, что ведет к снижению ресурса и отказу многодисковых тормозов [3]. В связи с этим прогнозирование уровня нагрева фрикционных дисков на стадии проектирования является важной и актуальной проблемой при создании многодисковых тормозов тракторов и карьерных самосвалов.

Цель работы – численное исследование влияния эксплуатационных параметров на величину нагрева фрикционных дисков многодискового тормоза в условиях работы, имитирующих служебные торможения колесного трактора.

Методы исследования. Исследование теплового режима пар трения осуществляли на примере экспериментальной конструкции остановочного многодискового тормоза колесного трактора, пары трения которого взаимодействуют в среде масла. При включении тормоза осуществляется трение между вращающимися фрикционными и неподвижными стальными дисками, сопровождающееся их нагревом вследствие диссипации механической энергии. Тепловой режим, определяющийся температурным полем в паре трения, зависит от многих факторов, в том числе от мощности и продолжительности трения, интенсивности охлаждения, конструкции и материалов дисков тормоза.

Эмпирические зависимости коэффициента трения от скорости скольжения в среде масла для ряда металлокерамических фрикционных материалов по углеродистой стали были получены путем математической обработки экспериментальных данных, приведенных в [4], методом наименьших квадратов.

Динамику изменения скорости V скольжения дисков, необходимую для определения интенсивности теплового источника в парах трения, исследовали на одно-массовой механической модели тормозного механизма путем решения соответствующего дифференциального уравнения движения фрикционных дисков методом Рунге–Кутты четвертого порядка точности с учетом зависимости момента трения M дисков от скорости скольжения:

$$M = p \iint_S \mu r dS, \quad (1)$$

где p – контактное давление в паре трения; $\mu = \mu(V)$ – коэффициент трения скольжения в паре трения тормоза, зависящий от скорости скольжения; r – текущий радиус трения; S – площадь номинального фрикционного контакта в паре трения.

Теоретические исследования теплового режима многодискового тормоза при нагрузочно-скоростных режимах трения дисков, имитирующих служебные торможения трактора, осуществляли в процессе многовариантных численных решений тепловой задачи [5], описывающей нестационарное осесимметричное температурное поле во фрикционной паре многодискового тормоза с учетом теплофизических характеристик материалов, конструкционных и эксплуатационных параметров дисков, методом конечных элементов. В качестве варьируемых факторов в ходе исследования были выбраны момент трения и начальная угловая скорость скольжения дисков, приведенный к валу тормоза момент инерции движущихся масс транспортного средства. Численные исследования осуществляли для фрикционных дисков с накладками из фрикционного металлокерамического материала МК-5.

Результаты исследования. Статистическая обработка экспериментальных данных, приведенных в работе [4], позволила получить эмпирические зависимости для величины коэффициента трения от скорости скольжения фрикционных материалов следующего вида:

$$\mu = \mu_k + (\mu_k - \mu_s) \exp(-kV^n), \quad (2)$$

где μ_k – коэффициент трения при скорости скольжения дисков свыше 15 м/с; μ_s – коэффициент трения покоя; k, n – эмпирические коэффициенты.

Полученные числовые значения эмпирических параметров, входящих в зависимость (2), для ряда фрикционных металлокерамических материалов при трении по углеродистой стали в среде масла приведены в таблице.

**Значения эмпирических параметров модели (2)
для ряда фрикционных материалов**

Обозначение материала	μ_k	μ_s	k	n
МК-5	0,050	0,117	0,437	1,199
Шадеф (ИПМ НАН Беларуси)	0,069	0,156	0,643	0,656
HS-43 (Hoerbiger, Австрия)	0,072	0,129	0,071	1,484
HS-09 (Hoerbiger, Австрия)	0,075	0,117	0,031	1,942

Графические зависимости, приведенные на рис. 1, свидетельствуют об обратной нелинейной зависимости коэффициента трения рассматриваемых фрикционных материалов от скорости скольжения дисков в интервале скоростей до 10 м/с. При дальнейшем росте скорости скольжения коэффициент трения дисков изменяется незначительно.

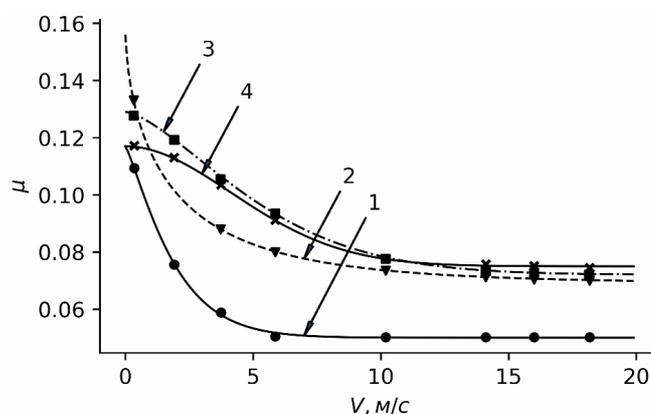


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения ряда фрикционных материалов по стали в среде масла от скорости скольжения:
1 – МК-5; 2 – ШАДЕФ; 3 – HS43; 4 – HS09

Для фрикционных пар многодискового тормоза в исследованных режимах трения установлено, что скорость роста и уровень развиваемых температур на фрикционном контакте пары трения увеличиваются с повышением мощности и продолжительности трения дисков, а также снижением интенсивности теплообмена дисков с окружающей средой. Максимальная температура фрикционного контакта дисков имеет нелинейную с максимумом зависимость от времени. Для рассмотренных условий трения дисков максимум температуры фрикционного контакта дисков наблюдается на поверхности трения в интервале радиусов ρ трения, удовлетворяющих условию $(\rho-r)/(R-r) = 0,65-1,0$ (R, r – внешний и внутренний радиус трения), в момент времени, находящийся в интервале 0,7–0,9 от времени торможения.

Математическая обработка результатов численного эксперимента методом наименьших квадратов позволила получить функциональную зависимость для максимального приращения температуры на фрикционном контакте дисков от величины рассмотренных параметров работы:

$$\Delta T_{\max} = 0,6M\omega + \frac{J\omega^2}{zm} \left(2,45 - \frac{0,04J\omega}{zmM} \right), \quad (3)$$

где ω – начальная угловая скорость вала тормоза; J – момент инерции масс транспортного средства, приведенный к валу тормоза; m – число пар трения в многодисковом тормозе; z – число тормозных механизмов.

Полученная зависимость (3) может быть использована для инженерных оценок величины развиваемой температуры на фрикционном контакте пар трения проектируемых многодисковых тормозов в зависимости от нагрузочно-скоростных режимов трения дисков, а также выбора эксплуатационных параметров, обеспечивающих работу тормоза с допустимой температурой нагрева пар трения.

Литература

1. Заболоцкий, М. М. Применение многодисковых маслоохлаждаемых тормозов на карьерных самосвалах БелАЗ / М. М. Заболоцкий, Г. И. Лось // Горн. журн. – 2008. – № 9. – С. 41–42.
2. Городецкий, К. И. Принудительное жидкостное охлаждение дисковых фрикционных сцеплений и тормозов / К. И. Городецкий, О. В. Евтушик, В. М. Шарипов // Тракторы и сельхозмашины. – 2000. – № 12. – С. 21–24.
3. Результаты испытаний фрикционных дисков из различных материалов для гидромеханических передач самосвалов «БелАЗ» / А. Ф. Ильющенко, [и др.] // Трение и износ. – 2011. – Т. 32, № 3. – С. 248–255.
4. Шарипов, В. М. О коэффициенте трения в контакте пар трения фрикционных муфт в коробках передач автомобилей и тракторов при переключении передач без разрыва потока мощности / В. М. Шарипов, М. И. Дмитриев, К. И. Городецкий // Наука и образование. – 2016. – № 8. – С. 21–30.
5. Исследование теплового режима пар трения многодискового тормоза / В. П. Сергиенко [и др.] // Трение и износ. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 555–564.

УДК 681.511.4

СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНО-ВРЕМЕННЫМ ОПЕРАТОРНЫМ МЕТОДОМ

А. В. Козлов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Системы автоматического управления очень часто имеют в своем составе нелинейные элементы, что значительно усложняет их анализ и синтез. Традиционный подход к исследованию подобных систем имеет ряд трудностей из-за необходимости вычислять интеграл свертки от переменных. Альтернативой подобному подходу является применение многомерного интегрального преобразования по Лапласу.

Ключевые слова: синтез, анализ, регулятор, метод, система.

SYNTHESIS OF SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL BY MULTIDIMENSIONAL-TEMPORARY OPERATOR METHOD

A. V. Kozlov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Automatic control systems very often have nonlinear elements, which greatly complicates their analysis and synthesis. The traditional approach to investigating such systems has a number of difficulties due to the need to calculate the convolution integral from variables. An alternative to such an approach is the use of a multidimensional integral Laplace transform.

Keywords: synthesis, analysis, regulator, method, system.

При использовании многомерно-временного операторного метода (МВОМ) [1] для решения задачи синтеза и идентификации нелинейных замкнутых систем число независимых комплексных переменных p_1, p_2, \dots, p_n стремится к бесконечности [2], поэтому для решения подобных задач используют численные методы, которые не раскрывают полной картины физических процессов в системе и дают результат в виде сложных дифференциальных уравнений, решение которых не всегда позволяет синтезировать регулятор.

Если использовать уже существующий МВОМ в сочетании с принципом динамической компенсации и разложением нелинейных элементов системы в математический ряд, то возможно разработать аналитический метод для синтеза регуляторов в нелинейных системах автоматического управления.

Рассмотрим основные положения предлагаемого метода на примере нелинейной системы, представленной в общем виде на рис. 1, где W_{PE} – передаточная функция (ПФ) регулятора; W_O – ПФ объекта управления.

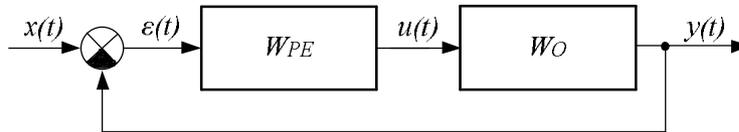


Рис. 1. Структурная схема нелинейной системы управления

Опишем элементы системы управления (рис. 1) рядами Вольтерра [3]. В этом случае поведение замкнутой системы представляется в виде:

$$y(t) = \sum_{q=1}^{\infty} \int_0^t \dots \int_0^t k_3^q(\tau_1, \dots, \tau_q) x(t - \tau_1) \cdot \dots \cdot x(t - \tau_q) d\tau_1 \dots d\tau_q. \quad (1)$$

Тогда, воспользовавшись определением многомерной ПФ:

$$W(p_1, \dots, p_n) = \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} k(\tau_1, \dots, \tau_n) e^{-p_1 \tau_1} \cdot \dots \cdot e^{-p_n \tau_n} d\tau_1 \dots d\tau_n, \quad (2)$$

в рассматриваемой системе можно выделить следующие ПФ:

- $W_{PE}^1(p_1), \dots, W_{PE}^v(p_1, \dots, p_v)$ – ПФ регулятора;
- $W_O^1(p_1), \dots, W_O^i(p_1, \dots, p_i)$ – ПФ объекта управления;
- $W_P^1(p_1), \dots, W_P^j(p_1, \dots, p_j)$ – ПФ разомкнутой системы;
- $W_3^1(p_1), \dots, W_3^q(p_1, \dots, p_q)$ – ПФ замкнутой системы.

Задача синтеза регулятора, как известно, заключается в нахождении таких ПФ регулятора, чтобы замкнутая система обладала эталонными динамическими характеристиками, т. е. чтобы при определенном входном сигнале система выдавала за-

данный отклик. Таким образом, постановка рассматриваемой задачи полностью совпадает с задачей синтеза регуляторов в классе линейных систем. Предполагается, что неизменяемые элементы системы представляют собой соединение линейных инерционных и нелинейных безинерционных звеньев [3].

Поскольку нам известны входной и выходной сигналы всей системы, мы можем задаться эталонной ПФ $W_3^1(p_1), \dots, W_3^N(p_1, \dots, p_N)$.

В итоге мы получим систему, представленную на рис. 2.

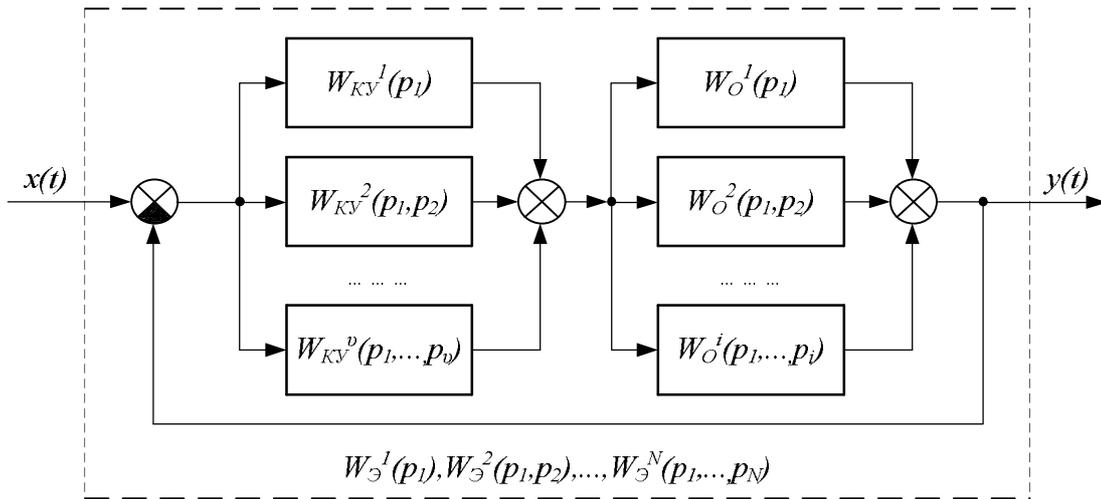


Рис. 2. Структурная схема нелинейной системы управления

На основании правил преобразования структурных схем [1] запишем формулы, связывающие ПФ замкнутой и разомкнутой систем в виде сочетания ядер Вольтерра:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_3^1(p_1) = \frac{W_p^1(p_1)}{1 + W_p^1(p_1)}; \\ \dots; \\ W_3^N(p_1, \dots, p_N) = \frac{W_p^N(p_1, \dots, p_N)}{\left[1 + W_p^1\left(\sum_{r=1}^N p_r\right) \right] \prod_{r=1}^N [1 + W_p^1(p_r)]}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Учитывая, что должно быть выполнено равенство $W_3^N(p_1, \dots, p_N) = W_3^N(p_1, \dots, p_N)$, легко получить ПФ разомкнутой системы. А так как разомкнутая система представляет собой последовательное соединение регулятора и объекта управления, то легко найти ПФ регулятора:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 W_{PE}^1(p_1) = \frac{W_{\exists}^1(p_1)}{1 - W_{\exists}^1(p_1)} (W_0^1(p_1))^{-1}; \\
 W_{PE}^2(p_1, p_2) = \frac{W_{\exists}^2(p_1, p_2)}{[1 - W_{\exists}^1(p_1 + p_2)] \prod_{r=1}^2 [1 - W_{\exists}^1(p_r)]} (W_0^1(p_1 + p_2))^{-1} - \\
 \frac{W_0^2(p_1, p_2) \prod_{r=1}^2 W_{\exists}^1(p_r)}{\prod_{r=1}^2 [1 - W_{\exists}^1(p_r)]} (W_0^1(p_1 + p_2) \prod_{r=1}^2 W_{\exists}^1(p_r))^{-1}; \\
 \dots
 \end{array} \right. \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой решение поставленной задачи. На основании рассмотренного выше можно сделать следующие выводы:

– в классе аналитических нелинейных систем имеет место компенсация динамических характеристик объекта за счет его обратных ПФ, также как и в линейных стационарных и нестационарных задачах;

– точность полученного регулятора зависит от количества ядер Вольтерра, участвующих в расчете;

– аналогично решается задача синтеза при включении регулятора в цепь обратной связи.

Л и т е р а т у р а

1. Козлов, А. В. Многомерно-временно операторный метод анализа элементов системы автоматического управления с нелинейностями типа «произведения»: дис. ... канд. тех. наук: 681.511.4 / А. В. Козлов; Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2007. – 134 с.
2. Луковников, В. И. Многомерный операторный метод анализа систем с модуляцией / В. И. Луковников // Вестн. КГТУ. – 1998. – С. 102–110.
3. Пупков, К. А. Синтез регуляторов систем автоматического управления / К. А. Пупков, Н. Д. Егупова. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 616 с.

УДК 004.932:617.753.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСТИГМАТИЗМА С ПОМОЩЬЮ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

П. Ю. Говядкова, К. С. Курочка

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Глазная хирургия для коррекции астигматизма сегодня становится все менее рискованной процедурой. Новые методы для правильной диагностики, такие как топографические изображения глаз, которые используют принцип Шеймпфлуга, в частности, Пентакам, являются одним из этих инструментов. Астигматизм – одно из наиболее распространенных заболеваний человеческого зрения. Правильное выявление астигматизма может помочь устранить или уменьшить послеоперационные осложнения. Нейронные сети уже показали свой потенциал в процессе принятия решений в разных областях. Поэтому разработка новых алгоритмов и адаптация существующих в области диагностики заболеваний зрения – очень важная и актуальная задача. Одним из направлений исследования

астигматизма является построение его компьютерной модели на основе нейросетевого подхода.

Ключевые слова: медицина, астигматизм, сверточная нейронная сеть, матрица Грама, числовая обработка, обработка изображений.

MODELING ASTIGMATISM WITH A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

P. Y. Govyadkova, K. S. Kurochka

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Eye surgery to correct astigmatism is becoming an increasingly less risky procedure today. New techniques for proper diagnosis, such as topographic eye images that use the Scheimpflug principle, such as the Pentacam, are one of these tools. Astigmatism is one of the major problems that exist in human vision. Proper identification of astigmatism can help eliminate or reduce post-operative complications. Neural networks have already shown their potential to help in the decision-making process in a variety of areas. Therefore, the development of new algorithms based on these techniques can help physicians identify, diagnose different types of vision problems, and demonstrate these optical distortions of the human eye.

Key words: medicine, astigmatism, convolutional neural network, Gram matrix, numerical processing, image processing.

Роговица – это прозрачная внешняя часть человеческого глаза. Она имеет форму купола и изгибает свет, помогая глазу сфокусироваться. Она обеспечивает значительную фокусирующую способность глаза. По определению Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), нарушения рефракции глаза приводят к тому, что глаз не может четко сфокусировать изображение из внешнего мира. Результатом нарушений рефракции является затуманенное зрение, которое иногда бывает настолько сильным, что приводит к ухудшению зрения [1]. Астигматизм является одним из случаев нарушения рефракции и возникает в основном, когда роговица имеет неправильную форму. По оценкам ВОЗ, 153 миллиона человек в мире живут с нарушениями зрения из-за неисправленных аномалий рефракции. Астигматизм также может быть исправлен путем изменения формы роговицы с помощью лазерного кератомилеза или фоторефракционной кератэктомии.

Нейронные сети широко используются в медицине, в том числе для обнаружения и диагностики различных заболеваний [2, 3]. Нейронная сеть – это серия алгоритмов, направленных на распознавание взаимосвязей в наборе данных, которая является одной из самых мощных моделей анализа данных, используемых сегодня в области машинного обучения и искусственного интеллекта [4].

Архитектура сверточной нейронной сети стала стандартом в классификации изображений с момента их первого применения для распознавания рукописных цифр благодаря хорошим результатам в задачах компьютерного зрения. Каждый слой в сверточной нейронной сети имеет фильтры, которые извлекают определенные особенности входного изображения. Выходной сигнал слоя состоит из карты признаков: различные отфильтрованные версии входного изображения. Первый слой этой архитектуры представляет собой конволюционный слой с размером фильтра 3 на 3 пикселя, используемый для процедуры сканирования обучающего набора. Количество нейронов, используемых в этом конволюционном слое, составляет 16, где каждый из них подключен к одной и той же части входного изображения набора данных. В архитектуре используются три конволюционных слоя с различными раз-

мерами входных данных и количеством фильтров для получения различных характеристик изображения. Количество фильтров для второго конволюционного слоя составляет 32, в то время как его входной размер равен половине первого, а третий слой имеет 64 фильтра и входной размер равен половине второго [2, с. 144].

VGGNet – это один из видов глубокого классификатора изображений на основе *convnet*, в основном используемый для обучения распознаванию объектов, для чего он должен стать инвариантным ко всем изменениям изображения, которые являются лишними для идентификации объекта, и, следовательно, научиться кодировать перцептивную и семантическую информацию из входных данных.

Основная идея предлагаемой модели астигматизма на основе нейронной сети заключается в использовании «переноса обучения», т. е. предварительно обученная для классификации изображений нейронная сеть, умеющая кодировать перцептивную и семантическую информацию об изображениях, может быть использована на обработке других изображений посредством переобучения некоторых выходных слоев.

Во время обучения входными данными для конвентных сетей является изображение *RGB* фиксированного размера 400×400 , так как большие размеры изображений требуют гораздо больше времени на эпоху, а очень большие изображения могут даже не поместиться в памяти *GPU*. Предлагается провести предварительную обработку анализируемых изображений: вычлечь из каждого пикселя среднего значения *RGB*, вычисленного на обучающем множестве.

Изображение проходит через стек конволюционных слоев, где используются фильтры с очень маленьким рецептивным полем: 3×3 . В одной из конфигураций также используются фильтры свертки 1×1 , которые можно рассматривать как линейное преобразование входных каналов. Шаг свертки фиксированно равен 1 пикселю, что позволяет сохранить пространственное разрешение после свертки, т. е. для сверточных слоев 3×3 свертка составляет 1 пиксель.

Пространственное объединение осуществляется пятью слоями *max-pooling*, которые следуют за некоторыми из слоев свертки. *Max-pooling* выполняется в окне размером 2×2 пикселя с шагом 2. За стекком конволюционных слоев следуют три полносвязных слоя: первые два имеют по 4096 каналов, третий – использует способ классификации *ILSVRC* и содержит 1000 каналов. Последним слоем является слой с мягким максимумом. Конфигурация полностью связанных слоев одинакова во всех сетях. Все скрытые слои снабжены ректификационной нелинейностью [2, с. 208].

В каждом сверточном слое сети находится несколько карт признаков, на основании которых вычисляется матрица Грама, где каждая позиция определяет, как карты признаков коррелируют между собой. Диагональные члены представляют пространственно усредненную энергию для отдельных карт признаков, а внедиагональные члены представляют совместную корреляцию различных признаков в одном пространственном месте.

Данные матрицы помогают в эффективном представлении текстур. Текстуры статичны, и для их полного отображения требуется усреднение по позициям. Матрицы Грама, выполняя пространственное усреднение, прекрасно отражают глобальную статистику по всему изображению и остаются слепыми к расположению объектов внутри изображения. Члены этой матрицы пропорциональны ковариациям соответствующих наборов признаков и, таким образом, отражают информацию о том, какие признаки имеют тенденцию активироваться вместе. Следовательно, матрица не фокусируется на конкретном расположении объектов и концентрируется

только на текстуре и цвете [5]. Используя матрицу Грамма, можно восстановить информацию из карт признаков на более высоких уровнях сети, что обычно называют представлением содержания.

Для моделирования астигматизма необходимо получить информацию о текстуре, которая представляет собой данное оптическое искажение. Для этого построено пространство признаков поверх откликов фильтров в каждом слое сети. Пространство признаков состоит из корреляций между различными откликами фильтров, где ожидание берется по пространственному расширению входного изображения. Включая корреляции признаков из нескольких слоев нейронной сети, можно получить многомасштабное представление, которое отражает обобщенный внешний вид в терминах цвета и локализованных структур, не фокусируясь на глобальном расположении.

В созданной модели необходимо было сохранять цвет исходного изображения, что было реализовано посредством переноса только по каналу яркости. Для этого исходное изображение преобразовывалось из цветового пространства *RGB* в цветовое пространство *YCbCr*. *Y* – это лума-компонент цвета. Компонент *Luma* – это яркость цвета [4, с. 137], по сути – интенсивность света. Человеческий глаз более чувствителен к этому компоненту, и зрительное восприятие гораздо более чувствительно к изменениям в яркости, чем к изменению в значении цветов. Поэтому и было оставлена возможность передачи только в канале яркости.

Используя прошлый опыт обучения нейронных сетей для обработки изображений [3], эти методы были применены для моделирования астигматизма. В качестве базовой архитектуры использовалась нейронная сеть *VGG16*, предобученная на наборе данных *ImageNet*. Из стандартной архитектуры были удалены веса выходных полностью связанных слоев и проведено их переобучение, используя как цветные, так и полутоновые изображения.

Было проведено исследование нейронной сети посредством варьирования гиперпараметрами. Длительность одной эпохи обучения составляла около 50–80 с на *GPU Google Colab*.

Литература

1. Роговица / Wikipedia. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%86%D0%B0>. – Date of access: 20.07.2022.
2. Automatic keratoconus detection by means of a neural network: Comparison between a monocular and a binocular approach / P. Perissutti [et al.] // Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1998. – P. 322.
3. Kurochka. K. S. Algorithm of Definition of Mutual Arrangement of L1–L5 Vertebrae on X-ray Images / K. S. Kurochka, K. A. Panarin // Optical Memory and Neural Networks. – 2018. – N 3. – P. 161–169.
4. Хайкин, С. Нейронные сети / С. Хайкин. – 2 изд. – Вильямс, 2018. – 1104 с.
5. KeratoDetect / Keratoconus Detection Algorithm Using Convolutional Neural Networks. Computational Intelligence and Neuroscience. – Mode of access: <https://www.hindawi.com/journals/cin/2019/8162567/>. – Date of access: 20.07.2022.

УДК 004.8

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОКАЛЬНОГО АУДИОПОТОКА ИЗ МЕДИАФАЙЛА

К. В. Рубанов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республики Беларусь

Рассмотрены способы выделения вокального аудио потока из медиафайла. Результат исследования существующих методов показал недостаточное качество обработки исходного файла. В результате предложена методология выделения голоса с помощью сверточной нейронной сети.

Ключевые слова: нейронные сети, выделение голоса, обработка звука, машинное обучение, сверточные сети.

METHODOLOGY FOR EXTRACTING A VOCAL AUDIO STREAM FROM A MEDIA FILE

K. V. Rubanau

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The methods for extracting a vocal audio stream from a media file are considered. The result of the study of existing methods showed the insufficient quality of the processing of the source file. As a result, a methodology for voice extraction using a convolutional neural network is proposed.

Keywords: neural networks, voice extraction, sound processing, machine learning, convolutional networks.

Речь является повсеместно используемым и одним из самых доступных способов обмена информацией между людьми. Технологическое развитие позволило передавать, хранить и воспроизводить запись голоса без приложения человеческих усилий. Для улучшения средств манипуляции над существующими медиаданными требуется дальнейшее развитие технологий. Один из способов таких манипуляций – выделение вокального аудиоряда из медиафайлов, его дальнейшая очистка от посторонних шумов и использование во множестве сфер, например, обучение людей с нарушением зрения, озвучивание учебных материалов, расширение возможностей самовыражения людей с приобретенными или врожденными нарушениями речи. Частота голоса, выделенного из звукового потока, открывает возможность использования конкретного человеческого голоса для упомянутых выше нужд, не ограничиваясь специально созданными для этих целей экземплярами голосов дикторов.

Целью данной статьи является определение методологии выделения голоса из медиафайла.

Рассмотрим несколько уже существующих способов решения поставленной задачи.

Еще одним подходом к выделению вокального аудиоряда является подход, основанный на формализации знаний о природе звука и использовании физических формул для обработки сигналов. Алгоритм обработки аудиозаписи включает следующее [1]:

1) определить участки с вокалом. В исходном сигнале присутствует вокальная составляющая и звуки музыкальных инструментов, частоты которых могут коррелировать с частотой голоса. Необходимо сосредоточиться на участках, которые содержат вокальные частоты;

2) различить вокализованную и невокализованную речь. Невокализованная речь – речь, которая включает согласные, такие как ‘т’, ‘п’, ‘к’, ‘с’ (которые не производятся вибрацией голосовых связок). Все это проявляется в виде коротких всплесков в высокочастотной области. Поскольку эти виды речи отличаются, есть вероятность, что их придется обрабатывать по-разному;

3) оценить изменение фундаментальной частоты во времени;

4) на основании вывода 3 применить некую маску для захвата гармоник;

5) отдельно обработать элементы невокализованной речи.

Результатом является битовая маска, применение которой к амплитуде STFT (поэлементное умножение) дает приблизительную реконструкцию амплитуды STFT вокала. Затем необходимо объединить эту вокальную STFT с информацией о фазе исходного сигнала, вычислить обратный STFT и получить временной сигнал реконструированного вокала [1].

Также для решения поставленной задачи существует множество готовых программных продуктов, описание и оценка которых приведены далее.

Audacity – свободный аудиоредактор звуковых файлов, ориентированный на работу с несколькими дорожками. Стоит отметить, что полностью выделить только голос из аудиозаписи таким способом невозможно, поскольку приложение удаляет не только голос в диапазоне от 500 до 2000 Гц, но и все звуки, попадающие в этот диапазон.

iZotope RX7 Editor – система для подготовки и обработки музыкальных материалов, состоящая из набора плагинов.

Анализ литературы позволил определить несколько основных проблем изоляции вокала из музыкальной композиции:

– возможность существования на записи нескольких голосов. Фокусировка на удалении заранее заданных частот из композиции может привести к ситуации, когда на аудиозаписи присутствует несколько голосов с разной высотой. Удаление частот для одного голоса в этом случае может уменьшить качество выделения другого. Эта проблема может быть решена применением различных фильтров для каждого голоса, обрабатывая аудиозапись несколько раз, что может быть трудозатратно;

– способность многих исполнителей петь с принципиально разной высотой в разные моменты композиции. Эта проблема так же как и первая решается с помощью динамических фильтров;

– наличие инструментального аудиоряда, который может совпадать по высоте с человеческим голосом, что приведет к наличию шумов в результирующей аудиозаписи;

– представленные выше методы изменения голоса в исходной аудиозаписи будут обрабатывать не только вокальный аудиоряд, но и инструментальный, что нежелательно для решения задачи замены голоса.

Решением вышеперечисленных проблем может стать использование нейронных сетей, поскольку при правильном обучении сети она сможет подбирать правильные фильтры для каждого сэмпла аудиозаписи, что не под силу человеку в виду трудоемкости задачи.

Проектирование пространства признаков. Известно, что звуковые сигналы, такие как музыка и человеческая речь, основаны на временных зависимостях [2]. Иными словами, ничто не происходит изолированно в данный момент времени. Для определения присутствия голоса на конкретном фрагменте звукозаписи необходимо смотреть на соседние регионы. Такой временной контекст дает хорошую информацию о том, что происходит в интересующей области. В то же время желатель-

но выполнять классификацию с очень малыми временными приращениями, чтобы распознавать человеческий голос с максимально возможным разрешением по времени.

Для вычисления пространства признаков необходимо использовать следующие параметры: частота дискретизации (f_s): 22050 Гц (можно понизить с 44100 до 22050), дизайн STFT: размер окна = 1024, hop size = 256, интерполяция мел-шкалы для взвешивающего фильтра с учетом восприятия. Поскольку входные данные настоящие, можно работать с половиной STFT, сохраняя компонент DC, что дает 513 сэмплов [3], целевое разрешение классификации: один кадр STFT ($\sim 11,6$ мс = $256 / 22050$) [4], целевой временной контекст: ~ 300 миллисекунд = 25 кадров STFT, целевое количество обучающих примеров: 350 тыс, предполагая, что используется скользящее окно с шагом в 1 таймфрейм STFT для генерации учебных данных, нужно около 1,6 ч размеченного звука для генерации 350 тыс. образцов данных [1]. Таким образом, входной тензор признаков должен иметь размеры [350000, 513, 25]. Для достижения объема в 35000 фрагментов необходимо около 4-х трехминутных записей, поскольку трехминутная аудиозапись имеет около 8000 фрагментов. Визуальное представление обучающей выборки представлено на рис. 1.

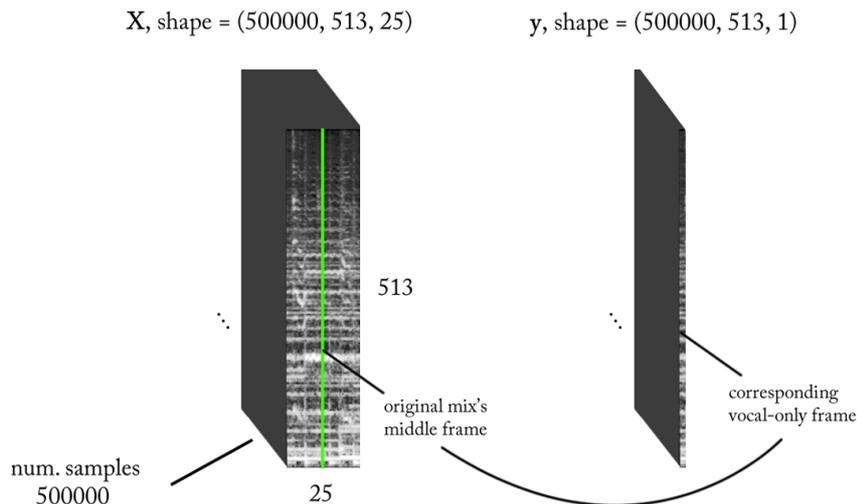


Рис. 1. Визуализация обучающей выборки для решения задачи многомерной регрессии [1]

Для работы с описанным выше объемом данных нейронная сеть должна иметь слои: сверточный слой размерностью [25, 513], несколько промежуточных слоев, формат и количество которых должно быть определено на этапе реализации, финальный полносвязный слой. Исходя из этого, результатом работы нейронной сети будет одномерный тензор, а его результатом – чистый фрагмент записи голоса.

Таким образом, определена методология выделения голоса из медиафайла и разработана примерная архитектура нейронной сети для решения поставленной задачи.

Литература

1. Koretzky, A. Audio AI: выделяем вокал из музыки с помощью сверточных нейросетей / A. Koretzky. – 2019. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/441090/>. – Дата доступа: 20.02.2021.
2. Волковец, В. И. Создание и обработка звука при разработке интерактивных приложений / В. И. Волковец // Докл. БГУИР. – 2018. – С. 4.

3. Адаптивное разделение источников звука в режиме реального времени : заявка 15/434, 419 Соединенные Штаты Америки / Пилл Р. ; пат. поверенный Коретский [и др.] ; заявл. 12.01.17 ; опубл. 17.08.17 ; приоритет 16.02.16, № US201662295497Р (США).
4. Как работает сверточная нейронная сеть: архитектура, примеры, особенности. – 2018. – Режим доступа: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/glubokaya-svertochnaja-nejronnaja-set/>. – Дата доступа: 27.02.2021.

УДК 620.178.16:620.178.3

К ВОПРОСУ ОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

С. А. Тюрин, Н. Н. Малык

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Рассмотрена задача и предложен автоматизированный метод расчета и проектирования узлов трения, в основу которого положена механика контакта, механика деформирования и разрушения и механика усталостного разрушения.

Ключевые слова: усталость, трение, элемент конструкции, узел трения, проектирование.

TO THE QUESTION OF AUTOMATED DESIGN OF FRICTION UNITS

S. A. Tyurin, N. N. Malyk

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The problem is considered and a automated method for calculating and designing friction units is proposed, which is based on the mechanics of contact, the mechanics of deformation and fracture, and the mechanics of fatigue fracture.

Keywords: fatigue, friction, structural element, friction unit, design.

Изучая некоторые закономерности объемного разрушения при механической усталости, мы имеем дело с отдельным элементом конструкции, который называли (деформируемым твердым) телом, деталью, образцом либо просто объектом.

Поверхностное повреждение при трении в трибологии возникает при относительном движении, по меньшей мере, двух взаимодействующих тел, например, при скольжении либо качении; в обоих случаях они образуют пару трения. Говорят, что пару (или узел) трения составляют образец и контробразец, либо иначе: тело и контртело. Их силовое взаимодействие обусловлено специфической – контактной нагрузкой.

Автоматизированный метод проектирования узлов трения. При механической усталости критерием предельного состояния служит усталостное (объемное) разрушение детали (элемента конструкции (рис. 1)), например, разделение ее на части. Условие прочности:

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{-1}}{\tilde{n}_{\sigma}}, \quad (1)$$

где σ – циклическое напряжение; σ_{-1} – предел выносливости при механической усталости; $[\sigma]$ – допустимое напряжение; M – изгибающий момент; W – момент сопротивления; \tilde{n}_{σ} – коэффициент запаса.

По условию (1) решаются три задачи:

– проверка прочности

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq [\sigma]; \quad (1a)$$

– определение размеров поперечного сечения

$$W \geq Mn_{\sigma} / \sigma_{-1}; \quad (1б)$$

– выбор материала

$$[\sigma] \geq \frac{\sigma_{-1}}{n_{\sigma}}. \quad (1в)$$

В трибологии, как известно, нет общепризнанного метода проектирования узлов трения. Это связано с тем, что механика дискретного контакта, похоже, и не может дать подобного метода. Чтобы решить поставленную задачу, воспользуемся общей методологией расчетов на прочность.

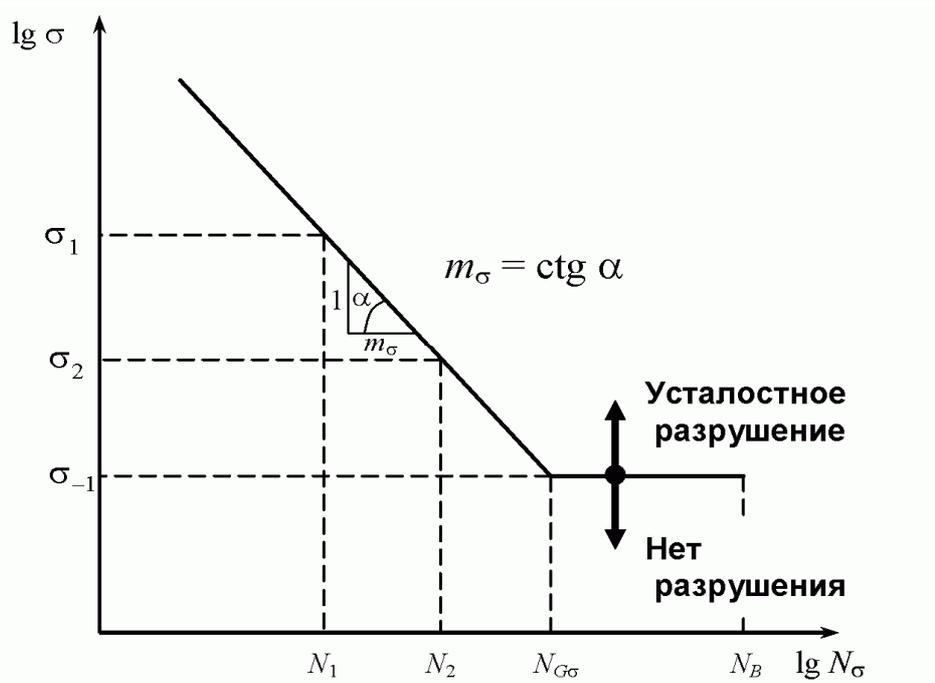


Рис. 1. Кривая механической усталости

Будем исходить из того общего положения (выдвинутого И. В. Крагельским [1] еще в середине прошлого века), что повторно-переменное деформирование (рис. 2) тонкого поверхностного слоя материала трущихся при действии контактной нагрузки тел всегда ведет к его усталостному разрушению. Этот процесс называют поверхностной или фрикционной усталостью.

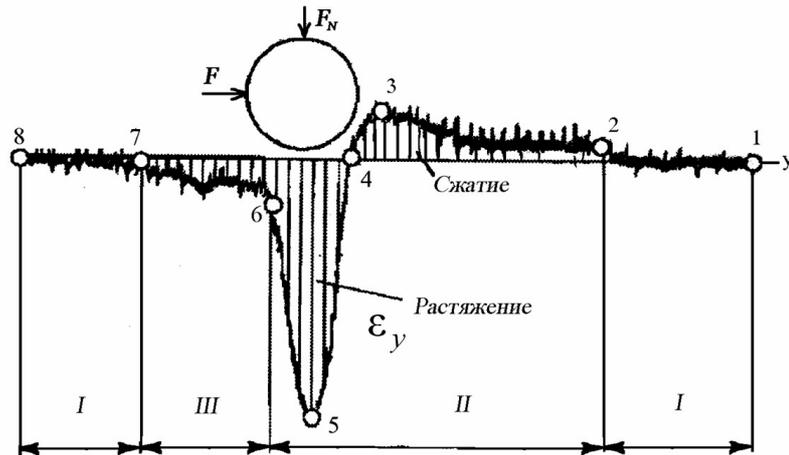


Рис. 2. Осциллограмма перемещений поверхности полимерного материала при скольжении по нему металлического индентора

И тогда, если критерием предельного состояния узла трения служит достижение износом i предельной величины (рис. 3), то условие износостойкости [2]:

$$\tau_w = fp_a \geq [\tau] = \frac{\tau_f}{n_\tau}, \quad (2)$$

где τ_w – напряжение в контакте; τ_f – предел фрикционной выносливости при трении; $[\tau]$ – допустимое напряжение; p_a – контактное давление; f – коэффициент трения; n_τ – коэффициент запаса.

По условию (2) решаются четыре задачи:

– проверка износостойкости

$$\tau_w = fp_a \leq [\tau]; \quad (2a)$$

– подбор площади контакта A_a (F_S – сила трения)

$$A_a \geq F_S / [\tau] = F_S n_\tau / \tau_f; \quad (2б)$$

– выбор материала

$$[\tau] \geq \frac{\tau_f}{n_\tau}; \quad (2в)$$

– требования к коэффициенту трения

$$f \leq \frac{[\tau]}{p_a} = \frac{\tau_f}{n_\tau p_a}. \quad (2г)$$

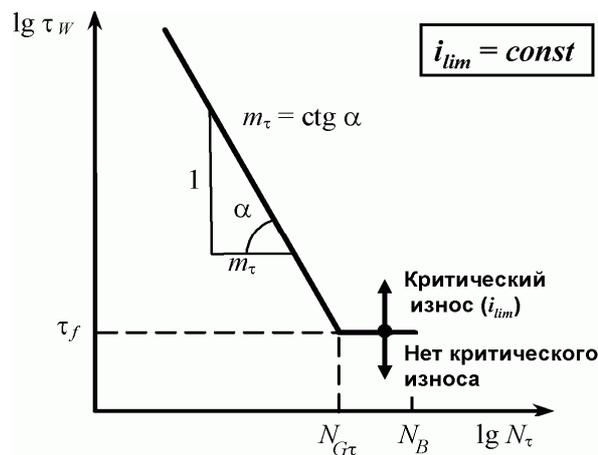


Рис. 3. Кривая фрикционной усталости

Принципиальные отличия условия износостойкости (2) от аналогичного условия прочности (1) таковы. Во-первых, условие (1) применимо лишь к отдельному элементу конструкции (отдельной детали), тогда как условие (2) характеризует прочность (износостойкость) механической системы, состоящей из двух тел (деталей). Поскольку последние в узле трения перемещаются друг относительно друга при действии специфической – контактной нагрузки, то данная система получила специальное название: пара (или узел) трения, либо фрикционный узел. Естественно, что условия (2а) и (2в), в отличие от аналогичных условий (1а) и (1в), используются при проектировании узла трения дважды – применительно и к телу, и к контртелу. Во-вторых (и это главное), для оценки надежности узла трения как механической системы (в целом) потребовались дополнительные условия (2б) и (2г), аналогов которым в условии (1) нет (и быть не могло).

Таким образом, проектируя узел трения, вы можете, чтобы обеспечить его требуемую эксплуатационную надежность, осознанно варьировать площадь контакта (условие 2б), свойства материалов (условие 2в), и коэффициент трения (условие 2г). Если вспомнить, что коэффициент трения характеризует работоспособность узла трения с учетом влияния смазки (или третьего тела), то ясно, что изложенный общий метод проектирования узлов трения может и должен быть обычным инструментом для конструктора и расчетчика.

Как можно видеть, в основу нового метода расчета и проектирования узлов трения положена механика контакта, механика деформирования и разрушения и особенно – механика усталостного разрушения.

Литература

1. Крагельский, И. В. Молекулярно-механическая теория трения / И. В. Крагельский // Трение и износ в машинах : тр. 2-й Всесоюз. конф., Москва, 1949 г. / Акад. наук СССР. – М.–Л., 1949. – Т. 3. – С. 178–183.
2. Сосновский, Л. А. Механика износоусталостного повреждения / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 434 с.

УДК 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГИБРИДНЫХ ЭНЕГРОИСТОЧНИКОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В. С. Заяц, В. И. Токочаков

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Приведены результаты оценки использования возобновляемых источников энергии с применением метеорологических данных, а также использования источников на отдельно взятой местности за счет создания автономного энергообъекта. Обеспечено постоянство согласования процесса производства и потребления производимой энергии за счет производства несколькими установками на базе возобновляемых источников. Объектом исследования является наиболее целесообразное применение и использование возобновляемых источников на территории Республики Беларусь. Целью данной работы является разработка программного обеспечения моделирования работы источников возобновляемой энергии в автономных системах электроснабжения.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, солнечные батареи, ветряные генераторы, водные установки, погодные условия, программное обеспечение, язык программирования C#.

MODELING THE OPERATION OF HYBRID ENERGY SOURCES BASED ON METEOROLOGICAL CONDITIONS IN AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS

V. S. Zayats, V. I. Tokochakov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The results of the assessment of the use of renewable energy sources using meteorological data, the use of sources in a particular area, due to the creation of an autonomous energy facility are presented. The consistency of the coordination of the process of production and consumption of the produced energy is also ensured due to the production of several installations based on renewable sources. The object of the study is the most appropriate application and use of renewable sources on the territory of the Republic of Belarus. The aim of the work is to develop software for modeling the operation of renewable energy sources in autonomous power supply systems.

Keywords: renewable energy sources, solar panels, wind generators, water installations, weather conditions, software, C# programming language.

В Республике Беларусь происходит активное развитие всех сфер экономики, в том числе создание новых отдельных участков хозяйств, которое требует больших затрат на обеспечение их всем необходимым. Развертывание таких хозяйств происходит за счет выбора места развертывания, климатических условий и многих других факторов, и их необходимо прогнозировать.

Таким образом, для создания нового хозяйства важным является обеспечение его необходимыми электросетевыми ресурсами.

На данный момент развитие электрических сетей – на высоком уровне и покрывает обширную часть территории в Республике Беларусь, однако есть места и более удаленные, которым также требуется электроснабжение для осуществления своих нужд. Прокладывание нового электроснабжения в места малонаселенные тре-

бует большого количества затрат и большой окупаемости, или же бывает экономически невыгодно государству, а в местах, где уже имеются сети, существует высокая степень изношенности, поэтому они не могут обеспечить электроэнергией всех потребителей.

К таким хозяйствам можно отнести:

- фермы;
- пасеки;
- овцеводческие хозяйства;
- охотничьи домики;
- домики рыбака;
- летние доильные площадки.

Использование потенциала природно-климатических условий должно осуществляться за счет развития возобновляемых источников энергии, что особенно важно для удаленных потребителей с небольшим электропотреблением.

С целью выравнивания графиков выработки энергии от возобновляемых источников и надежного электроснабжения таких потребителей перспективным в этом направлении считается комбинированное использование энергоустановок на основе нескольких видов возобновляемых источников энергии и бензиновых электростанций. Гибридные электростанции с использованием традиционного топлива и возобновляемых источников энергии в составе системы электроснабжения для удаленных объектов – это основа современной системы развития сельского хозяйства республики.

Развитие децентрализованной системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии в Республике Беларусь, создание методологии анализа потенциала возобновляемых источников энергии и разработка программного обеспечения для автономных систем генерации являются крупной научной проблемой, решение которой обеспечит экономический рост в жизни сельского населения и позволит создать надежную систему электроснабжения без остановки производства.

Чтобы эффективно применить источники возобновляемой энергии, нужно знать климатические параметры местности, в которой применяются «зеленые» технические решения.

На кафедре «Информационные технологии» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого разработана методика выбора типа, мощности и количества источников возобновляемой энергии с привязкой к местоположению объекта, которая включает следующие этапы:

- расчет суточного графика электропотребления объекта исследования по месяцам года;
- выбор типа, мощности и количества источников возобновляемой энергии, построение суточного графика возможной выработки электрической энергии по месяцам года на основе данных метеорологических условий;
- выбор количества и емкости аккумуляторов;
- моделирование работы источников возобновляемой энергии и бензинового электрогенератора на реальных данных ближайшей метеостанции.

Для эффективного применения источника возобновляемой энергии нужно знать климатические и другие параметры местности, в которой применяются «зеленые» технические решения, например, наличие холма, реки, ручья или открытой местности с южной стороны объекта.

В настоящее время производители источников возобновляемой энергии предоставляют широкий выбор условно недорогих устройств: солнечные панели, микро-ГЭС, небольшие ветрогенераторы.

При выборе типа, мощности и количества источников возобновляемой энергии в виде солнечных панелей и ветрогенераторов используются данные стандарта «Строительная климатология» с привязкой к ближайшей метеостанции. Для реализации указанной методики было создано программное обеспечение на базе на языке C#. Так как в системе существует множество подсистем, которым требуется управление, есть необходимость в соблюдении модульности кода, что позволит существенно сократить время на добавление новых функций, а также структурировать код.

Компьютерное моделирование работы источников возобновляемой энергии и бензинового электрогенератора осуществляется с использованием архивных данных ближайшей метеостанции в виде текстовых файлов за каждые сутки, содержащие 19 столбцов параметров через каждые пять минут, включая дату, время, температуру, скорость ветра, влажность, интенсивность солнечной радиации и т. д. На рис. 1 показан вид данных, используемых в моделировании.

Date	Time	Temp Out	Hi Temp	Low Temp	Out Hum	Dew Pt.	Wind Speed	Wind Dir	Hi Speed	Wind Chill	Heat Index	Bar	Rain Rate	Rain	Solar Rad.	Hi Rad.	Solar Index	UV Index	Hi UV
20210401	0:05	7.6	7.6	7.6	89	5.9	0.0	---	0.0	7.6	7.6	1016.2	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	0:10	7.6	7.6	7.6	89	5.9	0.0	---	0.0	7.6	7.6	1016.1	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	0:15	7.6	7.6	7.6	90	6.1	0.9	N	2.2	7.6	7.7	1016.1	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	0:20	7.7	7.7	7.6	90	6.1	0.0	W	2.2	7.7	7.7	1016.2	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	0:25	7.8	7.8	7.7	90	6.2	0.9	N	3.1	7.8	7.8	1016.1	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	0:30	7.8	7.8	7.8	90	6.3	0.4	N	2.7	7.8	7.9	1016.0	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	0:35	7.9	7.9	7.8	90	6.4	0.9	N	3.1	7.9	8.0	1016.0	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	0:40	8.0	8.0	7.9	90	6.5	0.0	N	1.8	8.0	8.1	1016.0	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	0:45	8.1	8.1	8.0	90	6.5	0.0	N	1.8	8.1	8.2	1016.0	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	0:50	8.1	8.1	8.1	90	6.5	0.0	---	0.0	8.1	8.2	1016.0	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	0:55	8.1	8.1	8.1	90	6.5	0.0	---	0.0	8.1	8.2	1016.0	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	1:00	8.1	8.1	8.1	90	6.5	0.0	---	0.0	8.1	8.2	1015.9	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	1:05	8.0	8.1	8.0	90	6.5	0.0	---	0.0	8.0	8.1	1015.9	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	1:10	7.9	8.0	7.9	90	6.4	0.0	---	0.0	7.9	8.0	1015.9	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	1:15	7.9	7.9	7.9	89	6.2	0.0	W	1.3	7.9	7.9	1015.8	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	1:20	7.8	7.9	7.8	89	6.1	0.0	N	1.3	7.8	7.9	1015.8	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	1:25	7.8	7.8	7.8	89	6.1	0.0	N	0.9	7.8	7.8	1015.8	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	1:30	7.7	7.8	7.7	89	6.0	0.0	---	0.0	7.7	7.8	1015.7	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	1:35	7.6	7.7	7.6	89	5.9	0.0	---	0.0	7.6	7.7	1015.7	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	1:40	7.6	7.6	7.6	90	6.1	0.0	---	0.0	7.6	7.7	1015.6	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	1:45	7.6	7.6	7.6	90	6.0	0.0	---	0.0	7.6	7.6	1015.5	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	1:50	7.5	7.6	7.5	89	5.8	0.0	---	0.0	7.5	7.6	1015.6	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	1:55	7.4	7.5	7.4	89	5.7	0.0	---	0.0	7.4	7.4	1015.5	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	2:00	7.3	7.4	7.3	90	5.8	0.0	---	0.0	7.3	7.4	1015.4	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	2:05	7.2	7.3	7.2	90	5.7	0.0	---	0.0	7.2	7.3	1015.5	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	2:10	7.1	7.2	7.1	90	5.6	0.0	N	1.8	7.1	7.2	1015.4	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
20210401	2:15	7.0	7.1	7.0	90	5.5	0.0	---	0.0	7.0	7.1	1015.4	0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0

Рис. 1. Пример данных метеостанции в Республике Беларусь

На рис. 2 показаны результаты компьютерного моделирования работы солнечных панелей и бензинового электрогенератора пасеки за шестимесячный период.

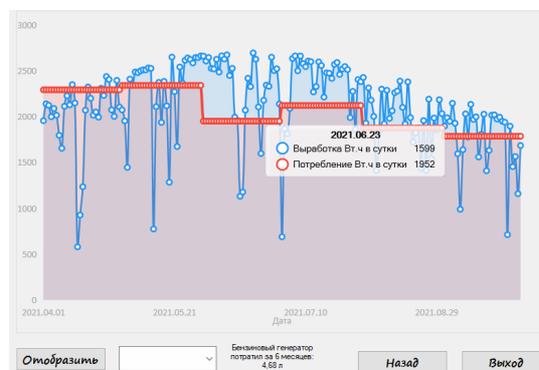


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования системы электроснабжения пасеки

Таким образом, проведенные исследования в виде моделирования гибридных источников автономных систем электроснабжения показали, что мы можем с большой вероятностью предсказать работу источников возобновляемой энергии в предстоящем летнем сезоне и определить объем потребления бензина как импортного источника энергии.

УДК 621.397.42

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

Д. Е. Коновалов, Г. И. Селиверстов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Определены требуемое количество и типы зон наблюдения на предприятии, параметры архивирования, количество и места размещения видеокамер, решены задачи передачи сигналов.

Ключевые слова: видеонаблюдение, программное обеспечение, зоны наблюдения.

BUILDING VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS USING VIDEOCAD SOFTWARE

D. E. Konovalov, G. I. Seliverstov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The required number and types of surveillance zones at the enterprise, the archiving parameters, the number and location of video cameras were determined, the problems of signal transmission were solved.

Keywords: CCNV, software, surveillance zones.

Компьютерные системы видеонаблюдения прочно вошли в нашу жизнь и стали заменой человеческих трудозатрат. Основная доля человеческих ресурсов приходится на их моделирование, разработку и монтаж. На протяжении всего развития систем программисты, специалисты по компьютерной графике и инженеры трудились над созданием программного обеспечения, которое помогало бы осуществлять все процессы с минимальными трудозатратами. С появлением систем видеонаблюдения на основе IP (Internet Protocol) адресов компьютерное моделирование стало более чем необходимым и широко применяемым предприятиями и компаниями, специализирующимися и сопровождающими все процессы – от разработки до монтажа и наладки.

Видеонаблюдение предназначено для обеспечения безопасности на объекте. Оно позволяет одновременно следить за большим числом объектов, которые находятся на отдаленных расстояниях. Такие средства можно поделить на два типа: дистанционного наблюдения и непосредственного наблюдения [1].

В настоящее время широко применяются системы IP-видеонаблюдения. Они работают при помощи абсолютно любых адаптеров, а вся получаемая информация быстро записывается на выбираемые носители.

С учетом задач при моделировании, которые мы поставили перед собой, выделили системы внешние и внутренние. Например, внешние требуют больших технических решений при моделировании, т. е. моделирование с учетом препятствий, по-

годных характеристик, сложность при монтаже, прокладка проводов для передачи информации, узлы питания и коммутации.

Цифровые системы видеонаблюдения являются более функциональным решением на сегодняшний день. С их появлением многие разработчики программного обеспечения сразу же начали писать программы для моделирования этих систем. Это позволяет заранее составить алгоритмы контролируемых объектов и одновременно расставить оборудование в нужных точках и под нужным углом, также проанализировать работу систем, спроектировать вращение видеокамер с учетом препятствий и прочих объектов. Визуальное компьютерное моделирование с использованием 3D-технологий позволяет улучшить, либо автоматизировать работу систем безопасности при их последующем монтаже и вводе в эксплуатацию.

Широкое практическое применение при моделировании видеонаблюдения получил софт компании «CCTV CAD», Software созданный отечественными программистами. А именно – программа VideoCAD, имеющая большой комплект модулей и плагинов для моделирования различных систем видеонаблюдения. Среди основных модулей и плагинов выделяются основные: VideoCAD Plugin for SketchUp, IP Camera CCTV Calculator, CCTV Design Lens Calculator.

Для внедрения технических средств видеонаблюдения на одном из предприятий г. Гомеля было проверено множество программных продуктов. В результате было принято решение о применении программ и модулей CCTVCAD Software, так как их программные решения обладают очень большим функционалом для разработки и моделирования систем видеонаблюдения для рассматриваемого предприятия.

Так, программа VideoCAD позволила рассчитать параметры зон обзора положения видеокамер и горизонтальную проекцию зон обнаружения человека с учетом опознавания; выполнить расчет глубины резкости каждой видеокамеры и расчет необходимого количества освещения, и номенклатуру кабельной продукции (рис. 1).

Number	Model Name	Producer	Key Feature	Type				Image sensor						Hor. resolution (TVL)	Max frame rate (fps)	Signal (dB) / (weigh)
				TV system	Fixed, PTZ, Dome, Mini	Output	Color	Model	Format	Number of pixels		Scan	Aspect ratio			
											Horic	Vert				
1	indoor standa			fixed				1/1.7"	352	512			4:3		shapp+1	
2	indoor mini			mini				1/3"					4:3			84
3	indoor PTZ			PTZ				4.8*3.6	352	512			4:3		shapp+1	
4	outdoor standa			fixed												
5	outdoor mini	JVC		mini									inteleased			84
6	outdoor PTZ	JVC	1231231231231	PTZ				E-view HAD™ 1/3"					4:3			
7	TK-HD3018	JVC	Wide Dynamic F	CCIR/PAL	fixed	VHS	easy day/night	1/3"	720	540			inteleased	4:3		480
8	STC-3010D	Smartec	full day/night	CCIR/PAL	fixed	VHS	day/night	E-view HAD™ 1/3"	752	582			inteleased	4:3		500
9	STC-1000D	Smartec		CCIR/PAL	fixed	VHS	b/w	Super HAD™ 1/3"	752	582			inteleased	4:3		550
10	TK-C321EG	JVC		CCIR/PAL	fixed	VHS	easy day/night	IT CCD 1/3"	752	582			inteleased	4:3		540
11	QW-830S	QWONN	HIGH AGC	CCIR/PAL	fixed	VHS	b/w	E-view HAD™ 1/3"	752	582			inteleased	4:3	25	554
12	DN-196	QWONN	Color 8/AV	CCIR/PAL	fixed	VHS	color	HAD CCD 1/3"	752	582			inteleased	4:3		480
13	WAT-137HL	Watec Co., Ltd	HIGH AGC	CCIR/PAL	fixed	VHS	b/w	E-view HAD™ 1/3"	752	582			inteleased	4:3		500
14	KPC-190681	KT&C		CCIR/PAL	mini	VHS	b/w	HAD CCD 1/3"	500	582			inteleased	4:3		375
15	KPC-190681	KT&C		CCIR/PAL	mini	VHS	b/w	HAD CCD 1/3"	752	582			inteleased	4:3		550
16	KPC-409P	KT&C		CCIR/PAL	mini	VHS	b/w	IT CCD 1/3"	500	582			inteleased	4:3		330
17	ACE-E560C	KT&C		CCIR/PAL	mini	VHS	color	E-view HAD™ 1/3"	752	582			inteleased	4:3		550
18	KPC-S230C	KT&C		CCIR/PAL	mini	VHS	color	HAD CCD 1/3"	500	582			inteleased	4:3		375
19	KPC-HD293	KT&C		CCIR/PAL	mini	VHS	color	Super HAD™ 1/3"	752	582			inteleased	4:3		500
20	MC27104-2X	PELCO	twisted pair, gen	CCIR/PAL	fixed	twisted b/w		Super HAD™ 1/3"	752	582			inteleased	4:3		554
21	TK-C325E	JVC	screen menu	CCIR/PAL	fixed	VHS	day/night	IT CCD 1/3"	752	582			inteleased	4:3		540
22	STC-IP2070	Smartec	IP	N/A	fixed	Ethernet color		Super HAD™ 1/3"	795				progressive	4:3	0	480

Рис. 1. Результаты расчетов параметров зон обзора видеокамер

Также программа VideoCAD позволила работать:

– с двухмерными проекциями: отображение зон обзора, зон обнаружения, глубины резкости, визуализация при помощи различных цветовых выделений и штриховки; создание горизонтальных проекций зон, контролируемых видеокамерами с учетом света и препятствий; моделирование пространственного разрешения видео-

камер; моделирование влияния дисторсии объектива на форму зоны обзора; точное моделирование широкоугольных объективов.

– с трехмерной визуализацией объектов видеонаблюдения: с учетом зон обзора, границ обзора с пространственным уточнением для разрешения; световыми показателями; визуализацией зон контроля для PTZ (поворотных) видеокамер; отображением покрытия зон контроля предметов в кадре и распределением пространственного разрешения точек наблюдения; загрузка ранее заготовленных 3D-моделей из таких программ, как 3d Max и Sketchup.

В результате выполненных операций программа VideoCAD позволила: сгенерировать изображения от камер с учетом их параметров и условий сцены (рис. 2) с фотометрической точностью и учетом спектра излучения и спектральной чувствительности сенсоров видеокамер, включая инфракрасные и светодиодные прожекторы; рассчитать параметры камер по их спектральной чувствительности, по количеству пикселей сенсоров камер, разрешению и минимальному освещению.

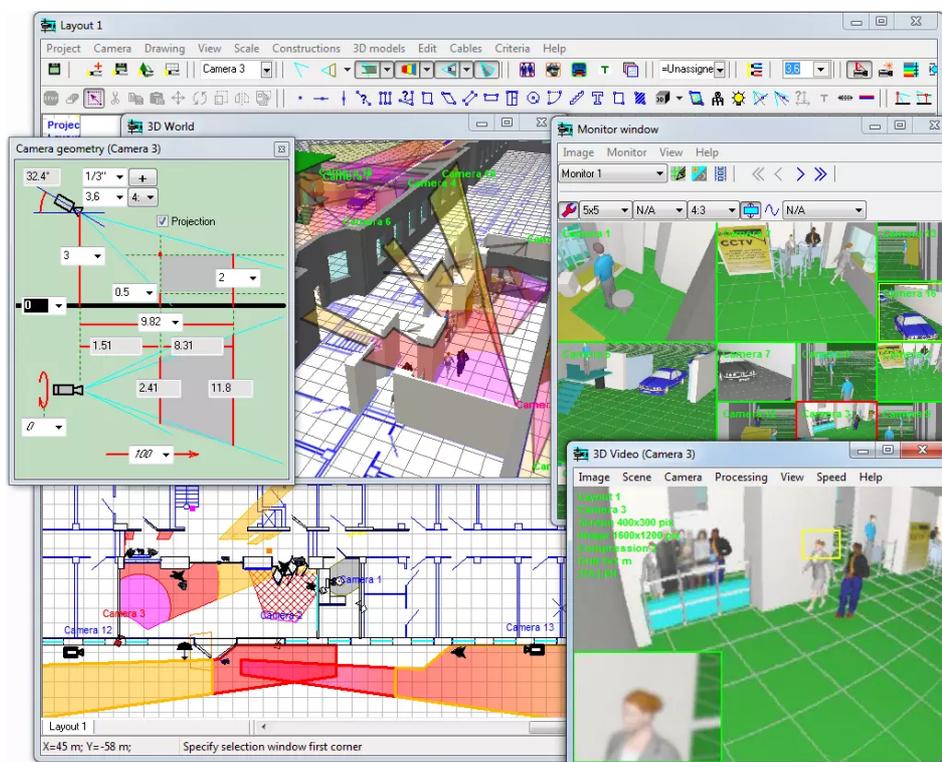


Рис. 2. Изображения от видеокамер с учетом их параметров

Также исследуемый программный продукт дал возможность спроектировать интерфейс оператора (рис. 3) и импортировать изображения и планы из сторонних программ в известных форматах *.bmp, *.jpg, *.png, *.gif, *.tif, *.pdf, *.dwg., экспортировать готовые и завершённые решения в форматы: *.pdf, *.PLT, *.CGM, *.SWF. и анимировать модели в html формате. Технические расчеты выгружаются в *.PDF, с полным описанием всех видеокамер, зон обзора и кабелей [2].

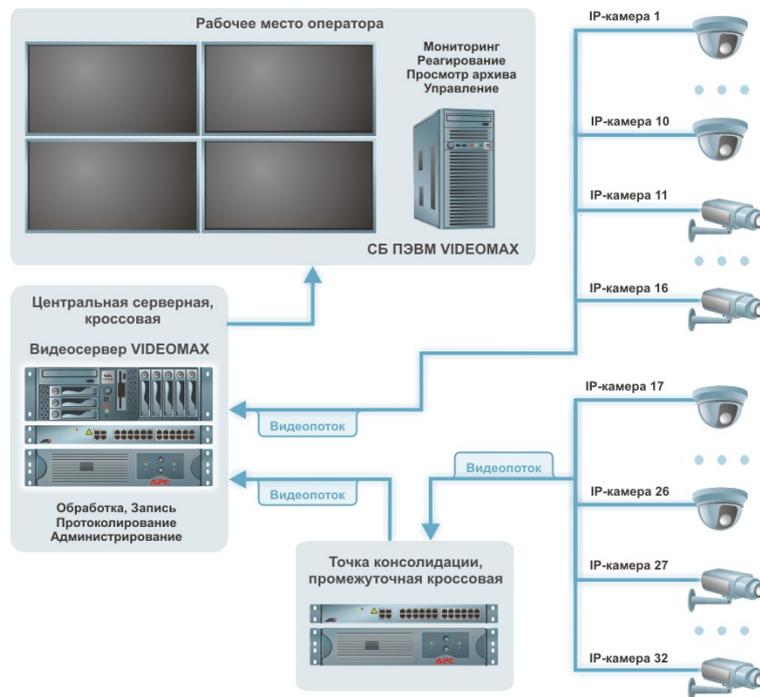


Рис. 3. Макет интерфейса оператора

В результате проектирования системы видеонаблюдения для предприятия определены параметры зон обзора видеокамер и зон обнаружения человека с учетом опознавания, состав оборудования и места расположения видеокамер на территории, решены задачи передачи сигналов.

Литература

1. Кругль, Г. Профессиональное видеонаблюдение. Практика и технологии аналогового и цифрового CCTV / Г. Кругль. – М. : Security Focus, 2019. – 626 с.
2. VideoCAD. Программа профессионального проектирования систем видеонаблюдения. Версия 7.1 Professional : рук. пользователя / CTVV CAD Software. – 2012.

УДК 004.415.2

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОТЫ СЛУЖБ ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА

Т. А. Трохова

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Обоснована необходимость применения web-технологий в ERP-системах на примере интегрированной информационной системы служб ЖКХ. Разработано web-приложение, позволяющее вести учет и мониторинг арендной платы и коммунальных услуг арендаторов. Разработано web-приложение, позволяющее ускорить процесс взаимодействия жильцов и сотрудников служб ЖКХ при выполнении заявок на ремонт электротехнического и сантехнического оборудования, мониторинга качества уборки дворовых территорий и подъездов. Web-приложение можно использовать как на стационарных, так и на мобильных устройствах.

Ключевые слова: ERP-системы, web-приложение, службы ЖКХ, интегрированная база данных, мобильные приложения, архитектура приложения.

SOFTWARE COMPLEX FOR AUTOMATION OF THE OPERATION OF HOUSING AND COMMUNAL SERVICES

T. A. Trokhova

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The necessity of using web-technologies in ERP-systems is substantiated on the example of an integrated information system of housing and communal services. A web-application has been developed that allows keeping records and monitoring of rents and utilities of tenants. A web application has been developed to speed up the process of interaction between residents and employees of housing and communal services when fulfilling requests for the repair of electrical and plumbing equipment, monitoring the quality of cleaning courtyards and entrances. Web applications can be used on both desktop and mobile devices.

Keywords: ERP systems, web application, housing and communal services, integrated database, mobile applications, application architecture.

В настоящее время при разработке программного обеспечения предприятий и организаций используется концепция ERP, основой которой является принцип создания единого хранилища данных, содержащего всю деловую информацию, накопленную организацией в процессе ведения хозяйственных операций, включая финансовую информацию, данные, связанные с производством, управлением персоналом, или любые другие сведения. Это устраняет необходимость в передаче данных от одной подсистемы к другой. Кроме того, любая часть информации, которой располагает данная организация, становится одновременно доступной для всех работников, обладающих соответствующими полномочиями. Информационное обеспечение коммунальных жилищных ремонтно-эксплуатационных предприятий соответствует концепции ERP, в его состав включена централизованная база данных, представляющая собой единое информационное пространство для всех подсистем и приложений, автоматизирующих процессы организации. Примерами подсистем, входящих в интегрированную информационную систему служб жилищно-коммунальных услуг (ЖКУ) являются подсистемы «Расчет квартплаты», «Учет материалов», «Расчет арендной платы», «Учет обслуживания лифтов» и др. Программная реализация подсистем основывается на разных технологиях и платформах без применения web-технологий.

Актуально такое направление при разработке новых приложений в данной предметной области, как внедрение web-технологий и привлечение мобильных устройств для повышения скорости обмена информацией. В докладе представлен опыт разработки web-приложений следующей тематики:

- «Учет и мониторинг арендной платы» – приложение автоматизированного расчета и мониторинга арендной платы с предоставлением арендатору оперативных сведений в виде акта сверки платежей. Сведения предоставляются арендатору по удаленному доступу. Применение этой системы позволяет арендатору эффективно отслеживать платежи и задолженности по оплате аренды, обеспечить своевременную оплату услуг жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ).

- «Мониторинг работы служб ЖКУ» – web-приложение, позволяющее ускорить процесс взаимодействия жильцов и сотрудников служб ЖКХ при выполнении

заявок на ремонт электротехнического и сантехнического оборудования, мониторинга качества уборки дворовых территорий и подъездов.

Ниже приведено описание web-приложения «Учет и мониторинг арендной платы». Web-приложение реализует следующие функции: формирование договора аренды; ведение занятых и свободных помещений для аренды; формирование плановых начислений; мониторинг оплаты аренды; формирование акта сверки по всем услугам. Приложение имеет следующие характеристики: клиент-серверная архитектура приложения, что подразумевает кросс-платформенность разрабатываемого решения; наличие ролевых политик как для арендодателя, так и для арендатора; отказоустойчивость системы; веб-интерфейс.

Согласно методологии объектно-ориентированного проектирования программных систем были выделены роли (менеджер по аренде, арендатор, бухгалтер, администратор) и прецеденты, характеризующие функции приложения для конкретных ролей. Например, с прецедентами «Оповещение арендаторов о сроках оплаты» и «Формирование договора аренды» ассоциируются роли менеджера по аренде и арендатора. Разработан пользовательский интерфейс для каждой роли. На рис. 1 приведены примеры экранных форм при работе приложения в режиме арендатора.

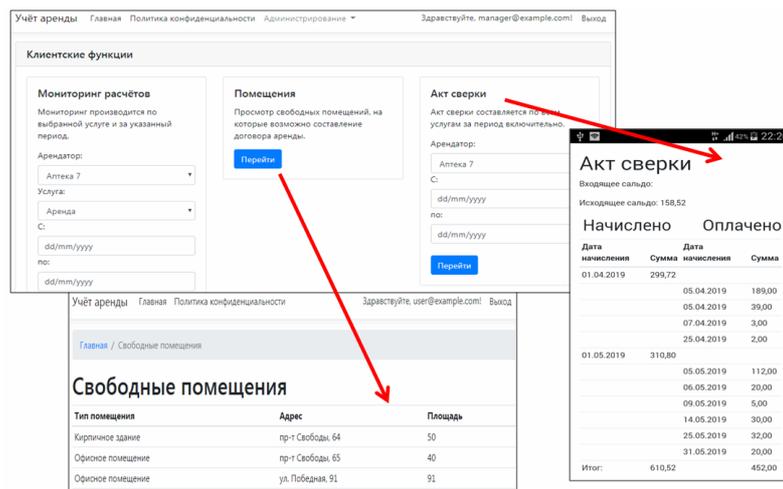


Рис. 1. Примеры работы web-приложения в режиме арендатора

Целью разработки web-приложения «Мониторинг работы служб ЖКУ» является повышение эффективности процесса взаимодействия жильцов и работников служб ЖКХ посредством быстрой передачи заявок и их распределения между исполнителями, наличие обратной связи между всеми участниками процесса, получение информации о качестве выполненных работ и, как следствие, повышение качества и скорости обслуживания населения.

Разработана функциональная модель приложения, выявлены процессы, подлежащие автоматизации и участники процессов, к которым отнесены: мастер по благоустройству; мастер по ремонту энергетического участка; администратор; диспетчер; жилец.

Для каждого участника процесса были выявлены основные функции, например, функции мастера по благоустройству включают следующее: составление графика уборки дворовых территорий и подъездов; мониторинг сроков и качества выполнения работ; распределение дворников и уборщиков по участкам; прием

от диспетчера замечаний жильцов по выполнению работы; составление и отправка итогового акта выполненных работ бухгалтеру. Функции жильца сводятся к следующему: передача диспетчеру общих замечаний и замечаний по конкретной заявке; вызов сантехника или электрика; передача диспетчеру сведений о выполнении ремонтных работ и замечаниях; просмотр графиков ремонтных работ и работ по благоустройству. В приложении разработан многофункциональный чат для взаимодействия жильца с работниками участка, в котором жилец имеет возможность оставить отзыв и замечание по выбранной заявке или по качеству уборки, получить ответ мастера об устранении замечаний. На рис. 2 приведены примеры интерфейсных окон при работе приложения в режиме заявок жильцов.

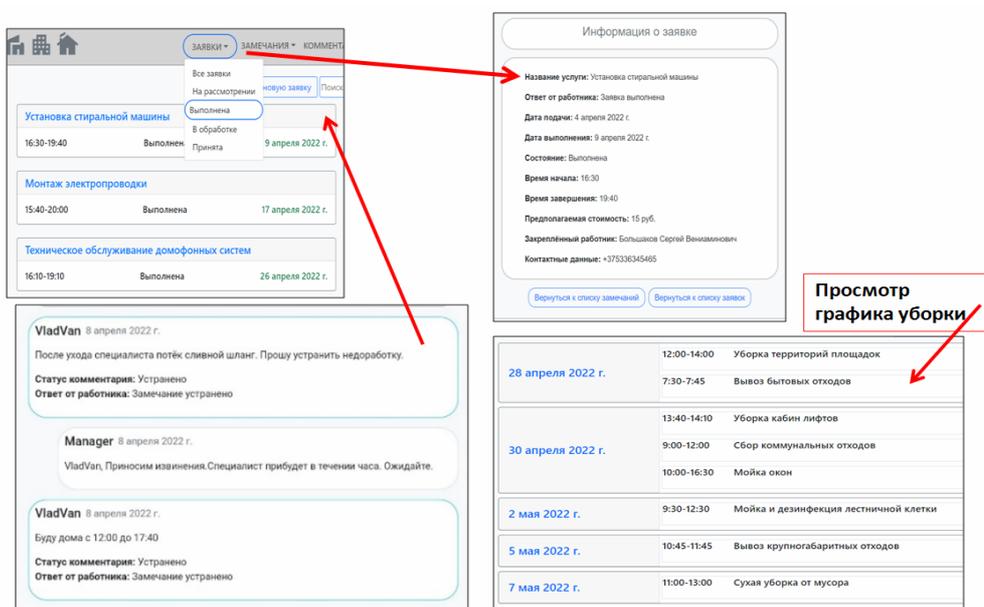


Рис. 2. Работа приложения при создании и выполнении заявки жильца и просмотре графика уборки

Разработанные web-приложения позволяют решить проблемы мониторинга функций работы служб ЖКХ и осуществлять оперативную связь как между подразделениями организации, так между службами ЖКХ и пользователями. Арендаторам можно получить оперативную информацию о начислении арендной платы, проверить отсутствие задолженности по оплате аренды, получить акт сверки платежей. Жильцы имеют возможность сделать заявку на ремонт электрического и сантехнического оборудования, посмотреть график уборки дворовых территорий и подъездов, написать замечания на выполненные работы. Пользователям доступны мобильные версии приложений, которые имеют удобный интерфейс и обеспечивают оперативную связь со службами ЖКХ.

Описанные приложения прошли тестирование на реальных тестовых примерах и после реализации набора функций по настройке и соединению с централизованной базой данных они будут предложены к внедрению в автоматизированную систему КРЖУП «Сельмашевское».

УДК 629.424.023

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ НЕСУЩИХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА СЕРИИ ДРБ1 ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Л. В. Огородников, Д. П. Русов, И. С. Еремейчик

Учреждение образования «Белорусский государственный
университет транспорта», г. Гомель

Проанализирована возможность безопасного использования вагонов дизель-поездов серии ДРБ1 после длительной эксплуатации на Белорусской железной дороге. Выполнен анализ эксплуатационной нагруженности вагонов. Разработаны конечно-элементные модели кузова вагона и рамы тележки дизель-поезда серии ДРБ1 для оценки напряженно-деформированного состояния с учетом технического состояния металлоконструкций после длительной эксплуатации. Выполнен комплекс расчетов на прочность их конструктивных элементов с целью установления соответствия металлоконструкции после длительной эксплуатации актуальным нормативным требованиям. Для исследования прочности конструкции после длительной эксплуатации выбран метод конечных элементов.

Ключевые слова: вагоны дизель-поездов, несущая конструкция, конечные элементы, напряжения, прочность, остаточный ресурс.

STRENGTH CALCULATION OF BEARING METAL STRUCTURES. DIESEL TRAINS OF DRB1 SERIES AFTER LONG OPERATION

L. V. Ogorodnikov, D. P. Rusov, I. S. Eremeichik

Institution of education «Belarusian state University of Transport», Gomel

The work analyzes the possibility of safe use of diesel train cars of the DRB1 series after long-term operation on the Belarusian railway. Was performed an analysis of the operational loading of wagons. Developed of course-element models of the car body and frame of the diesel-train DRB1 series to assess the strain-strain condition, taking into account the technical condition of steel structures after long-term operation. Complex of calculations for strength of their structural elements is performed to establish the conformity of the steel structure after long-term operation with the current regulatory requirements. For the study of structural strength after long-term operation was selected the finite element method.

Keywords: diesel train wagons, load-bearing structure, finite elements, tensions, strength, residual resource.

Перевозка пассажиров в пригородных направлениях на неэлектрифицированных линиях осуществляется главным образом дизель-поездами, в частности, серии ДРБ. В настоящее время в эксплуатации на Белорусской железной дороге находится 105 вагонов дизель-поездов типа ДРБ1, из которых 83 – прицепных и 22 – головных. Дизель-поезда приписаны к локомотивным депо Орши и Могилева. Среднегодовой пробег вагонов – около 100 тыс. км. В настоящее время около 10 % вагонов введены в эксплуатацию более 50 лет назад, а около 65 % в ближайшее время подойдут к сроку эксплуатации в 35 лет. Поэтому требуется либо замена имеющегося парка вагонов на новые, либо обоснование возможности дальнейшей безопасной эксплуатации, которое особо актуально в связи с невозможностью одновременного омоложения существующего парка. Практика эксплуатации и ремонта вагонов дизель-поезда ДРБ1 показала отсутствие существенных отказов по несущим конструкциям, что стало основанием предположить наличие в них остаточного ресурса.

На основе комплектов конструкторской документации на вагоны, а также с учетом результатов технического обследования их металлоконструкций разработаны конечно-элементные модели вагонов. Используются два типа конечных элементов: плоские пластинчатые 3–4-узловые. Для повышения точности полученных результатов сетка конечных элементов строилась регулярной, тем самым исключая появление в моделях элементов с критическими соотношениями линейных и угловых размеров конечных элементов. Таким образом, параметры расчетной модели кузова следующие: количество узлов – 143889; количество конечных элементов – 141754; параметры расчетной модели рамы тележки следующие: количество узлов – 9381, количество конечных элементов – 8185. Материал несущих конструкций – сталь с модулем Юнга, равным $2,1 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона принят равным 0,3. На рис. 1 приведена конечно-элементная модель металлоконструкций вагонов дизель-поезда ДРБ1.

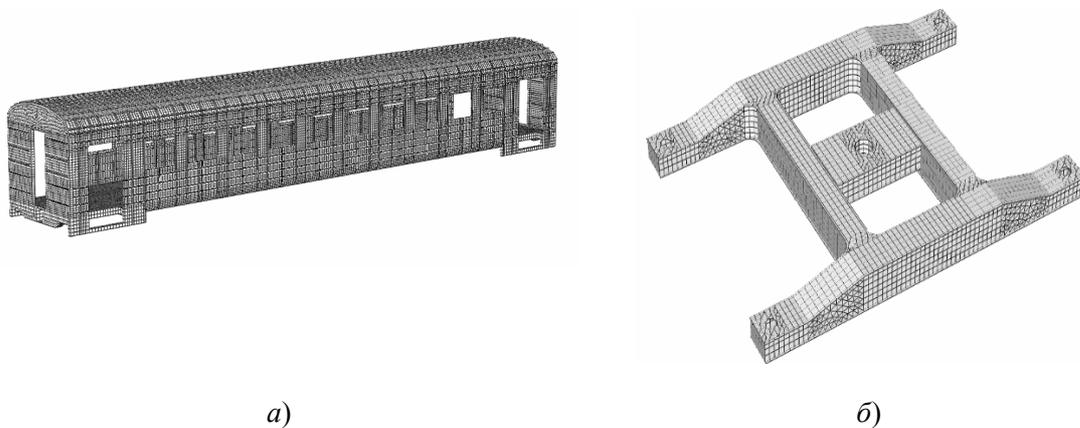


Рис. 1. Конечно-элементная модель кузова (а) и рамы (б) тележки вагона дизель-поезда ДРБ1

Установленные значения минимальных толщин конструктивных элементов представляют собой исходные данные для компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния несущих металлоконструкций кузовов вагонов дизель-поездов ДРБ1 с целью оценки соответствия актуальным требованиям прочности. Оценка прочности в соответствии с Нормами производилась по эквивалентным напряжениям. В общем случае оценку прочности конструкции и узлов вагонов на стадии проектирования выполняют: для I режима – по допускаемым напряжениям; для II режима – по допускаемым напряжениям и коэффициентам запаса сопротивления усталости. Конкретные методы оценки прочности конструкции кузова приведены в таблице

Величины основных сил для расчета на прочность кузова

Расчетные нагрузки	I режим	II режим
<i>Вертикальные</i>		
Сила тяжести брутто	по п. 2.1	по п. 2.1
Динамические силы	–	по п. 2.2
Вертикальная составляющая продольной силы инерции кузова	–	по п. 2.3
<i>Боковые</i>		
Центробежная сила	–	по п. 2.4

Окончание

Расчетные нагрузки	I режим	II режим
Сила давления ветра	–	по п. 2.5
<i>Продольные</i>		
Силы взаимодействия между единицами подвижного состава	по п. 2.6	по п. 2.6
Продольные силы инерции	по п. 2.8	по п. 2.7

В результате проведенного расчета на прочность были получены поля распределения эквивалентных напряжений в кузове вагона и раме тележки дизель-поезда серии ДРБ1 при различных расчетных режимах, которые показаны на рис. 2 и 3.

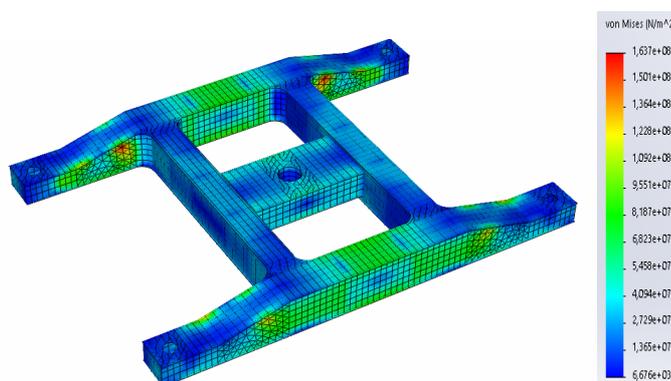


Рис. 2. Распределение напряжений в раме тележки дизель-поезда ДРБ1 при Ib режиме нагружения

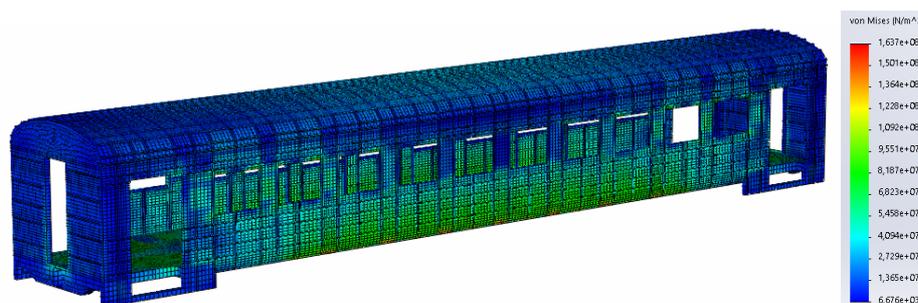


Рис. 3. Распределение напряжений в кузове вагона дизель-поезда ДРБ1 при Ia режиме нагружения

В результате проведенного расчета на прочность были получены эквивалентные напряжения, возникающие в конструкции кузова вагона и раме тележки при различных расчетных режимах. С учетом реального физического состояния металлоконструкций установлено, что прочность при всех расчетных режимах удовлетворяет требованиям Норм.

Таким образом, проведенные исследования напряженно-деформированного состояния несущих конструкций вагонов станут основой для разработки конструкторско-технологических мероприятий по усилению выявленных конструктивных областей в рамках выполнения ремонтных работ в депо.

Выполненные расчеты прочности лягут в основу разработки схемы установки тензометрических датчиков в контрольных точках для проведения натуральных испытаний и для определения участков для вырезки образцов с целью определения прочностных характеристик, ударной вязкости, твердости, химического состава и основных характеристик сопротивления механической усталости.

Литература

1. Железнодорожный подвижной состав. Порядок продления срока службы. Общие положения : СТБ 2534–2018. – Утв. и введ. в действие Постановлением Госстандарта Респ. Беларусь, 7 авг. 2018 г., № 42. – Дата введ. 01.03.19. – Минск : Госстандарт, 2018. – 24 с.

УДК 629.4.027

РАСЧЕТ НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ТАНГЕНЦИАЛЬНО-ОСЕВОГО ЗАМКА КОЛЕСНОЙ ПАРЫ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ШИРИНОЙ КОЛЕИ 1520/1435 мм

Р. И. Чернин, П. А. Дашук

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет
транспорта», г. Гомель*

А. В. Авхачёв

*Республиканское унитарное предприятие
«Могилевское отделение Белорусской железной дороги»*

Исторически развитие железнодорожного транспорта происходило в каждой отдельной стране с учетом лишь внутренних интересов, поэтому, как следствие, на сегодняшний день ширина колеи, используемая на железных дорогах мира, варьируется в пределах от 600 до 1676 мм. В результате развития международных экономических связей железнодорожный транспорт перестал решать лишь локальные задачи каждой страны в отдельности, а с вовлечением в перевозки других стран вышел на новый уровень. Разработки технологии перехода вагонов с одной ширины колеи на другую становятся все более актуальными. Данный вопрос не мог не привлечь внимание отечественных разработчиков, но их разработки требуют актуализации с учетом изменившихся объективных условий. Приведен расчет на статическую прочность современными методами конструкции раздвижной колесной пары, разработанной специалистами БелИИЖТА-БелГУТа.

Ключевые слова: раздвижная колесная пара, статический анализ, напряженно-деформированное состояние.

CALCULATION FOR THE STATIC STRENGTH OF A TANGENTIAL- AXIAL LOCK OF A WHEEL SET WITH A VARIABLE TRACK WIDTH OF 1520/1435 MM

R. I. Chernin, P. A. Dashuk

Educational institution “Belarusian State University of Transport”, Gomel

A. V. Aukhachou

Republican Unitary Enterprise “Mogilev Branch of the Belarusian Railway”

Historically, the development of railway transport has taken place in each individual country, taking into account only internal interests, therefore, as a consequence, today the gauge used on the railways of the world varies in limits from 600 to 1676 mm. As a result of the development of

international economic relations, rail transport has ceased to solve only local problems of each country separately, and with the involvement of other countries in transportation it has reached a new level. The development of technology for the transition of wagons from one track width to another is becoming more and more relevant. This issue could not fail to get into the attention of domestic developers, but their developments require updating taking into account the changed objective conditions. The article presents a calculation of static strength by modern methods of the lock design of a sliding wheelset developed by specialists of BelIERT-BelSUT.

Keywords: Sliding wheelset, static analysis, stress-strain state.

История разработок раздвижных колесных пар (РПК) насчитывает уже более ста лет, первые патенты по данной тематике появились уже в конце XIX в.

Практическое применение РПК началось в 1969 г., когда в Женеву из Барселоны прибыл поезд Talgo RD (*rueda desplazable* – «колесо, которое переставляется»).

Впервые обмен опытом между специалистами Западной и Восточной Европы по созданию РПК произошел в 1956 г. на встрече в Берлине. В Советском Союзе в 1957 г. были разработаны, построены и испытаны опытные образцы РПК, конструкция которых предусматривала процесс перехода с одной колеи на другую через переводное устройство под нагрузкой от вагона (порожного или груженого). Однако к концу 60-х гг. работы в СССР по созданию конструкции РПК для ускоренного перехода грузовых и пассажирских вагонов с колеи 1520 мм на колею 1435 мм (и обратно) были прекращены.

Спустя время работы по данной тематике возобновили на Брянском машиностроительном заводе, где были изготовлены РПК типа ТГ-14. Они прошли цикл заводских и эксплуатационных испытаний, результаты которых позволили выявить ряд недостатков. Основным таким недостатком являлась ненадежная работа предохранительного устройства (замка), предназначенного для исключения случаев самопроизвольного перевода колес. Один из вариантов конструкции колесной пары с раздвижными колесами был разработан специалистами Уралвагонзавода и ВНИИЖТа.

Позднее усовершенствованную конструкцию РПК создали на Уралвагонзаводе с применением тангенциально-осевого замка, предложенного БелИИЖТом. В 1975 г. этими колесными парами были оборудованы две тележки модели 18-100.

Разработанный тангенциально-осевой замок в положении для широкой колеи в момент перевода колесной пары с одной колеи на другую представлен на рис. 1.

Перевод колесной пары на более узкую колею осуществляется автоматически на специальном переводном участке железнодорожного пути. При прохождении колесной пары через переводной участок фланец 7 фиксирующего устройства набегает на переводной ручей 20, который уводит его в сторону средней части оси до тех пор, пока зубья венца 14 не упрутся в кольцо 17, а сухари 5 не попадут в выемку 19 неподвижной втулки 11 [1].

Для возобновления работ по РПК с целью совершенствования их конструкции с учетом изменившихся условий необходимо провести комплекс расчетов с использованием современных технологий, так для создания модели и предварительного расчета статической прочности в момент изменения колеи использовался пакет Autodesk Inventor 2020.

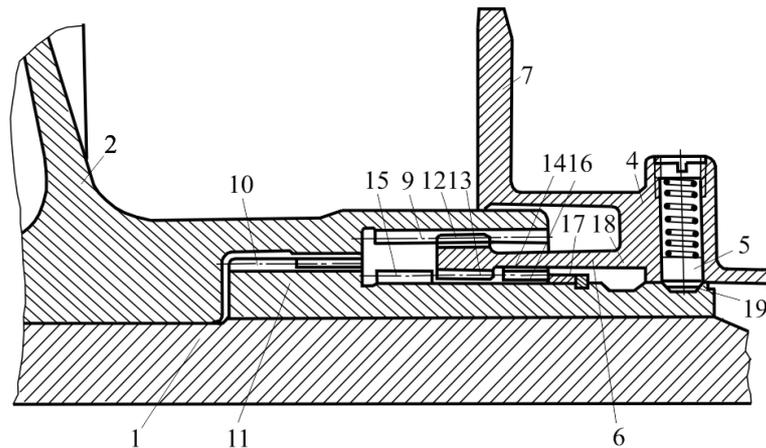
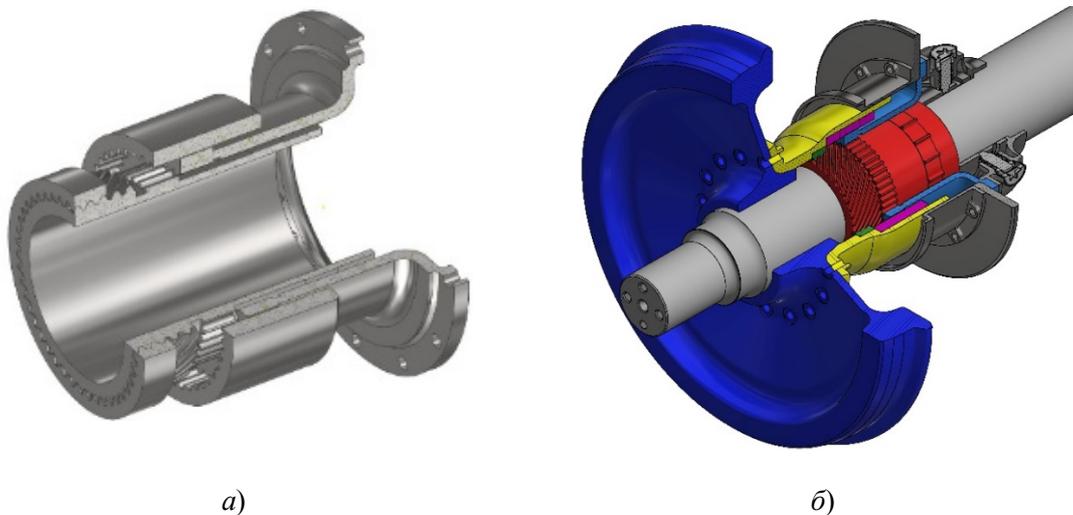


Рис. 1. Тангенциально-осевой замок:

1 – ось колесной пары, 2 – колесо с удлиненной ступицей 3;
 4 – фиксирующее устройство; 5 – подпружиненные сухари; 6 – расположенный
 концентрично оси стакан; 7 – цилиндрический фланец;
 8, 10 – косозубые венцы; 9 – прямозубый венец; 11 – втулка;
 12, 13, 14, 15, 16 – зубчатые венцы; 17 – упорное кольцо; 18, 19 – выемки

На рис. 2 приведены модели сборочных единиц РПК и вся конструкция в сборе.



а)

б)

Рис. 2. Тангенциально-осевой замок в сборе (а);
 расположение на колесной паре (б)

В качестве материала в модели тангенциально-осевого замка использовалась сталь, по параметрам близкая к конструкционной среднеуглеродистой нелегированной стали марки 50, с пределом текучести по ГОСТ 1050–2013 – 375 МПа.

В моделях сборочных единиц тангенциально осевого замка количество узлов насчитывается от 18674 до 258691, а элементов – от 10108 до 167853.

Проведены серии расчетов, результаты которых показаны на рис. 3–5.

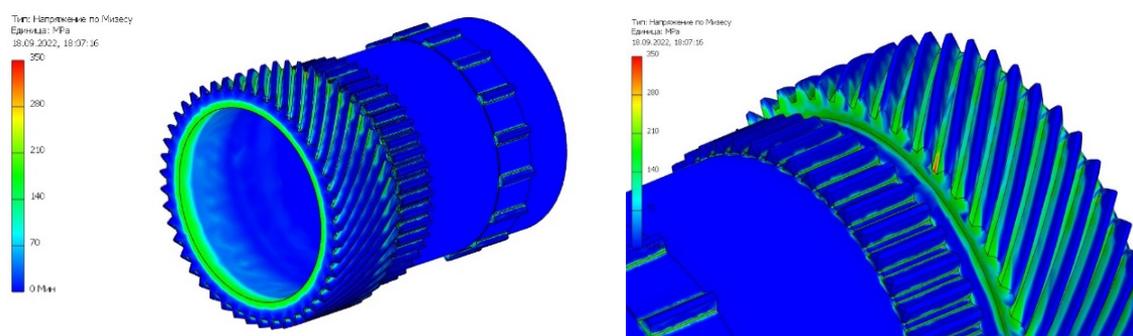


Рис. 3. Результаты расчета втулки (позиция 11)

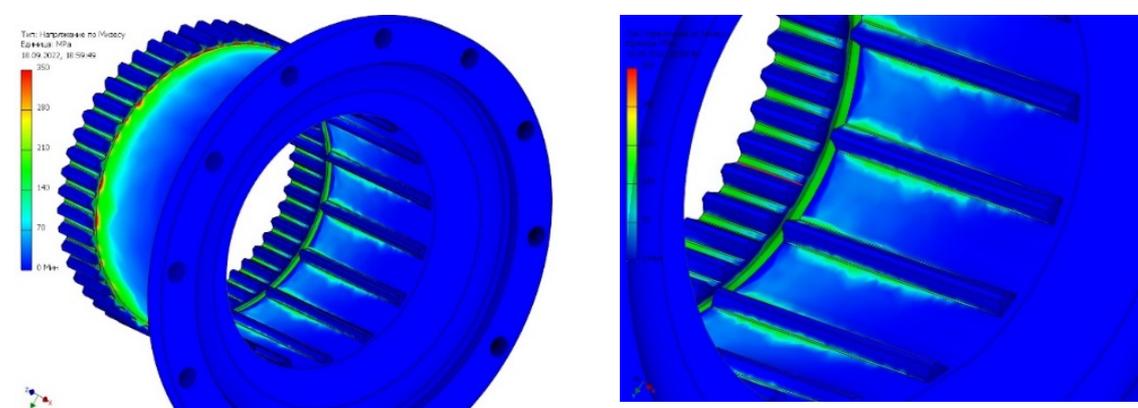


Рис. 4. Результаты расчета цилиндрического фланца (позиция 7)

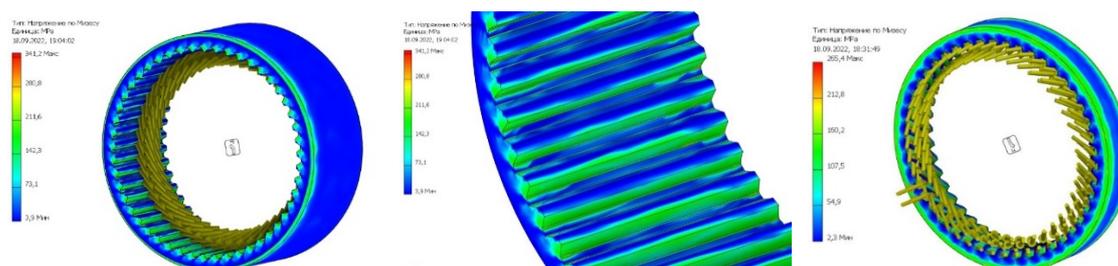


Рис. 5. Результаты расчета прямозубого и внешнего косозубого венцов (позиция 9 и 10)

Как показали расчеты, максимальные напряжения в элементах составляют 350 МПа, возникают на гранях и незначительных площадях, что указывает на несовершенство построения, расчетной сетки, но в связи с тем, что даже эти максимальные напряжения меньше предела текучести, то можно считать, что прочность конструкции обеспечивается, и есть резервы для снижения ее массы (средние напряжения в конструкции деталей варьируются от 150 до 250 МПа), а так как колесная пара явля-

ется неподрессоренной массой, ее следует всемерно снижать для уменьшения динамического воздействия на железнодорожный путь.

Следующий этап исследования – определение прочности конструкции замка в динамике для установления оптимальной скорости перевода, при которой будет обеспечиваться безопасность движения.

Литература

1. А. с. 479667 СССР, МКИ В 60 б 19 / 40 В 61f 7/00. Раздвижная колесная пара / А. Ф. Андреев, В. В. Новиков, А. А. Кривецкий, В. И. Зайка, Н. И. Мартынов, И. В. Наумов. – № 1865547/27–11 ; заявл. 03.01.73 ; опубл. 05.08.75 ; приоритет 14.11.75.

СЕКЦИЯ 4. РАДИОТЕХНИКА, МЕХАТРОНИКА, ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

UDC 621.384.6:621.039.31

AN INVESTIGATION OF PRODUCTS OF (n, f) , (n, γ) AND (γ, f) , (γ, xn, p) REACTIONS ON SAMPLES OF URANIUM AND BISMUTH USING THE PHASOTRON AND LINAC-200 ACCELERATORS AT JINR: EXPERIMENTS AND CALCULATIONS

S. I. Tyutyunnikov, V. I. Stegailov, V. V. Kobets, B. S. Yuldashev,
N. G. Shakun, S. V. Rozov, A. G. Letov, F. A. Rasulova, I. A. Kryachko
Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

A. A. Smirnov

Institute in Physical and Technical Problems, Dubna, Russian Federation

T. N. Tran

*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation
Institute of Physics, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi*

The paper presents the results of physical experiments with ^{238}U and ^{209}Bi samples at the Nuclotron, Phasotron and LINAC-200 accelerators of the Joint Institute for Nuclear Research, with the results processed using the FLUKA, GEANT4 and MCNP programs.

Keywords: particle accelerator, Nuclotron, Phasotron, LINAC-200, complex of the proton and electron accelerators, secondary neutron radiation, proton beam, fission curve.

Studies of deeply inelastic nuclear processes and their theoretical description are the main tasks of the “Energy + Transmutation” collaboration [1, 2]. Experiments were carried out at JINR accelerators: Nuclotron, Phasotron and LINAC-200 (fig. 1).



“PHASOTRON” proton accelerator - LNP



“LINAC-200” linear accelerator at LNP

Fig. 1. The complexes of the proton and electron accelerators used in the experiments

In the course of the experiments, the (n, f) , (n, γ) and (γ, f) , (γ, xn, p) reactions were investigated. The ^{238}U and ^{209}Bi samples were used in the experiments. In the process of modeling experimental results with help of FLUKA, GEANT4 and MCNP programs, we investigated:

– the distribution of neutrons emitted from a lead target by energies and positions on a proton beam;

– the distribution of secondary bremsstrahlung radiation (and secondary neutron radiation) on an electron beam was obtained using Pb or ^{209}Bi converters;

– the quantitative results of (n, f) fission reaction products on proton beams in the ^{238}U samples;

– the quantitative results of (γ, xn) photonuclear reaction products on electron beams in the ^{238}U and ^{209}Bi samples;

– the fission product mass yield curve shown in fig. 2 was obtained as a result of the (n, f) fission reactions on the proton beam with $E = 660$ MeV of the Phasotron accelerator. A foil of ^{238}U with a thickness of 0.1 mm was irradiated in the neutron field from the lead converter. The measurements were implemented conducted with the help of HPGe detectors in the measuring complexes of LNP and LHEP at JINR. The processing of the spectra and the determining the yields of the nuclei were done using the programs DEIMOS, MAESTRO, Origin and GAMMA;

– the spread of the yield of nuclei on the fission curve indicates the need for careful consideration of the decay processes of nuclei arising during fission, especially their isomeric states. The yield of isomers could affect the analyzed results.

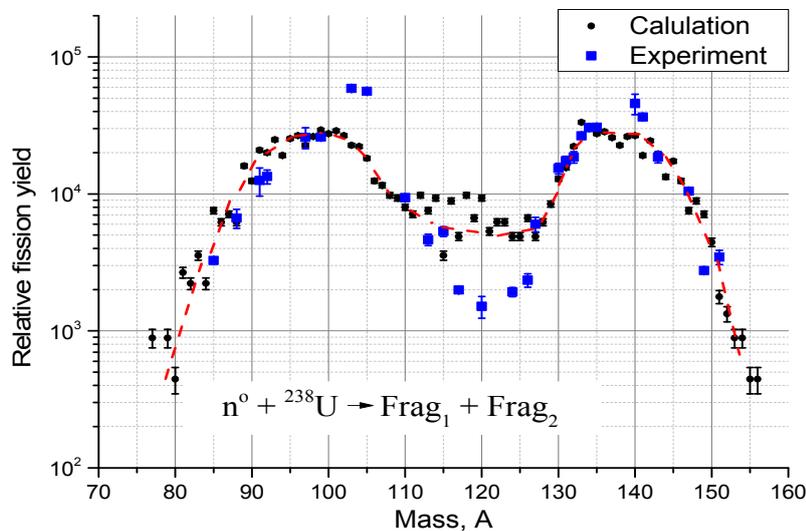


Fig. 2. The fission reaction products of the ^{238}U in the neutron field, $E_p = 660$ MeV

One of the main tasks of our work is to take into account the channels of decay and isomer yields in fission processes of uranium nuclei in the neutron field of a lead converter on the beam and electron beams.

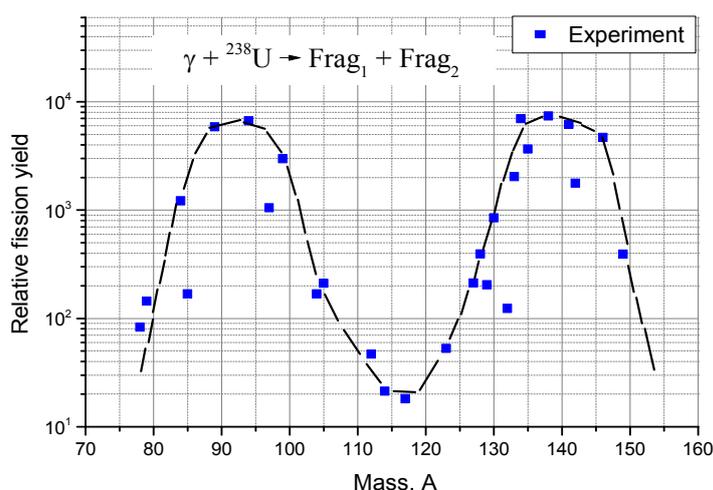


Fig. 3. The fission reaction products of the ^{238}U in the bremsstrahlung field, $E_e = 140$ MeV

Fig. 3 shows the fission curve of the uranium nuclei in the field of bremsstrahlung radiation generated by irradiating a lead converter with the electron beam with $E = 140$ MeV. In the field where the uranium samples were placed, the measurement and processing of the spectra were carried out similarly to the experiments on the proton beam. Comparison of the results obtained in photonuclear reactions and (n, f) fission reactions is of undoubted scientific interest. In experiments on electron beams, a ^{209}Bi target was used as a test monitor [3]. The production of ^{239}Np nuclei and neutron capture were investigated in the process of studying the chain: $^{238}\text{U} (n, \gamma) ^{239}\text{U} (23.54 \text{ m}) \beta^- \rightarrow ^{239}\text{Np} (2.36 \text{ d}) \beta^- \rightarrow ^{239}\text{Pu} (24110 \text{ y})$.

References

1. S. I. Tyutyunnikov, V. I. Stegailov [et al.] // NUCLEUS-2021. St-Petersburg, 130 (2021).
2. S. I. Tyutyunnikov [et al.] // Nuclear Science and Technologies, Almaty, 157 (2021).
3. S. S. Belyshev [et al.] // Eur. Phys. J. A 51, 67 (2015).

УДК 62-83:621.313.333

ОБЩАЯ ДИНАМИКА МАШИН А. А. АНДРОНОВА КАК ОСНОВА НЕЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

Д. В. Комнатный

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Рассмотрена проблема построения нелинейной электромеханики как теории электрических машин, основанной на нелинейной теории динамических систем. Предложено в русле идей академика А. А. Андропова анализировать фазовое пространство уравнений электрических машин, выявить аналогии с механическими системами. Приведены примеры фазовых пространств динамики генератора постоянного тока с самовозбуждением, синхронного генератора, асинхронного двигателя, ускорителя элементарных частиц. Показана универсальность предлагаемого подхода, его соответствие современным направлениям развития науки.

Ключевые слова: нелинейная электромеханика, нелинейная теория динамических систем, грубые системы, фазовое пространство, предельный цикл, механическая аналогия, электрические машины.

GENERAL MACHINES DYNAMICS OF A. A. ANDRONOV AS BASIS OF NON-LINEAR ELECTROMECHANICS

D. V. Komnatny

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The problem of non-linear electromechanics construction, as electric machines theory, based on non-linear theory of dynamic systems, is considered. It is proposed, according to ideas of academician A. A. Andronov, fulfill analysis of electric machines equations phase space, expose analogies with mechanical systems. The examples of phase space dynamic of direct-current generator, synchronous generator, induction motor, charged-particle accelerator are adduced. The universality of proposed method and accordance to modern science development trends are shown.

Keywords: non-linear electromechanics, non-linear theory of dynamic systems, robust systems, phase space, limit cycle, mechanical analogy, electrical machines.

В работах группы исследователей Санкт-Петербургского политехнического университета под руководством профессора К. Ш. Ходжаева поставлена проблема построения нелинейной электромеханики как теории электрических машин, основанной на современных достижениях нелинейной теории динамических систем.

Теоретической основой решения этой проблемы являются идеи академика А. А. Андропова по общей динамике машин, также основанной на нелинейной теории динамических систем. Академиком предложено рассматривать машины, в том числе и электрические, как грубые динамические системы, анализировать их фазовое пространство и его разбиение на траектории, уделяя особое внимание обнаружению предельных циклов. Полезным также будет выявление аналогий между механическими и электромеханическими системами. В этой связи представляет интерес рассмотрение результатов исследования динамики некоторых электрических машин по методологии А. А. Андропова, которое и является целью представленного доклада.

Первая система – генератор постоянного тока с самовозбуждением. Уравнение динамики электрических процессов при его пуске может быть приведено к виду:

$$\frac{de}{d\tau} = e - i_b(e)R_b,$$

где e – электродвижущая сила (ЭДС), В; τ – приведенное время, с; i_b – ток обмотки возбуждения, А; R_b – сопротивление обмотки возбуждения, Ом.

Это уравнение первого порядка. Его фазовое пространство – прямая. На ней в случае самовозбуждения имеется состояние равновесия, соответствующее номинальному режиму работы генератора. Механическим аналогом является движение материальной точки под действием постоянной силы и силы сопротивления, сложным образом зависящей от скорости.

Вторая – синхронный генератор. Хорошо известно, что его динамика при пуске и втягивании в синхронизм описывается уравнением Трикоми, которое можно записать в безразмерном виде:

$$\ddot{\Theta} + \beta \dot{\Theta} + u \sin \Theta = m,$$

где Θ – угол нагрузки, рад; β – коэффициент демпфирования; u – параметр управления; m – приведенный момент двигателя.

Это уравнение второго порядка, фазовое пространство которого – боковая поверхность кругового цилиндра. В зависимости от параметров уравнения в его фазовом пространстве могут присутствовать устойчивый фокус и предельный цикл второго рода. Первый соответствует синхронному режиму, второй – асинхронному. Указанные особые точки разделяет сепаратриса, идущая из седла в седло. Механическим аналогом синхронного генератора является маятник, совершающий колебания с немалой амплитудой.

Третья – асинхронный двигатель, включенный на однофазное напряжение и нагруженный упругим элементом. Такие двигатели применяются в электроприводе периодического движения. Как показано в работах В. И. Луковникова, Ю. А. Рудченко, Л. В. Вепера и других исследователей, уравнение динамики такого двигателя (пренебрегая сухим трением и аппроксимируя характеристику двигателя полиномом третьей степени) имеет вид:

$$\ddot{\varphi} + \varphi = -\left(\frac{M_1}{J\omega_0} + \frac{H}{J\omega_0}\right)\dot{\varphi} - \frac{\omega_0 M}{J}\varphi^3,$$

где φ – угол поворота ротора, рад; J – момент инерции, кг · м²; $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{H}}$; c – коэффициент жесткости, Н/рад; H – коэффициент демпфирования, Н · с/м; M , M_1 – коэффициенты аппроксимации механической характеристики двигателя.

Фазовое пространство этого уравнения – плоскость. Показано, что при определенных значениях коэффициентов на фазовой плоскости имеется предельный цикл и неустойчивое состояние равновесия. Устойчивый предельный цикл соответствует автоколебательному режиму. Механическим аналогом такой системы является маятник Фроуда.

Своеобразной электрической машиной является ускоритель элементарных частиц. Уравнение для основного параметра ускорения так называемой фазы частицы в общем случае имеет вид:

$$G \frac{d\varphi}{dt} = P(\cos \varphi - \cos \varphi_s),$$

где G , P – параметры ускорителя; φ – фаза частицы, рад; φ_s – фаза в состоянии равновесия, рад.

В фазовом пространстве этого уравнения выделяются устойчивый центр, неустойчивое седло, сепаратриса, проходящая через седло и охватывающая центр. Замкнутые линии в сепаратрисе отвечают колебательным режимам, незамкнутые – вращательным. С позиции работы ускорителя колебания соответствуют нормальному режиму работы ускорителя, а вращения – срыву ускорения частиц, режиму аварийному. Механическим аналогом является маятник в виде сферы, ось которого скреплена с осью цилиндра, который приводится в движение опускающимся грузом.

Таким образом, последовательное проведение анализа электромеханических систем по методике общей динамики систем показывает, что эти системы могут иметь фазовые пространства наиболее распространенных типов. В них выделяются особые траектории, соответствующие практически интересным режимам движения, в том числе предельные циклы. Такие электромеханические системы входят в широкий класс автоколебательных систем, изучение которых имеет важнейшее теоретическое и практическое значение.

Представленные в докладе примеры показывают плодотворность исследования электромеханических систем на основе современной теории динамических систем и теории нелинейных колебаний. Значительным достоинством рассматриваемого метода является его универсальность, соответствие современным направлениям развития науки, адекватность изучаемым объектам, которые являются принципиально нелинейными. Универсальность заключается в том, что данный подход позволяет рассматривать не только электрические машины, но и многие другие объекты техники, в частности, электронные генераторы, механические часовые механизмы.

Дальнейшее развитие рассмотренного метода, применительно к проблемам электромеханики, заключается в разработке более точных моделей электромеханических систем и их анализе. В значительной степени это осуществляется в работах научных коллективов СПбГУ (синхронные машины) и ГГТУ им. П. О. Сухого (асинхронные приводы периодического движения).

УДК 656.25

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ПОМЕХА В ВИДЕ ПЕРВОЙ ПРОИЗВОДНОЙ ГАУССОВА ИМПУЛЬСА

Д. В. Комнатный

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Рассмотрены свойства импульса «моноцикл Гаусса» как модели преднамеренных электромагнитных помех. Приведены соотношения для расчета энергии, активной полосы частот и вольт-секундной площади этого импульса. Данные соотношения полезны для анализа проникновения импульса через паразитные каналы и его воздействия на рецепторы помех. Эти соотношения могут также использоваться при комплексных испытаниях микроразэлектронных систем на помехоустойчивость.

Ключевые слова: импульсные помехи, преднамеренные электромагнитные помехи, импульс «моноцикл Гаусса», энергия импульса, активная полоса частот, вольт-секундная площадь.

ULTRAHIGH BANDWIDTH INTERFERENCE IN THE FORM OF GAUSS IMPULSE FIRST-ORDER DERIVATIVE

D. V. Komnatny

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The properties of “Gauss monocycle” impulse, as a model of intentional electromagnetic interference are considered. The formulas for energy, active frequency band and volt-second area of this impulse are adduced. These formulas are useful for analysis of impulse penetration through parasitic channels and impulse influence on noise receptors. Also these formulas can be used during of complex testing of microelectronic systems noise immunity.

Keywords: impulse interferences, intentional electromagnetic interferences, impulse “Gauss monocycle”, impulse energy, active frequency band, volt-second area.

В современной импульсной технике широкое применение находят сверхширокополосные импульсы различного вида. В частности, рассматривается импульс, являющийся первой производной гауссова импульса, который принято называть «моноциклом Гаусса». Этот импульс находит применение в системах передачи информации с широкополосными сигналами, поэтому свойства его как носителя сигнала хорошо изучены.

В современных условиях с разработкой конструкций компактных генераторов существует угроза применения преднамеренных электромагнитных помех, которые представляют собой импульсы высокой амплитуды, сверхширокой полосы частот, и, следовательно, высокой проникающей способности. Такие помехи могут иметь вид моноцикла Гаусса. Свойства этого импульса как модели преднамеренной помехи описаны недостаточно. Целью представленного доклада является вывод соотношений для расчета характеристик этого импульса, которые описывают его воздействие на паразитные каналы проникновения помех и рецепторы помех. Этими характеристиками являются энергия импульса, его активная полоса частот и вольт-секундная площадь. Активная полоса частот и энергия импульса необходимы при анализе проникновения его через паразитные каналы. Энергия и вольт-секундная площадь определяют последствия воздействия импульса на микроэлектронную элементную базу.

В докладе рассматривается гауссов импульс вида:

$$u(t) = U_m e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2}, \quad (1)$$

где u – напряжение импульса, В; t – время, с; U_m – амплитуда импульса, В; τ – временной параметр импульса, с.

Тогда импульс «моноцикл Гаусса» описывается формулой

$$u(t) = -\frac{2U_m t}{\tau^2} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2}. \quad (2)$$

Из соображений симметрии энергия импульса (2):

$$W = 2 \int_0^{\infty} u^2(t) dt = 2\sqrt{2\pi} \frac{U_m^2}{\tau}, \quad (3)$$

где W – энергия импульса, Дж.

По определению активная полоса частот импульса находится из уравнения

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\Delta\omega} F^2(\omega) d\omega = 0,9W, \quad (4)$$

где $\Delta\omega$ – активная полоса частот, рад/с; ω – круговая частота, рад/с; $F(\omega)$ – модуль спектральной функции, В · с.

По известным теоремам спектрального анализа для модуля спектральной функции моноцикла Гаусса справедливо выражение:

$$F(\omega) = \omega \sqrt{\pi} U_m \tau e^{-\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)^2}. \quad (5)$$

Тогда для решения уравнения (4) требуется вычислить следующее:

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\Delta\omega} F^2(\omega) d\omega = U_m^2 \tau^2 \int_0^{\Delta\omega} \omega^2 e^{-\frac{\omega^2 \tau^2}{2}} d\omega. \quad (6)$$

Интеграл в (6) является табулированной функцией, но таблицы ее составлены для нужд молекулярной физики. Поэтому рационально строить интегральную кривую распределения энергии по выражению

$$\gamma(f) = \frac{1}{\pi} \frac{\int_0^{\Delta 2\pi f} F^2(2\pi f) d2\pi f}{W}, \quad (7)$$

где f – круговая частота, Гц.

Затем по графику найти активную полосу частот.

Так как моноцикл Гаусса имеет в своем составе две симметричные полуволны различной полярности, то его полная вольт-секундная площадь равна нулю. Для анализа воздействия импульса на рецептор требуется знать вольт-секундную площадь одной полуволны. Моноцикл Гаусса есть производная гауссова импульса, а при вычислении вольт-секундной площади с помощью интегрирования используется первообразная моноцикла Гаусса, т. е. гауссов импульс. Тогда можно показать, что вольт-секундная площадь полуволны моноцикла Гаусса численно равна амплитуде Гауссова импульса.

Таким образом, необходимые формулы при анализе помехоустойчивости и помехозащищенности микроэлектронных рецепторов от помех в виде моноцикла Гаусса получены.

УДК 62-83-52

НАГРУЗОЧНОЕ УСТРОЙСТВО

В. В. Тодарев, В. А. Савельев, И. Н. Бурачёнко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Предложено в качестве нагрузочной машины использовать асинхронную машину с короткозамкнутым ротором с числом пар полюсов обмоток статора не менее двух. Полюсные обмотки разделены на две электрически не связанные части, одна из которых подключена к питающей сети напрямую, другая – через регулятор напряжения с возможностью рекуперации энергии в сеть, соединенный с выходом системы управления.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, асинхронный электропривод, нагрузочное устройство, испытательный стенд.

LOADING PLANT

V. V. Todarev, V. A. Saveliev, I. N. Burachenok

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

To achieve the goal it was proposed to use a squirrel-cage asynchronous machine with a number of pole pairs of stator windings at least two, the pole windings are divided into two electrically unrelated parts, one of which is connected to the power grid directly, the other is connected through a voltage regulator with the possibility of energy recovery into the grid, connected to the output of the control system.

Keywords: asynchronous electric motor, asynchronous electric drive, loading device, testing bench.

Часто при испытаниях механических трансмиссий необходима имитация реальной нагрузки вращательного характера с переменным моментом сопротивления при поддержании постоянства скорости вращения. Для этого применяются нагрузочные устройства.

Общим недостатком существующих нагрузочных устройств является высокая стоимость, обусловленная необходимостью использования преобразователя, мощность которого не менее мощности нагрузочного электродвигателя.

Цель работы состоит в упрощении конструкции нагрузочного устройства, снижении его стоимости, повышении энергоэффективности испытания механических трансмиссий при переменной нагрузке и постоянстве скорости вращения.

Для достижения указанной цели предложено в качестве нагрузочной машины использовать асинхронную машину с короткозамкнутым ротором с числом пар полюсов обмоток статора не менее двух. Полюсные обмотки разделены на две электрически не связанные части [1], одна из которых подключена к питающей сети напрямую, другая – через регулятор напряжения с возможностью рекуперации энергии в сеть, соединенный с выходом системы управления.

На рис. 1 изображена функциональная схема предлагаемого нагрузочного устройства.

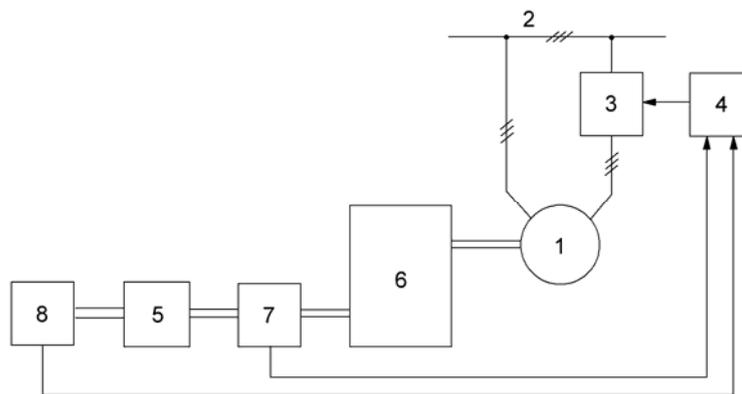


Рис. 1. Функциональная схема нагрузочного устройства

Нагрузочное устройство содержит асинхронную машину 1 с короткозамкнутым ротором, полюсные обмотки статора которой разделены на две электрически не связанные части. Одна часть обмоток статора подключена к питающей сети 2 напрямую, другая – через регулятор напряжения 3. Регулятор напряжения предназначен для формирования переменной составляющей момента нагрузки и подключен к выходу системы управления 4.

Вал асинхронной машины 1 механически соединен с валом испытуемой трансмиссии 5 через передаточное устройство 6, предназначенное для перевода асинхронной машины 1 в генераторный режим, и датчик момента 7. С валом испытуемой трансмиссии также механически соединен датчик скорости 8. Датчики момента и скорости предназначены для получения информации о фактических значениях нагрузочного момента и скорости, соответственно. Выходы датчиков момента 7 и скорости 8 соединены с системой управления 4.

Для работы устройства необходимо установить число передаточного устройства таким, чтобы асинхронная машина перешла в генераторный режим. Соотношение полюсных обмоток статора выбираем таким, чтобы часть обмотки, подключенная

к питающей сети напрямую, обеспечивала постоянную составляющую нагрузочного момента M_{\sim} (см. рис. 2), а другая часть обмотки, подключенная через регулятор напряжения, задавала переменную составляющую момента нагрузки M_{\sim} при помощи системы управления. Суммарная нагрузка представляет собой сумму моментов $M_T = M_{\sim} + M_{\sim}$ при необходимости может быть скорректирована, исходя из реальных значений, полученных от датчиков момента и скорости.

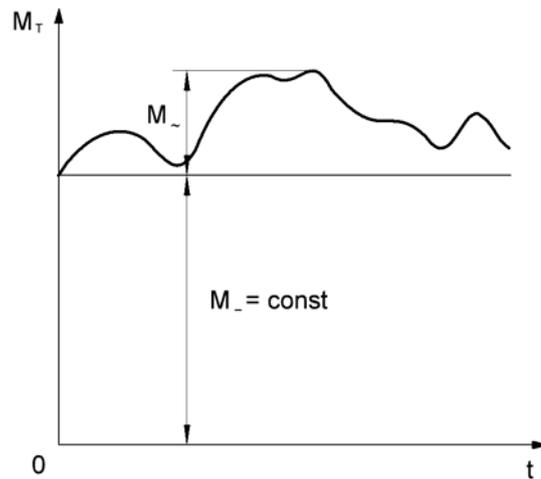


Рис. 2. Нагрузочная диаграмма устройства

На рис. 3 показана механическая характеристика M1, полученная с помощью части полюсной обмотки статора, подключенной к сети напрямую и создающей постоянную составляющую момента M_{\sim} при постоянной скорости вращения $\omega_{исп}$. Механические характеристики M2, M2', M2'' обеспечивают получение различных по величине значений M_{\sim} , M'_{\sim}, M''_{\sim} переменной составляющей момента нагрузки, получены с помощью части полюсной обмотки статора, подключенной к сети через регулятор напряжения, при различных значениях напряжения на выходе регулятора. Механическая характеристика M3 представляет собой сумму характеристик M1 и M2 и обеспечивает суммарный тормозной момент нагрузки M_T .

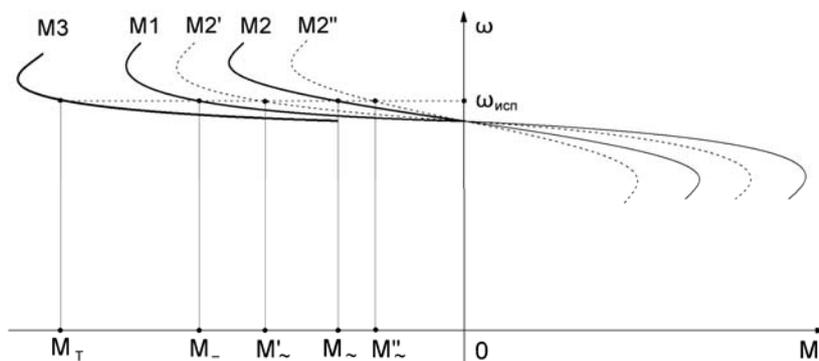


Рис. 3. Механические характеристики нагрузочного устройства

Генераторное торможение с рекуперацией электроэнергии в сеть при переменной составляющей нагрузки обеспечивается соответствующей функцией регулятора напряжения. За счет применения регулятора напряжения с функцией рекуперации энергии в сеть также обеспечивается повышение энергоэффективности нагрузочных испытаний.

При стендовых испытаниях объектов вращения с постоянной скоростью достаточно простейшего недорогого передаточного устройства для перевода двигателя в генераторный режим, что снижает стоимость устройства.

Так как переменная составляющая нагрузки в большинстве случаев не превышает 20 % от суммарной нагрузки, стоимость устройства снижается за счет применения маломощного регулятора напряжения, рассчитанного на передачу мощности только переменной составляющей нагрузки.

Литература

1. Асинхронный электродвигатель : пат. 12022 Респ. Беларусь, МПК Н 02Р 23/03, Н 02К 17/16 / Беликова А. И., Савельев В. А., Мигдаленок А. А. ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; опубл. 30.06.19.

УДК 62-83-52

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

В. В. Тодарев, В. А. Савельев, И. Н. Бурачёнok

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Решается задача снижения установленной мощности тиристорного преобразователя напряжения асинхронного электропривода, работающего в режиме стабилизации скорости вращения рабочего органа при переменной нагрузке.

Задача решается тем, что в электроприводе на базе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором с питанием от тиристорного преобразователя напряжения использован асинхронный электродвигатель, содержащий две трёхфазные обмотки статора, не имеющие электрической связи между собой. При этом одна из обмоток статора соединена с трёхфазной сетью переменного тока напрямую и обеспечивает получение постоянной составляющей мощности нагрузки, а вторая обмотка статора подключена к той же сети переменного тока через тиристорный преобразователь напряжения, обеспечивая получение переменной составляющей мощности нагрузки.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, асинхронный электропривод, тиристорный преобразователь, стабилизация скорости, нагрузка.

ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

V. V. Todarev, V. A. Saveliev, I. N. Burachenok

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The paper solves the problem of reducing the installed power of thyristor voltage converter of asynchronous electric drive, which operates in the mode of stabilizing the rotation speed of the working body under variable load.

The problem is solved by the fact that in the electric drive based on asynchronous electric motor with squirrel-cage rotor and powered by thyristor voltage converter, an asynchronous electric motor with two three-phase stator windings, which have no electrical connection between them, is used. At the same time one of the stator winding is connected to three-phase alternating

current network directly and provides constant load power component, and the second stator winding is connected to the same alternating current network through thyristor voltage converter and provides variable load power component.

Keywords: asynchronous motor, asynchronous electric drive, thyristor converter, speed stabilization, load.

Типовая конструкция асинхронного электропривода, работающего в режиме стабилизации скорости вращения вала двигателя, включает асинхронный электродвигатель и управляемый преобразователь, например, тиристорный регулятор напряжения [1].

При наличии отрицательной обратной связи по скорости такое решение позволяет при изменении момента нагрузки на валу электродвигателя посредством автоматического регулирования величины напряжения тиристорного преобразователя изменять вид механической характеристики электропривода и тем самым поддерживать неизменной скорость вращения вала электродвигателя.

Мощность $P(t)$ нагрузки в данном случае пропорциональна моменту $M(t)$ на валу электродвигателя, соответственно, минимальное P_{\min} и максимальное P_{\max} значения мощности пропорциональны минимальному M_{\min} и максимальному M_{\max} значениям момента нагрузки.

В этом случае мощность преобразователя напряжения выбирают исходя из величины мощности $P(t)$ нагрузки.

Мощность $P(t)$ нагрузки на валу электродвигателя можно представить в виде суммы постоянной P_C и переменной $P_V(t)$ составляющих, т. е. $P(t) = P_C + P_V(t)$. При этом максимальное значение переменной составляющей $P_{V\max} = P_{\max} - P_C$ (рис. 1).

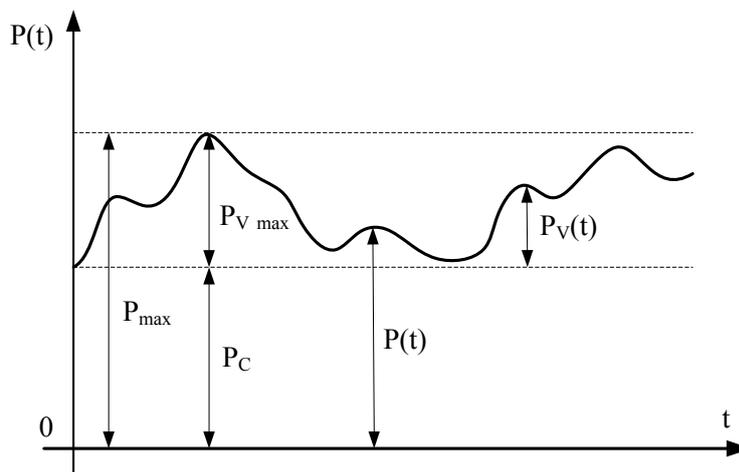


Рис. 1. Нагрузочная диаграмма асинхронного электропривода

Соответствующий переменной нагрузке электромагнитный момент электродвигателя при постоянной скорости вращения вала ω_p можно представить аналогично: $M(t) = M_C + M_V(t)$; $M_{V\max} = M_{\max} - M_C$.

Поскольку необходимость в стабилизации скорости вращения вала электродвигателя обусловлена переменной составляющей мощности нагрузки $P_V(t)$, то мощность тиристорного преобразователя напряжения, выбранная по полному значению мощности нагрузки $P(t)$, окажется завышенной тем больше, чем меньше максимальное значение переменной составляющей $P_{V_{\max}}$ по отношению к постоянной составляющей мощности P_C .

Таким образом, целью данной работы является снижение мощности тиристорного преобразователя напряжения типового асинхронного электропривода, работающего в режиме стабилизации скорости вращения вала электродвигателя при переменной нагрузке.

Поставленная цель достигается за счет того, что в типовом электроприводе с асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором и тиристорным преобразователем напряжения был использован асинхронный электродвигатель, содержащий две трехфазные обмотки статора, не имеющие электрической связи между собой [2].

На рис. 2 приведена функциональная схема предлагаемого асинхронного электропривода. Первая обмотка статора соединена с трехфазной сетью переменного тока напрямую; обеспечивает получение постоянной составляющей мощности нагрузки P_C , а вторая обмотка статора подключена к той же трехфазной сети переменного тока через тиристорный преобразователь напряжения и обеспечивает получение переменной составляющей мощности нагрузки P_V . При этом электродвигатель содержит две электрически не связанные трехфазные обмотки статора, которые могут быть получены путем разделения полюсных обмоток статора при числе пар полюсов $p > 1$ или разделением фазных обмоток статора на параллельные ветви.

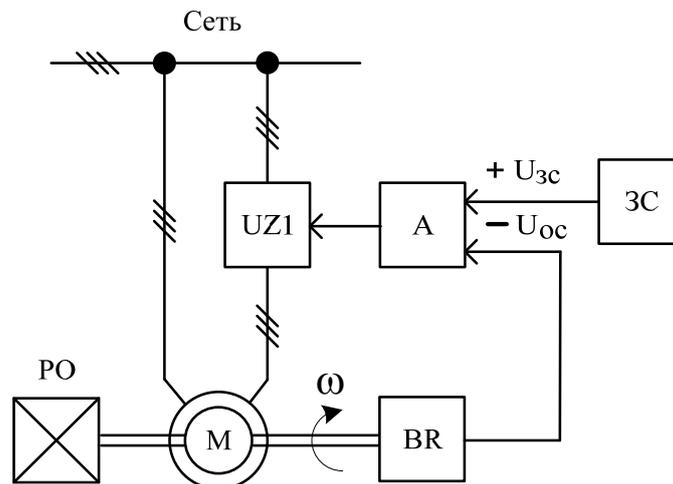


Рис. 2. Функциональная схема асинхронного электропривода:

M – электродвигатель; $UZ1$ – управляемый преобразователь;
 A – регулятор скорости; $ЗС$ – задатчик скорости;
 BR – датчик скорости; $РО$ – рабочий орган

Первая обмотка статора создает момент, компенсирующий постоянную составляющую момента M_C нагрузки. Вторая обмотка статора создает момент, компенсирующий переменную составляющую момента $M_V(t)$ нагрузки.

Механические характеристики заявляемого электропривода представлены на рис. 3: позиция 1 – механическая характеристика, создаваемая первой обмоткой статора электродвигателя и обеспечивающая постоянную составляющую момента M_C ; позиции 2, 2' – механические характеристики, создаваемые второй обмоткой статора электродвигателя при номинальном и минимальном напряжениях на выходе тиристорного преобразователя соответственно, обеспечивающие переменные составляющие электромагнитного момента M_V и M'_V ; позиции 3, 3' – суммарные механические характеристики электродвигателя; позиция 4 – характеристика электропривода в режиме стабилизации скорости вращения вала двигателя.

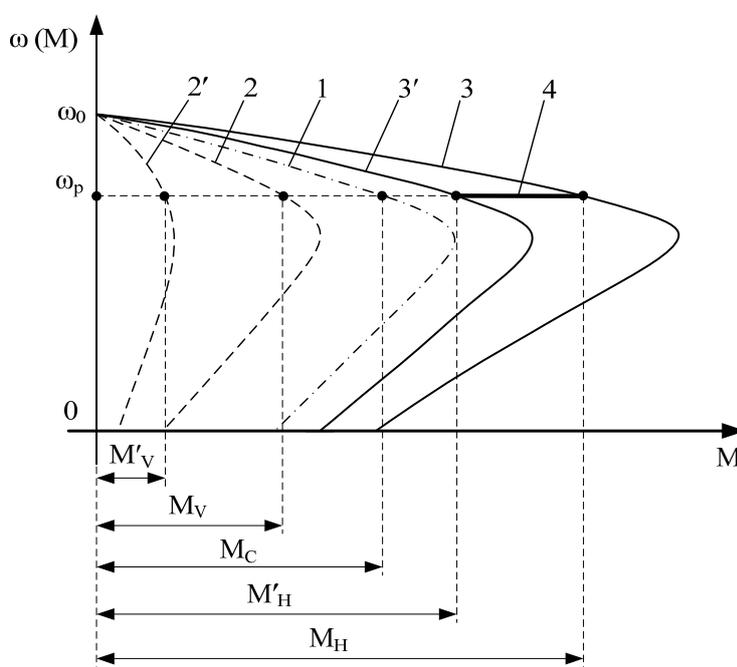


Рис. 3. Механические характеристики асинхронного электропривода

Таким образом, заявляемое устройство обеспечивает снижение установленной мощности тиристорного преобразователя напряжения асинхронного электропривода, работающего в режиме стабилизации скорости вращения вала электродвигателя, на величину постоянной составляющей мощности нагрузки электропривода.

Л и т е р а т у р а

1. Усынин, Ю. С. Системы управления электроприводов : учеб. пособие / Ю. С. Усынин. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 243 с.
2. Асинхронный электродвигатель : пат. 12022 Респ. Беларусь, МПК Н 02Р 23/03, Н 02К 17/16 / Беликова А. И., Савельев В. А., Мигдаленок А. А. ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; опубл. 30.06.19.
3. Проектирование электрических машин : учебник для вузов ; под ред. И. П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2011. – 767 с.

УДК 62-83-52

СИСТЕМА ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В. А. Савельев, И. С. Семеницкий

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Поставлена цель создания модели беспилотного летательного аппарата (БПЛА) мультироторного типа (квадрокоптер) на базе микроконтроллера STM32F4 и датчика пространственного положения MPU6050. Разработаны функциональная и принципиальная схемы отладочной платы устройства, получена программная реализация системы оценки положения БПЛА на основе цифрового процессора движения (DMP) датчика MPU6050.

Ключевые слова: беспилотное летательное средство, квадрокоптер, система стабилизации положения, гироскоп, акселерометр, MPU6050, STM32F4.

THE SYSTEM OF ESTIMATING THE POSITION OF THE DRONE

V. A. Saveliev, I. S. Semenitsky

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The aim of the project is to create a model of multirotor UAV (quadrocopter) based on STM32F4 microcontroller and spatial position sensor MPU6050.

During the work on the project functional and circuit diagrams of the debugging device board were developed, the software implementation of the evaluation system of the UAV position based on the digital motion processor (DMP) sensor MPU6050 was obtained.

Keywords: unmanned aerial vehicle, quadrocopter, position stabilization system, gyroscope, accelerometer, MPU6050, STM32F4.

Беспилотные летательные аппараты применяются везде, где необходим обзор местности и мониторинг объектов с воздуха. Благодаря размещению различного оборудования на борту БПЛА, последние могут решать задачи получения тепловых карт, создания сложных изображений объекта, видеомониторинга объектов, инспекции качества воздуха и др. Такие аппараты помогают минимизировать риски для персонала, сократить издержки, оптимизировать работу предприятия и оперативно контролировать обстановку.

Таким образом, актуальной является задача разработки аппаратных и программных средств оценки и стабилизации положения БПЛА.

В рассматриваемом проекте поставлена цель создания модели БПЛА мультироторного типа (квадрокоптер) на базе микроконтроллера STM32F407 [1] и датчика пространственного положения MPU6050 [2].

В ходе работы над проектом разработана функциональная схема отладочной платы устройства (рис. 1).

В проекте использован микроконтроллер семейства STM32F4, что дает следующие преимущества:

– наличие четырехканальных таймеров с 32-битными регистрами счета позволяет легко организовать захват широтно-импульсной модуляции (ШИМ) сигналов с пульта управления и передавать их на моторы БПЛА;

– наличие модуля прямого доступа к памяти (DMA) позволяет разгрузить микропроцессор от операций распределения данных в памяти, это в свое же время позволяет использовать свободное время процессора для обработки данных с других датчиков;

– микроконтроллер STM32F407 может работать на частоте до 168 МГц, что позволяет ему выполнять вычисления намного быстрее конкурирующих микроконтроллеров;

– на борту микроконтроллера STM32F407 имеется огромное количество интерфейсов связи, что позволяет подключить все необходимые датчики.

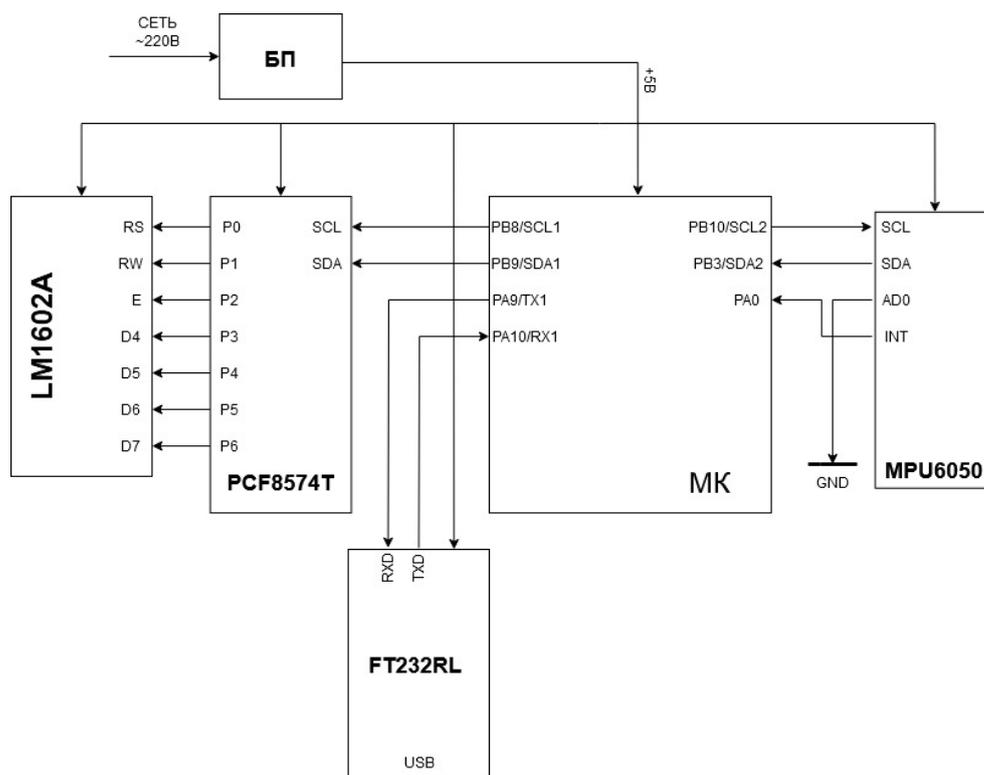


Рис. 1. Функциональная схема отладочной платы устройства

Для стабилизации положения БПЛА в пространстве используется датчик MPU6050, содержащий на борту трехосевой акселерометр и трехосевой гироскоп. Кроме того, MPU6050 содержит цифровой процессор движения (Digital Motion Processor – DMP), который позволяет обрабатывать данные, получаемые от гироскопа и акселерометра, и формировать на выходе как отфильтрованные значения угловых ускорений и векторов силы тяжести, так и значения кватернионов положения объекта. Это позволяет снять с микроконтроллера значительную часть вычислительной нагрузки, необходимой для фильтрации данных, приходящих от датчика, с помощью программных алгоритмов фильтрации Махони или Маджвика [3]. Датчик MPU6050 передает данные по интерфейсу I2C на частоте 400 кГц. Данные, поступающие от MPU6050, обрабатываются микроконтроллером по внешнему прерыванию, приходящему от датчика. В итоге задача микроконтроллера сводится к расчету углов наклона БПЛА на основе значений кватернионов, расчету ПИД-регуляторов и формированию ШИМ-сигналов на каждый из четырех моторов БПЛА.

Принципиальная схема платы устройства изображена на рис. 2.

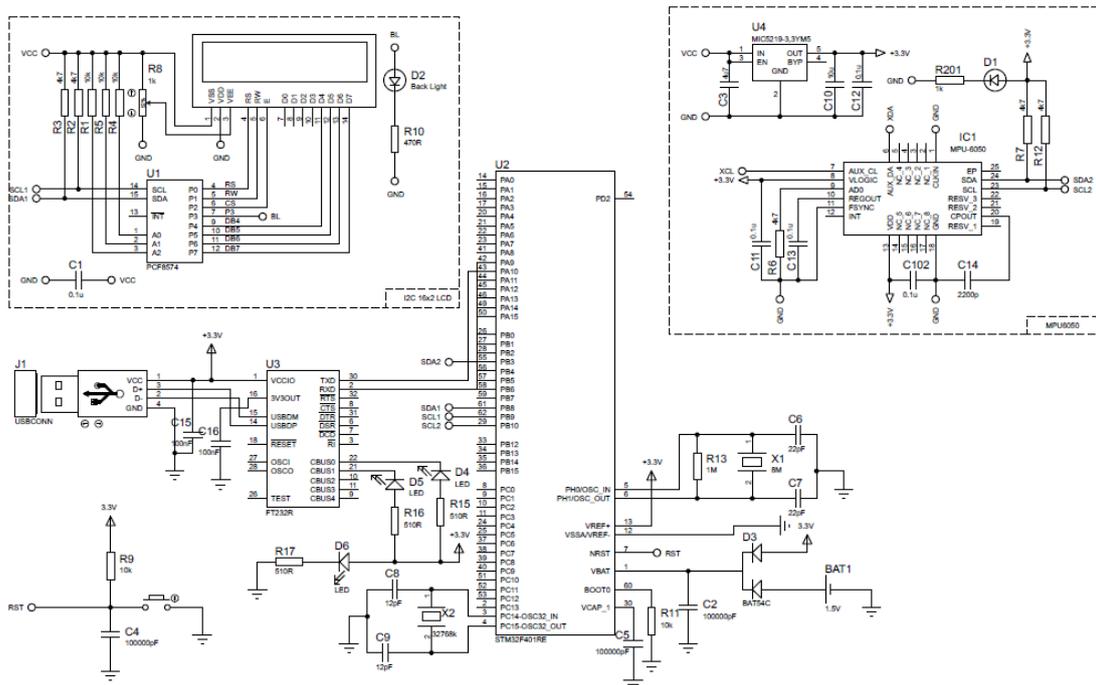


Рис. 2. Принципиальная схема отладочной платы устройства

При работе над проектом использовалось программное обеспечение Serial Plot, позволяющее визуализировать данные о пространственном положении БПЛА, передаваемые через последовательный интерфейс UART микроконтроллера. На рис. 3 показана диаграмма изменения угла наклона по оси тангажа (pitch) при использовании DMP.

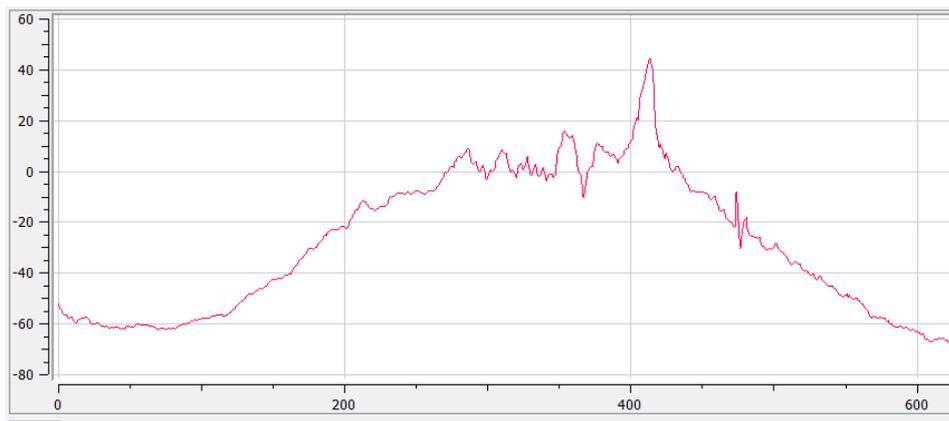


Рис. 3. Диаграмма изменения угла наклона по оси тангажа

В ходе дальнейшей работы над проектом планируется выполнить стендовые исследования системы стабилизации положения БПЛА, а также произвести пробный запуск модели БПЛА.

Литература

1. STM32F407/417. – Режим доступа: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407-417.html>. – Дата доступа: 10.09.2022.
2. Анализ данных MPU6050. – Режим доступа: <https://russianblogs.com/article/6012840510/>. – Дата доступа: 10.09.2022.
3. Madgwick, S. O. H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays / S. O. H. Madgwick. – Режим доступа: https://x-io.co.uk/downloads/madgwick_internal_report.pdf. – Дата доступа: 10.09.2022.

УДК 621.317.39

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИМИТАТОРА ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ И-02**Л. А. Захаренко, В. А. Карпов***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь**Представлены результаты работы по модернизации имитатора электродной систем И-02 с применением прецизионного 16-битного цифро-аналогового преобразователя.***Ключевые слова:** цифро-аналоговое преобразование, потенциометрический метод измерения, рН-метр.**MODERNIZATION OF I-02 ELECTRODE SYSTEM SIMULATOR****L. A. Zakharenko, V. A. Karpov***Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus**The results of work on the modernization of the I-02 electrode system simulator using a precision 16-bit digital-to-analog converter are presented.***Keywords:** digital-to-analog conversion, potentiometric measurement method, pH meter.

Имитатор электродной системы И-02 предназначен для проверки работоспособности рН-метров, редоксометров и рХ-метров (иономеров) в условиях производственных цехов и мастерских контрольно-измерительных приборов (КИП) (рис. 1).

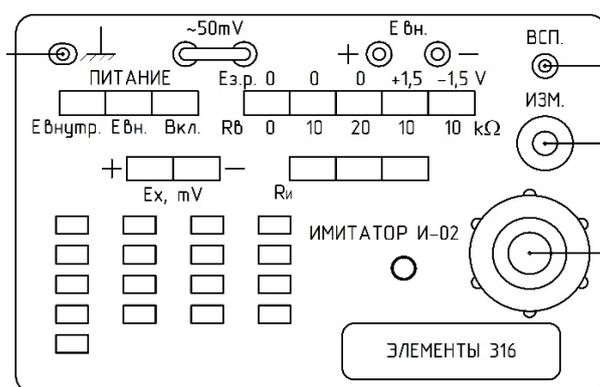


Рис. 1. Лицевая панель имитатора

Основные технические характеристики [1]:

– диапазоны выходного напряжения имитатора от 0 до ± 2011 мВ с дискретностью установки 0,1 мВ;

- значения сопротивлений, имитирующих внутреннее сопротивление измерительного электрода ($R_{и}$), составляют 0; 500 и 1000 МОм;
- значения сопротивлений, имитирующих внутреннее сопротивление вспомогательного электрода ($R_{в}$), составляют 0; 10 и 20 кОм;
- выходное сопротивление имитатора при $R_{и} = R_{в} = 0$ составляет не более 0,55 кОм на 1 мВ выходного напряжения;
- предел допускаемой основной абсолютной погрешности установки выходного напряжения имитатора должен соответствовать значениям, определяемым по формуле

$$\Delta = \pm(0,005U_x + 0,1). \quad (1)$$

Достоинства прибора:

- ток потребления имитатора не более 1 мА, что позволяет осуществлять автономное питание от четырех батарей А316;
- достаточно высокая точность.

Схема задания и формирования выходного напряжения состоит из большого количества резисторов и 17 переключателей П2К. Исходя из этого, к недостаткам имитатора можно отнести морально устаревшую элементную базу, трудоемкость сборки и изготовления прибора и достаточно большое содержание драгоценных металлов (по паспорту И-02 содержит золота – 0,000742 г, серебра – 0,7843885 г, палладия – 0,03299 г).

Предлагаемая структурная схема модернизированного имитатора электродной системы приведена на рис. 2.

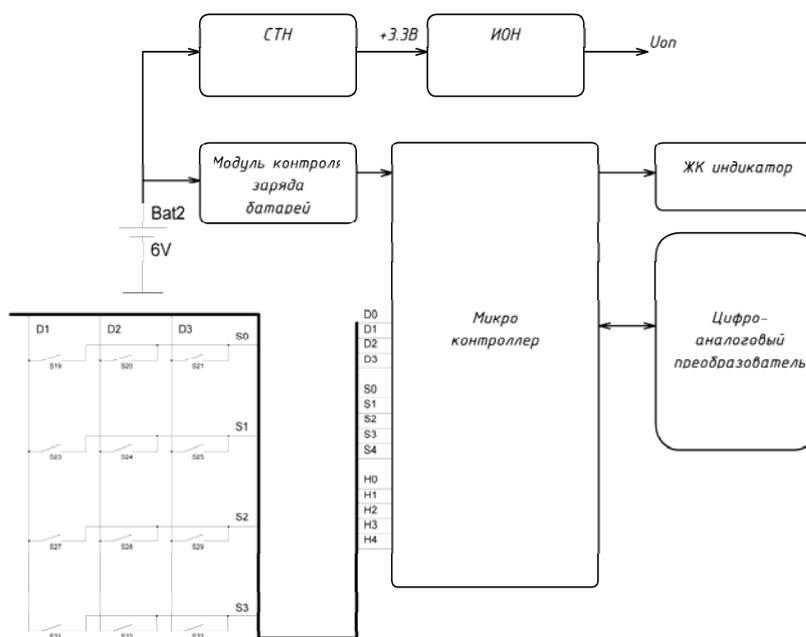


Рис. 2. Структурная схема модернизированного имитатора электродной системы

Изменения касаются способа формирования выходного напряжения. Взамен 17 переключателей П2К ставится 12-кнопочная цифровая клавиатура, которая подключается к микроконтроллеру. Выходное напряжение имитатора задается нажатием

соответствующих кнопок. Микроконтроллер в соответствии с нажатыми кнопками подает код на прецизионный 16-разрядный цифро-аналоговый преобразователь.

На ЖК-индикаторе отображается установленное значение выходного напряжения.

Схема изменения полярности, схема включения сопротивлений 500 и 1000 МОм, имитирующих внутреннее сопротивление измерительного электрода, и схема включения сопротивлений 0, 10, 20 кОм, имитирующих внутреннее сопротивление вспомогательного электрода, остаются без изменения.

Для решения поставленной задачи требуется недорогой прецизионный 16-битный ЦАП с низким потреблением. Было принято решение применить ЦАП AD5541A [2] производства Analog Device.

Упрощенная принципиальная схема модуля ЦАП AD5541A показана на рис. 3. В схеме ЦАП AD5541A можно выделить две части. Четыре старших бита 16-битного слова данных декодируются для управления 15 переключателями, от E1 до E15. Каждый переключатель подключает один из 15 согласованных резисторов либо к AGND, либо к VREF. Остальные 12 бит слова данных управляют переключателями от S0 до S11 стандартной 12-битной матрицы R-2R в режиме напряжения.

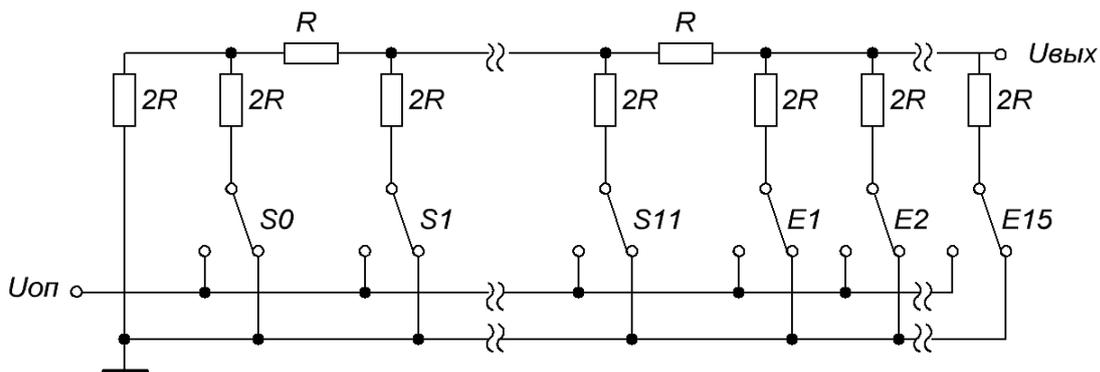


Рис. 3. Упрощенная схема модуля цифро-аналогового преобразователя AD5541A

Основные параметры ЦАП AD5541A:

- интегральная нелинейность – ± 1 ЕМР;
- дифференциальная нелинейность – ± 1 ЕМР;
- напряжение смещения – $\pm 0,7$ ЕМР;
- погрешность полной шкалы – ± 2 ЕМР;
- потребляемый ток – 155 мкА

При опорном напряжении 2 В, 1 ЕМР равняется 38 мкВ, таким образом данный ЦАП подходит для применения в схеме модернизированного имитатора электродной системы.

Таким образом, применение современной элементной базы позволит значительно снизить трудоемкость сборки и изготовления имитатора электродной системы при сохранении точностных и эксплуатационных характеристик.

Литература

1. 5M2.890.003 РЭ Имитатор электродной системы И-02 : руководство по эксплуатации.
2. Analog Devices. – 2022. – Режим доступа: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5541_5542.pdf. – Дата доступа: 20.02.2022.

УДК 004.048

PANTRYPHARM – ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЙ ПОМОЩНИК**А. В. Езвенков***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь**Рассмотрена проблема инвентаризации лекарственных препаратов и предложен автоматизированный метод решения в виде реализации облачной информационной системы с портативными клиентскими решениями.***Ключевые слова:** стартап, интеграция рекламы, абстракция от ОС, наносервисы.**PANTRYPHARM – PHARMACEUTICAL ASSISTANT****A. V. Ezvenkov***Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus**The problem of drug inventory is considered and an automated solution method is proposed in the form of an implementation of a cloud information system with portable client solutions.***Keywords:** startup, advertising integration, OS abstraction, nano services.

Целью данного проекта является разработка удобной системы приложений, которая позволит пользователям получать справочную информацию о медикаментах (используя открытые *API* или путем сотрудничества с фармацевтическими компаниями, что будет являться плюсом для стартапа), пользоваться такими встроенными функциями проекта, как:

- личный инвентарь (база данных) медикаментов с информацией о покупке, сроке годности и удобным добавлением медикамента (используя ИИ и *ML*);
- доступ к платформе через любые приложения (не только *web*-решение), используя как расширения для популярных платформ (*Apple health*, *Samsung health*), так и отдельные приложения на платформах (*iOS*, *Android*).

Схема представления системы пользователю изображена на рис. 1



Рис. 1. Схема представления системы пользователю

Главной пользой для владельца проекта может быть сотрудничество и данная модель, идея и тематика, которые представлены в проекте и полностью подходят под этот критерий. Сотрудничество с фармацевтическими компаниями в обмен на интеграцию рекламы, популяризацию тех или иных медикаментов/фармацевтических средств; а также получение дохода от процента с продаж (при условии наличия функции покупки медикаментов той или иной компании) как процента для площадки-распространителя.

Стоит также отметить сотрудничество с популярными платформами, интеграцию с которыми можно реализовать путем разработки расширений как отдельных клиентов для данной системы.

На рис. 2 изображена схема представления возможных моделей проектирования для разработчика.



Рис. 2. Схема представления возможных моделей проектирования для разработчика

В качестве архитектуры для данного проекта была выбрана следующая модель: *Any client + serverless*. Выбор данной модели для разработки примечателен многочисленными плюсами для масштабирования, сопровождения и управления системой:

- максимальная эластичность. Быстрое масштабирование от нуля до тысяч параллельно работающих функций;
- полная абстракция от операционной системы или любого софта, использующегося для выполнения приложения. Вам не должно быть важно, запускаются ли ваши *Serverless* приложения на *Linux*, *Windows* или *custom OS*. Все, что вас должно волновать, – это способность платформы выполнять *Python/Java/Ruby/YouNameIt* код и сопутствующие библиотеки для этого ЯП;
- при правильном проектировании функций легче построить слабо связанную архитектуру, при которой ошибка в одной функции не скажется на работоспособности всего приложения;
- ниже порог входа для новоприбывших. Понять «наносервис» из 100–500 строк (а это и есть обычный размер функции в *Serverless*) для нового разработчика в команде гораздо проще, чем понять *legacy* проект с миллионом строк и сложных связей.

В качестве основных технологий для построения веб-решения будут использоваться фреймворки *angular* (как удобное по структуре решение для построения *UI*) и *firebase platform* (как идеальный инструмент связи веб-решения на *node.js* и облачной платформы *google cloud*).

В качестве основных технологий для построения *back-end* составляющей системы будут использоваться инструменты *google cloud* платформы:

- *Cloud-functions* – для реализации нано сервисов, соответствующих *serverless* модели;

- *Firebase-ml* – для реализации технологий нейронных сетей, вспомогательного инструмента для таргетной рекламы, рекомендаций и умного добавления медикаментов;

- *Pub-sub* – для реализации *message query* между наносервисами и компонентами системы;

- *Firebase/firestore – nosql* бд для хранения данных;

- *Security* – для защиты пользовательских данных;

- *Pay-api* – для обработки и осуществления транзакций используя платформу *google*;

- *Cloud-storage* – для хранения открытых данных пользователей;

- *Firebase-analytics* – для составления аналитики по всей системе.

С помощью *API*-маркировки изображений *ML Kit Firebase* мы можем распознавать сущности в изображении без необходимости предоставлять какие-либо дополнительные контекстные метаданные, используя *API* на устройстве или облачный *API*. Данные технологии используются для распознавания упаковки препарата без необходимости заполнять форму для добавления его в инвентарь.

Маркировка изображений дает представление о содержании изображений. При использовании *API* мы получаем список распознанных сущностей: люди, вещи, места, действия и т. д. (в частности, упаковки различных фармацевтических препаратов). Каждая найденная метка поставляется с оценкой, которая указывает на уверенность модели *ML* в своей актуальности. С помощью этой информации можно выполнять такие задачи, как автоматическое создание метаданных и модерация контента.

УДК 004.891:004.93

ОБНАРУЖЕНИЕ ПЛОДОВ ОГУРЦА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СБОРА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМ АГРАРНЫМ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

К. С. Курочка, В. С. Ермашкевич, Д. А. Дорошко, Н. И. Расшивалов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Описан процесс реализации алгоритма по обнаружению плодов огурца на основе сверточных нейронных сетей для их сбора с помощью многофункционального аграрного робота.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть, обнаружение, робот, огурцы.

DETECTION OF CUCUMBER FRUITS FOR AUTOMATION OF THE COLLECTING PROCESS BY A MULTIFUNCTIONAL AGRICULTURAL ROBOT BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

K. S. Kurochka, V. S. Ermashkevich, D. A. Doroshko, N. I. Rasshivalov
Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The process of implementing an algorithm for detecting cucumber fruits based on convolutional neural networks for their collection using a multifunctional agricultural robot is described.

Keywords: Convoluted neural network, detecting, robot, cucumbers.

Сбор плодовых культур является одной из наименее автоматизированных на сегодняшний день отраслей [1]. Использование роботов для сбора плодов может позволить увеличить и площади сельскохозяйственных угодий, и эффективность садоводческих хозяйств за счет повышения производительности труда при сборе урожая и повышения качества данного сбора. Исходя из этого, рассматривается проектирование робота для автоматизации сбора плодов. В качестве предметной области выбраны огурцы. Одной из задач данной автоматизации является задача обнаружения плодов.

Предлагается решение, позволяющее при помощи сверточной нейронной сети *YOLOv5* осуществлять локализацию плодов огурца, готовых к сбору (рис. 1).



Рис. 1. Пример локализации огурца и вывода соответствующей вероятности

Подготовлен и размечен набор изображений огурцов (600 изображений), включающий и другие овощи и фрукты.

Набор данных представлен двумя классами:

- *cucumber* – представляет огурцы;
- *trash* – представляет любой другой овощ либо фрукт, чтобы позволить сети узнавать объекты, отличные от огурца и, следовательно, уменьшить вероятность того, что неизвестный объект будет принят за огурец.

YOLOv5 имеет множество разновидностей предварительно обученных моделей. Разница между ними заключается в компромиссе между размером модели и временем распознавания. Облегченная версия модели *YOLOv5s* имеет размер всего 14 МБ, но не очень точна. С другой стороны, есть *YOLOv5x*, размер которого составляет 168 МБ, но данный вариант является наиболее точной версией из всех разно-

видностей. Для обучения выбраны разновидности *nano* и *small* как наиболее производительные и достаточные для решения поставленной задачи. Разновидности *YOLOv5* представлены на рис. 2.

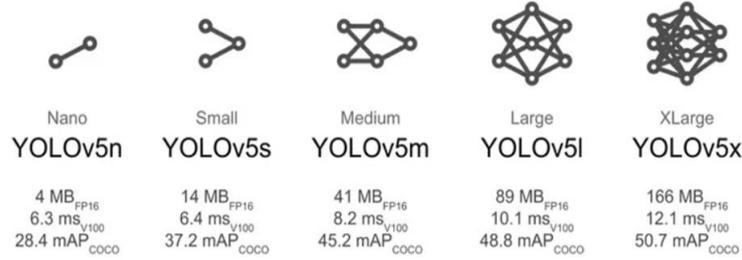


Рис. 2. Разновидности *YOLOv5*

Принцип работы *YOLOv5* заключается в следующем: исходное изображение сжимается таким образом, чтобы получить квадратную матрицу размером 13 на 13, в каждой клетке которой записана информация о наличии объекта и классе этого объекта на соответствующей части картинки. Таким образом, *YOLO* просматривает картинку один раз, что существенно увеличивает скорость обработки [2, с. 211].

Архитектура *YOLOv5* представлена на рис. 3.

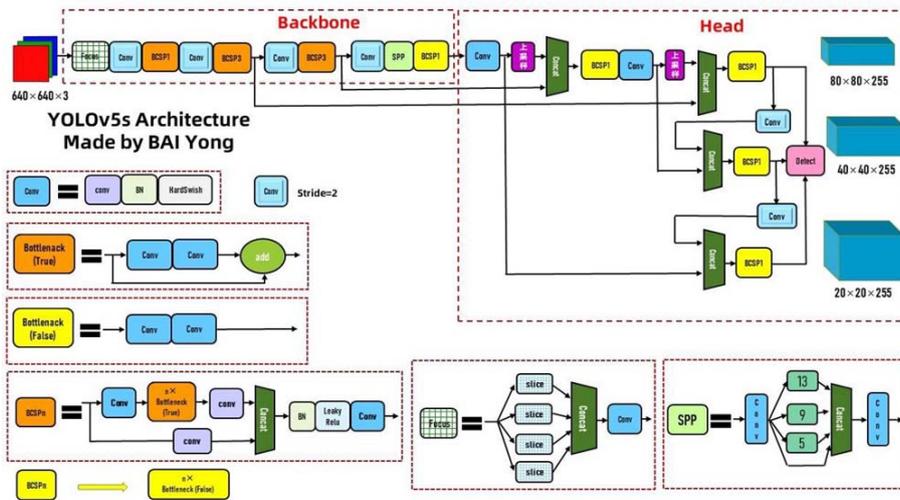


Рис. 3. Архитектура *YOLOv5*

Был проведен ряд обучений, выявлены оптимальные значения таких гиперпараметров обучения, как скорость обучения, *shear*, *scale*, *momentum* и др. Обучение состояло из 200 эпох с 11 шагами в рамках эпохи. Набор данных был разделен в пропорциях 80 к 20 %. В результате обучения модели *YOLOv5* получена точность в 95 % на валидационной выборке, а значение ошибки поиска – 5 % при использовании разновидности сети *small*. При обучении разновидности сети *nano* получена точность в пределах 88 %, что значительно хуже в сравнении с разновидностью сети *small*. В качестве функции потерь использовалась бинарная кросс-энтропия. Графики точности и потерь в зависимости от эпохи для *YOLOv5s* показаны на рис. 4.

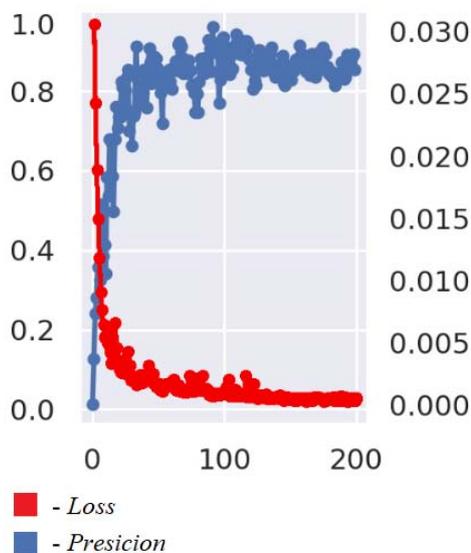


Рис. 4. Графики точности и потерь в зависимости от эпохи

Исходя из полученных графиков, можно сделать вывод, что для обучения модели на данном наборе данных достаточным количеством эпох является 100.

Для тестирования *YOLOv5* выбран одноплатный компьютер *Orange Pi*. Результат обработки одного кадра занял 0,8 с, что является достаточно хорошим результатом для данного одноплатного компьютера; в дальнейшем предполагается проведение вычислений на удаленном сервере для достижения необходимой производительности.

Литература

1. Сбор огурцов. – Режим доступа: <https://robroy.ru/robot-dlya-sbora-ogkrczov.html>. – Дата доступа: 18.09.2022.
2. Курочка, К. С. Нейросетевая обработка данных : учеб.-метод. пособие / К. С. Курочка, К. А. Панарин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 260 с.

УДК 62-83-52

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА АСИНХРОННО-ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В РОТОРНОЙ ЦЕПИ

И. В. Дорощенко, М. Н. Погуляев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

С использованием функциональных схем и имитационных моделей асинхронно-вентильного каскада произведен расчет и анализ действующего значения электромагнитного момента электроприводов на основе асинхронно-вентильного каскада с транзисторным и тиристорным преобразователями в роторной цепи.

Ключевые слова: асинхронно-вентильный каскад, асинхронный двигатель с фазным ротором, имитационная модель, компьютерное моделирование, моделирование электропривода.

INVESTIGATION OF THE ELECTROMAGNETIC TORQUE OF THE ASYNCHRONOUS-VALVE CASCADE WITH VARIOUS TYPES OF CONVERTERS IN THE ROTOR CIRCUIT

I. V. Doroshchenko, M. N. Pogulyaev

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Using functional diagrams and simulation models of an asynchronous-valve cascade, the calculation and analysis of the effective value of the electromagnetic torque of electric drives based on an asynchronous-valve cascade with transistor and thyristor converters in a rotor was carried out.

Keywords: Asynchronous-valve cascade, asynchronous motor with a phase rotor, simulation model, computer simulation, electric drive simulation.

Правильный выбор двигателя является основным моментом для обеспечения надежной работы любой структуры электропривода. Поэтому его необходимо проводить с учетом всех особенностей разрабатываемой системы электропривода. Особое внимание следует уделять потерям мощности при нагреве, вследствие искажения формы токов, для систем электропривода с полупроводниковыми преобразователями. Для схемы асинхронно-вентильного каскада (АВК) искажение токов статора и ротора приводит к недоиспользованию асинхронной машины как по моменту, так и по мощности. Анализ опубликованных исследований показывает, что, применяя тот или иной закон управления, а также различные варианты вентильных преобразователей в цепи ротора, для схемы АВК можно добиться различных энергетических показателей системы в целом [1–4].

Целью данных исследований является определение влияния типа преобразователя в роторной цепи АВК на создаваемый электромагнитный момент.

Используя модель асинхронного двигателя с фазным ротором [5–7], с учетом функциональных схем АВК с тиристорным и транзисторным управляемым преобразователем (автономным инвертором напряжения на основе IGBT-модулей) в цепи ротора (рис. 1, а, б) в среде Matlab Simulink были составлены имитационные модели данных схемных решений АВК на базе асинхронного электродвигателя 4МТФ112L6.

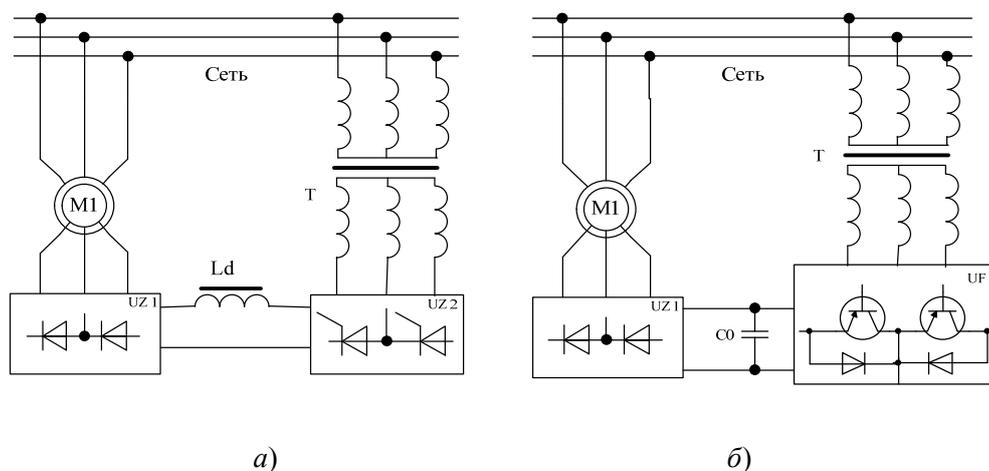
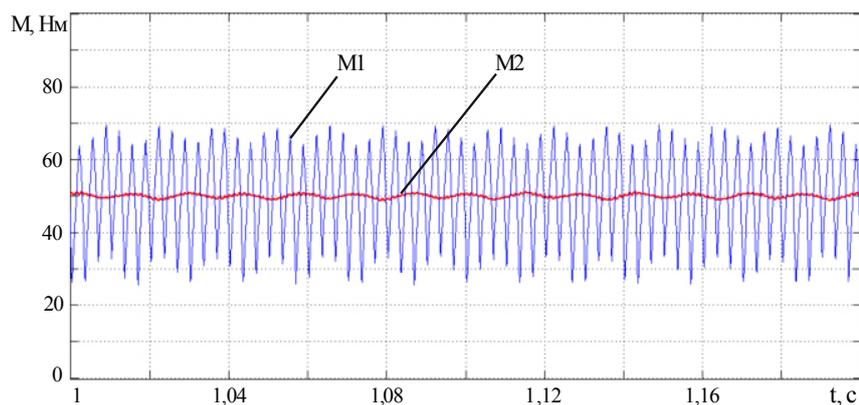
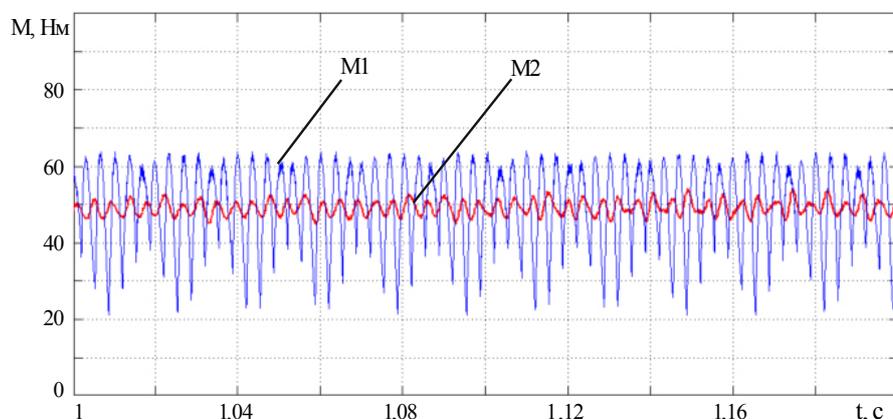


Рис. 1. Функциональная схема асинхронно-вентильного каскада:
а – с тиристорным преобразователем в роторной цепи;
б – с транзисторным преобразователем в роторной цепи

Имитационное моделирование производилось для двигательного режима работы АВК при номинальной нагрузке и регулировании скорости вращения от ω_n до $0,2\omega_n$. В результате моделирования был произведен расчет действующего значения электромагнитного момента АВК. Диаграммы действующих значений моментов АВК (при номинальной нагрузке $51 \text{ Н} \cdot \text{м}$) с транзисторным и тиристорным преобразователями в роторной цепи при скоростях вращения $\omega = 80 \text{ с}^{-1}$ и $\omega = 20 \text{ с}^{-1}$ представлены на рис. 2, а, б, соответственно.



а)



б)

Рис. 2. Диаграммы действующих значений моментов:
а — при $\omega = 80 \text{ с}^{-1}$; б — при $\omega = 20 \text{ с}^{-1}$, где M1 — действующее значение момента с тиристорным преобразователем в роторной цепи; M2 — действующее значение момента с транзисторным преобразователем в роторной цепи

Представленные результаты имитационного моделирования асинхронно-вентильного каскада в среде Matlab Simulink с двумя типами преобразователей в цепи ротора (транзисторным и тиристорным) показывают, что искажение токов статора и ротора [1–4] приводит в итоге к искажению действующего значения электромагнитного момента АВК. Характер искажения действующего значения момента будет зависеть от степени регулирования скорости вращения и изменения нагрузки на валу.

Литература

1. Дорощенко, И. В. Исследование гармонического состава тока асинхронно-вентильного каскада / И. В. Дорощенко, М. Н. Погуляев, В. С. Захаренко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2015. – № 1. – С. 51–57.
2. Дорощенко, И. В. Электромагнитная совместимость электромеханического испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада / И. В. Дорощенко // Электромеханические преобразователи энергии : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. – Томск, 14–16 окт. 2015 г., Том. политехн. ун-т. – Томск, 2015. – С. 70–75.
3. Shchuplov, M. Spectral Analysis of Power Quality of Asynchronous Thyristor Loading Device / M. Shchuplov, I. Daroshchanka, V. Zakharenko // Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems Itelms'2010. The proceedings of the 5th International Conference. – Held on June 4–5, 2010. – Kaunas : Technologija, 2010 – P. 48–53.
4. Дорощенко, И. В. Механические характеристики автоматизированного электромеханического испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада / И. В. Дорощенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2011. – № 2. – С. 68–72.
5. Дорощенко, И. В. Имитационная модель асинхронно-вентильного каскада в Matlab Simulink / И. В. Дорощенко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XV науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2015 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2015. – С. 264–267.
6. Дорощенко, И. В. Имитационная модель асинхронной машины с фазным ротором в MATLAB Simulink / И. В. Дорощенко, М. Н. Погуляев // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2021. – № 2. – С. 99–106.
7. Simulation Model of an Asynchronous Machine with Wound Rotor in Matlab Simulink / I. Doroshchenko [et al.] // E3S Web of Conferences 288, 01110 (2021) SUSE-2021 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801110>.

УДК 621.313.333

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ С ТОРМОЗНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

В. В. Брель, Л. В. Веппер, В. Е. Лебединский, А. Н. Кузьмин

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Представлен стенд для экспериментального исследования переходных процессов протекающих в электродвигателях с тормозными устройствами. Стенд позволяет измерять путь торможения, время торможения и скорость вращения вала двигателя в конкретный момент времени.

Ключевые слова: стенд, электродвигатель, переходные процессы, время и путь торможения.

STAND FOR INVESTIGATION OF TRANSIENT PROCESSES IN ELECTRIC MOTORS WITH BRAKES.

V. V. Brel, L. V. Vepper, V. E. Lebedinsky, A. N. Kuzmin

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

In the report on the experimental study of transient processes occurring in electric motors with braking devices. The stand allows you to measure the braking path, braking time and the speed of rotation of the motor shaft at a particular point in time.

Keywords: stand, electric motor, transients, time and path of braking.

На кафедре «Автоматизированный электропривод» был изготовлен стенд для экспериментального исследования переходных процессов, протекающих в электродвигателях с тормозными устройствами [1, 2].

Стенд состоит из ПЭВМ (*Intel 2.2GHz*), схемы управления, цифрового датчика пути и блока сопряжения между ними. Стенд позволяет измерять путь торможения, время торможения и скорость вращения вала двигателя в конкретный момент времени (рис. 1).

На вал исследуемого электродвигателя с тормозным устройством, подключенного к сети через магнитный пускатель, монтируется диск с отверстиями. Отверстия размещают между фотоэлементами цифрового датчика пути. От схемы управления к блоку сопряжения подводятся контакты, определяющие момент отключения двигателя от сети. Для передачи данных используется интерфейс *RS-232C*. Каждый импульс датчика пути формирует в блоке сопряжения пакет из 5 байт, который передается на ПЭВМ. Максимальная частота опроса датчика пути – 100 Гц. Это позволяет даже при минимальном переходном процессе торможения электродвигателя получать график с 20 экспериментальными точками. От ПЭВМ к схеме управления подведены управляющие контакты.

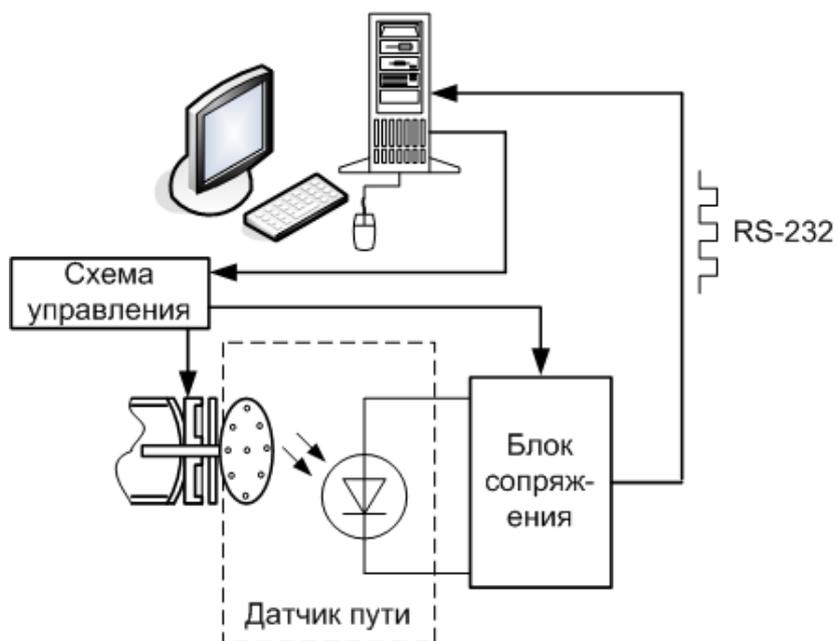


Рис. 1. Структурная схема стенда

Стенд работает следующим образом: подается напряжение на электродвигатель, схема управления растормаживает электромеханический тормоз, вал начинает вращаться. После того как двигатель выйдет на номинальный режим, оператор отключает напряжение. В этот момент на блок сопряжения от схемы управления приходит сигнал начала отсчета количества оборотов. Блок сопряжения начинает передавать пакеты данных на ПЭВМ. Программа, разработанная на базе программного обеспечения *Borland Delphi* анализирует полученные пакеты. В момент отключения питания в ней запускается таймер (блоком сопряжения), и начинается отсчет времени с фиксацией приходящих пакетов в различные промежутки времени.

Таким образом, программа получает массив данных, в котором содержится количество оборотов и время, за которое они совершены. Далее программа в реальном времени рассчитывает значение мгновенной скорости. При достижении скорости включения (задается оператором) программа генерирует на выходе спикера ПЭВМ повышенное напряжение, которое поступает на схему управления и является сигналом к включению электромеханического тормоза.

На рис. 2 приведена одна из возможных схем управления, используемая при работе станда. По соображениям компактности из нее исключили шунтирующее емкостное сопротивление, задавая ток удержания электромагнита (после отключения АД) углом открывания тиристора.

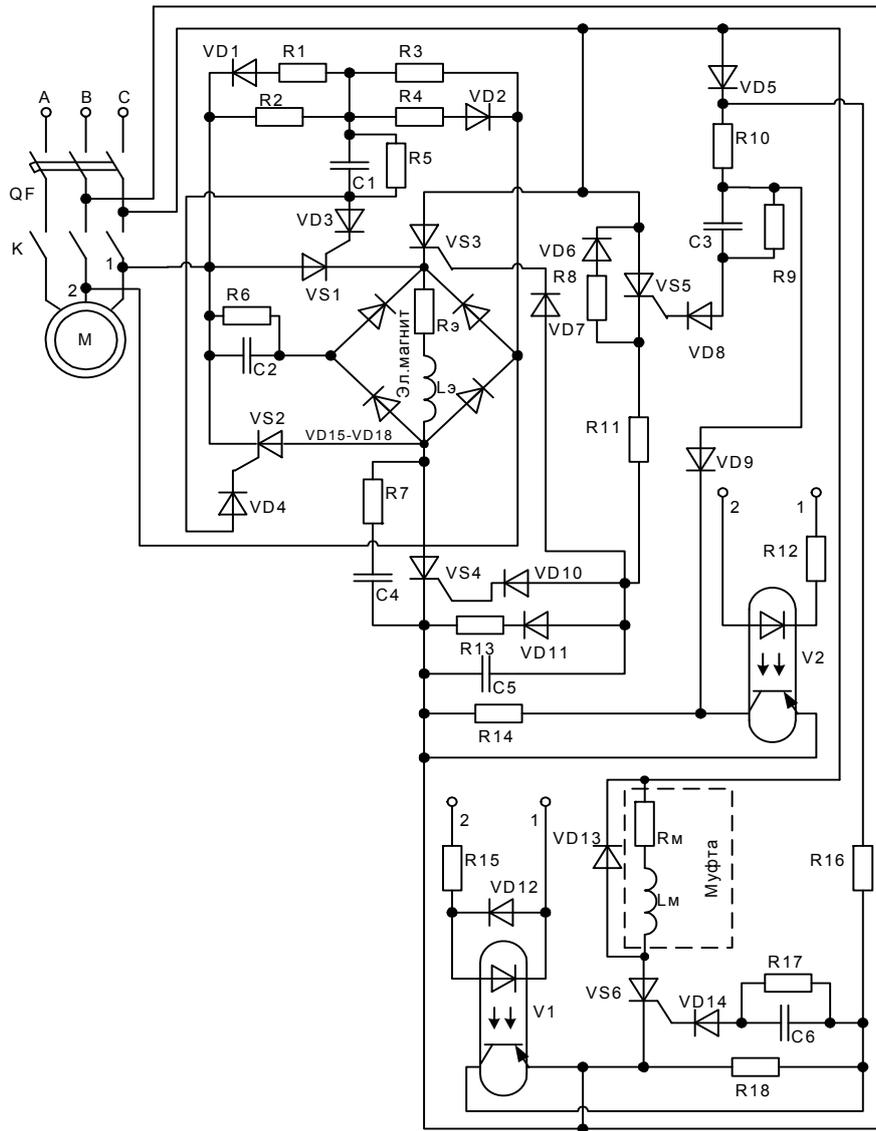


Рис. 2. Схема управления

Задавая различными значениями скорости включения, можно экспериментально исследовать все электромеханические кривые торможения. Стенд можно использовать для исследования электродвигателей с тормозными устройствами раз-

личной мощности. Исследования проводились при различном моменте инерции электропривода и различной нагрузке на валу.

Экспериментальные исследования подтвердили правильность применяемых математических моделей для исследования переходных процессов в электродвигателях с тормозными устройствами.

Л и т е р а т у р а

1. Александров, М. П. Тормозные устройства / М. П. Александров, А. Г. Лысяков. – М. : Машиностроение, 1985. – 312 с.
2. Соленков, В. В. Асинхронный электродвигатель со встроенным комбинированным тормозным устройством на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты / В. В. Соленков, В. В. Брель // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2011 – № 6. – С. 20–26.

УДК 621.313

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В ТРЕХФАЗНОМ АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ

В. В. Логвин, В. В. Брель, И. В. Свиридович

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Рассмотрен ряд возможных методов моделирования автоколебательных процессов с использованием асинхронного двигателя и определены наиболее соответствующие реальным процессам.

Ключевые слова: автоколебательный режим, асинхронный электродвигатель, максимальный момент.

MODELING OF SELF-OSCILLATING MODES IN A THREE-PHASE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR

V. V. Logvin, V. V. Brel, I. V. Sviridovich

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

In this paper, a number of possible methods for modeling auto-oscillatory processes using an asynchronous motor are considered and the most appropriate for real processes are determined.

Keywords: self-oscillating mode, asynchronous electric motor, maximum torque.

Наиболее распространенным электроприводом возвратно-вращательного движения является электропривод вращательного движения, в котором используются либо механические преобразователи (редукторы), либо переключатели полярности или фазы напряжения питания электродвигателя для реверсирования направления вращения.

Использование редукторов ведет к потерям до 30 % мощности приводного электродвигателя, а применение переключателей приводит к жесткому реверсу, сопровождающемуся электрическими и механическими ударами, что снижает долговечность электропривода и рабочей машины в целом, а также ухудшает качество технологического процесса.

Отсюда ясна актуальность создания безредукторного электропривода возвратно-вращательного движения с мягким реверсом.

Предлагается принцип построения колебательного электропривода, основанный на обеспечении условий возникновения устойчивого автоколебательного режима работы его силового электромеханического узла «асинхронный электродвигатель – упругий элемент».

В таком варианте автоколебательный электропривод чрезвычайно просто исполняется, поскольку для его реализации достаточно подключить обмотки общепромышленного асинхронного электродвигателя (АД) к однофазной электросети, а на валу разместить пружину или маятник (дисбаланс).

Пересоединение обмоток общепромышленного трехфазного асинхронного электродвигателя для подключения к однофазной электрической цепи с целью перевода его в однофазный режим работы и замена механической пружины маятником, имитирующим «упругость», позволят предельно упростить реализацию и повысить надежность автоколебательных систем. В таблице представлены схемы электропитания статорных обмоток.

Схемы электропитания статорных обмоток асинхронного электродвигателя в автоколебательном режиме

Соединение звезда			Соединение треугольником		
Схема подключения	Векторная диаграмма МДС	Относ. МДС, F_0/F_Φ	Схема подключения	Векторная диаграмма МДС	Относ. МДС, F_0/F_Φ
		2			2
		2			2

Уравнение механической характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя при подключении к трехфазной электрической сети согласно формуле Клосса можно записать в виде:

$$M_{эм} = \frac{2M_{кр}(1 + \alpha S_{кр})}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + 2\alpha \cdot S_{кр}},$$

где $M_{эм}$ – электромагнитный момент, развиваемый электродвигателем; S – относительное скольжение; $\alpha = r_1/r_2'(1 + x_1/x_m)$ – относительное активное сопротивление

статорной цепи; $M_{кр} = \frac{3pU_{\phi}^2}{2\omega_1 \left(1 + \frac{x_1}{x_m}\right) \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left[x_1 + x'_2 \left(1 + \frac{x_1}{x_m}\right) \right]^2} \right]}$ – критический (максимальный) момент; $S_{кр} = \frac{r'_2 \left(1 + \frac{x_1}{x_m}\right)}{\sqrt{r_1^2 + \left[x_1 + x'_2 \left(1 + \frac{x_1}{x_m}\right) \right]^2}}$ – критическое скольжение; $r_1, x_1, r'_2, x'_2, x_m$ – параметры схемы замещения АД; p – число пар полюсов; ω_1 – угловая частота напряжения сети электропитания; U_{ϕ} – действующее значение падения напряжения на фазной обмотке статора.

В трехфазных АД, включенных в однофазную сеть по представленным схемам, возникает пульсирующее магнитное поле, которое может быть разложено на два противоположно вращающихся круговых поля с вдвое меньшей амплитудой, чем пульсирующее.

Каждое из этих полей будет создавать электромагнитные моменты (определяемые выражением $M_{эм}$), но в k раз меньшие.

Значение k определяется схемой включения обмоток и величиной тока в них. Если напряжение электропитания таково, что в установившемся автоколебательном режиме по обмоткам протекает номинальный (паспортный) ток статора АД, то

$$k = \left(\frac{1}{2} \frac{F_0}{F_{\phi}} : \frac{F_m}{F_{\phi}} \right)^2 = \frac{1}{9} (F_0 / F_{\phi})^2,$$

где $F_0 / F_{\phi}, F_m / F_{\phi} = 1,5$ – относительные модули суммарных пространственных векторов МДС при однофазном и трехфазном включении АД.

Для представленных схем с наилучшим использованием электродвигателя $k = \frac{1}{9} (2)^2 = \frac{4}{9}$.

Итак, уравнение механической характеристики однофазного включения АД будет иметь вид:

$$M_{эм} = 2kM_{кр} (1 + \alpha S_{кр}) \left[\frac{1}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + 2\alpha S_{кр}} - \frac{1}{\frac{2-S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{2-S} + 2\alpha S_{кр}} \right].$$

С целью оценки точности различных аппроксимаций, были рассчитаны механические характеристики АД с повышенным и пониженным критическим скольжением.

Наилучшее совпадение с характеристикой Клосса дают аппроксимации, фиксирующие координаты точки холостого хода, а во втором – аппроксимация, фиксирующая координаты критической точки.

УДК 681.518.54:621.396.963.32

ПЕРЕДАЮЩАЯ АНТЕННА НА СОЛЕНОИДЕ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ РАДИОСИГНАЛА ИЗ НЕФТЕПРОВОДНОЙ ТРУБЫ**В. В. Щуплов, С. Н. Кухаренко, Н. А. Красовская***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Дан сравнительный анализ вариантов числа обмоток соленоида, используемого в качестве низкочастотной антенны, для формирования максимального внешнего магнитного поля катушки.

Ключевые слова: передающая антенна, многослойный соленоид, внешнее магнитное поле катушки.

TRANSMITTING ANTENNA ON A SOLENOID FOR TRANSMITTING A RADIO SIGNAL FROM AN OIL PIPELINE PIPE**V. V. Schuplov, S. M. Kukharenka, N. A. Krasouskaya***Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

Comparative analysis of variants of the number of coils of a solenoid used as a low-frequency antenna for summing the maximum external magnetic field of the coil.

Keywords: transmitting antenna, multilayer solenoid, external magnetic field of the coil.

Передающая антенна должна формировать в пространстве переменное магнитное поле, однозначно связанное с информационным радиосигналом.

В качестве передающей антенны рассмотрим многослойный соленоид (многослойную катушку индуктивности).

Так как внешнее магнитное поле катушки определяется полем внутри катушки, то необходимо добиться максимального поля внутри катушки при заданных ее геометрических размерах и для заданного источника сигнала.

Напряженность магнитного поля в центре ($z = 0$) многослойной катушки (рис. 1) длиной $2b$, состоящей из N_1 слоев по N_2 витков в каждом, и тока I через нее определяется выражением [1]:

$$H_{z=0} = \frac{N_1 N_2 I}{2(a_2 - a_1)} \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + b^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + b^2}}.$$

Поле на торце катушки ($z = b$) равно

$$H_{z=b} = \frac{N_1 N_2 I}{2(a_2 - a_1)} \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + 4b^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4b^2}}.$$

То есть общее число витков в катушке $W = N_1 N_2$.

Как видно из формул, магнитное поле катушки определяется только ампер-витками $AW = IW$ и геометрическими размерами катушки a_1 , a_2 , $2b$.

В нашем случае геометрические размеры катушки заданы:

- длина катушки – $2b = 160$ мм;
- диаметр катушки – $D = 2a_2 = 79$ мм;
- внутренний диаметр катушки – $d = 2a_1 = 20$ мм.

Источник сигнала с выходным сопротивлением $R_0 = 0,01$ Ом питается от источника напряжением $E = 9$ В. Максимальный ток источника ограничен током 1 А.

Число витков в катушке и ее активное сопротивление зависят от выбранного диаметра провода.

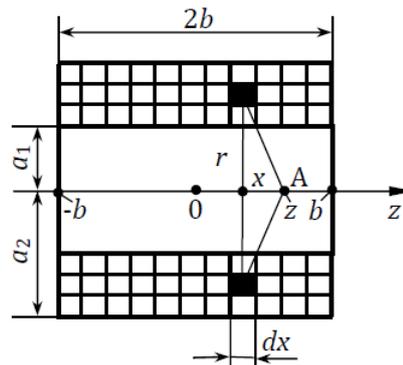


Рис. 1. Геометрические размеры катушки

Ток через катушку равен:

$$I_k = \frac{E}{R_k + X_L},$$

где R_k – активное сопротивление катушки; X_L – индуктивное сопротивление катушки.

Активные потери в катушке равны

$$P = I_k^2 R_k.$$

Таким образом необходимо выбрать диаметр провода, чтобы катушка имела минимальные активные потери P и максимальное значение ампер-витков AW .

Для сравнительного анализа были выбраны провода диаметром 0,4 мм, 0,72 мм и 1 мм.

Кроме того, с целью уменьшить активное и индуктивное сопротивления катушки при сохранении общего числа витков были рассмотрены варианты разбиения катушки на 8, 5, 4, 2 и 1 секции и параллельного их соединения.

Для расчета индуктивности секций катушек были использованы для сравнения три методики, известные из литературы [1]. Все они дали примерно одинаковые результаты. Поэтому ниже приводятся результаты расчета по одной из них. Для упрощения расчетов считалось, что только соседние секции имеют взаимную индуктивность при коэффициенте связи равном единице.

Результаты расчетов представлены в виде матриц Ns , Rk , $P2m$, $I2rxm$, $AW2m$, $L2km$, $z2m$, $X2m$, где строки соответствуют числу секций в катушке сверху вниз 8, 5, 4, 2, 1, а столбцы соответствуют проводам слева направо 0,4 мм, 0,72 мм, 1,0 мм.

$$Ns = \begin{pmatrix} 3,3335 \times 10^3 & 927,4214 & 435,7026 \\ 5,3336 \times 10^3 & 1,4839 \times 10^3 & 697,1241 \\ 6,667 \times 10^3 & 1,8548 \times 10^3 & 871,4051 \\ 1,3334 \times 10^4 & 3,7097 \times 10^3 & 1,7428 \times 10^3 \\ 2,6668 \times 10^4 & 7,4194 \times 10^3 & 3,4856 \times 10^3 \end{pmatrix} \quad Rk = \begin{pmatrix} 9,0313 & 0,7755 & 0,1889 \\ 23,1201 & 1,9853 & 0,4835 \\ 36,1252 & 3,102 & 0,7555 \\ 144,5009 & 12,408 & 3,0219 \\ 578,0035 & 49,632 & 12,0876 \end{pmatrix}$$

$$P2m = \begin{pmatrix} 7,1762 \times 10^{-4} & 4,8478 \times 10^{-3} & 2,9511 \times 10^{-3} \\ 2,4302 \times 10^{-3} & 0,0206 & 0,0193 \\ 4,3708 \times 10^{-3} & 0,0406 & 0,0472 \\ 0,0202 & 0,2409 & 0,7158 \\ 0,0389 & 0,5243 & 2,4488 \end{pmatrix} \quad I2rxm = \begin{pmatrix} 8,914 \times 10^{-3} & 0,0791 & 0,125 \\ 0,0103 & 0,1019 & 0,2 \\ 0,011 & 0,1145 & 0,25 \\ 0,0118 & 0,1393 & 0,4867 \\ 8,2069 \times 10^{-3} & 0,1028 & 0,4501 \end{pmatrix}$$

$$AW2m = \begin{pmatrix} 237,7178 & 586,6114 & 435,7026 \\ 273,4116 & 756,0094 & 697,1241 \\ 293,3365 & 849,2135 & 871,4051 \\ 315,1946 & 1,0337 \times 10^3 & 1,6964 \times 10^3 \\ 218,8605 & 762,562 & 1,5689 \times 10^3 \end{pmatrix} \quad L2km = \begin{pmatrix} 0,9107 & 0,1028 & 0,05 \\ 1,259 & 0,127 & 0,053 \\ 1,4565 & 0,1404 & 0,0544 \\ 2,5483 & 0,2157 & 0,0632 \\ 6,742 & 0,5218 & 0,1152 \end{pmatrix}$$

$$z2m = \begin{pmatrix} 126,2064 & 14,2288 & 6,9088 \\ 175,5683 & 17,665 & 7,3376 \\ 204,5535 & 19,6577 & 7,5545 \\ 380,7363 & 32,2978 & 9,2462 \\ 1,0966 \times 10^3 & 87,5658 & 19,9958 \end{pmatrix} \quad X2m = \begin{pmatrix} 125,8821 & 14,2071 & 6,9059 \\ 174,038 & 17,5519 & 7,321 \\ 201,3365 & 19,4098 & 7,5156 \\ 352,2452 & 29,8152 & 8,735 \\ 931,9484 & 72,1348 & 15,921 \end{pmatrix}$$

Из анализа полученных результатов видно, что наибольшее значение ампер-витков $AW = 1,6964 \cdot 10^3$ имеет вариант для двух секций, намотанных проводом 1,0 мм.

Выполнены также расчеты еще для двух внутренних диаметров катушки. Результаты сведены в таблицу.

Зависимость параметров катушки от ее внутреннего диаметра ds

	AW , А-Вит	$P2m$, Вт	$I2rxm$, А	Ns	N	Rk , Ом	$X2m$, Ом
$ds = 10$ мм	1611	0,4963	0,3952	2038	4076	3,17	10,93
$ds = 20$ мм	1696	0,7158	0,487	1743	3486	3,02	8,735
$ds = 40$ мм	1152	0,6003	0,5	1152	2304	2,40	5,373

Літэратура

1. Матюк, В. Ф. Влияние размеров соленоида прямоугольного сечения на распределение поля вдоль его оси / В. Ф. Матюк // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 3.

УДК 620.197.5

УМОВЫ ФАРМІРАВАННЯ АХОЎНАГА ТОКА Ў СІСТЭМАХ ЭЛЕКТРАХІМІЧНАЙ АБАРОНЫ

Ю. В. Крышнеў, У. І. Собалеў, А. Я. Запольскі, М. В. Дравіца

*Установа адукацыі «Гомельскі дзяржаўны тэхнічны
ўніверсітэт імя П. В. Сухого», Рэспубліка Беларусь*

Прааналізаваны фактары, якія аказваюць уплыў на супраціўленні эквівалентнага ланцуга ахоўнага тока станцый катоднай абароны падземных нафтаправодаў. Паказана, што ва ўмовах працяглай эксплуатацыі нафтаправодаў, якая суправаджаецца ўтварэннем лакальных участкаў няпоўнай абароны ў месцах, дзе ўтварыліся дэфекты ахоўных пакрыццяў, прыярытэтным варыянтам аднаўлення ахоўнага патэнцыялу з'яўляецца аптымізацыя рабочых рэжымаў станцый катоднай абароны.

Ключавыя словы: ахоўны патэнцыял, супраціўленне ізаляцыйнага пакрыцця, супраціўленне анодных заземленняў, сістэма катоднай абароны, СКА.

CONDITIONS FOR FORMATION OF PROTECTIVE CURRENT IN ELECTROCHEMICAL PROTECTION SYSTEMS

Y. V. Kryshneu, U. I. Sobaleu, A. Y. Zapolski, M. V. Dravitsa

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

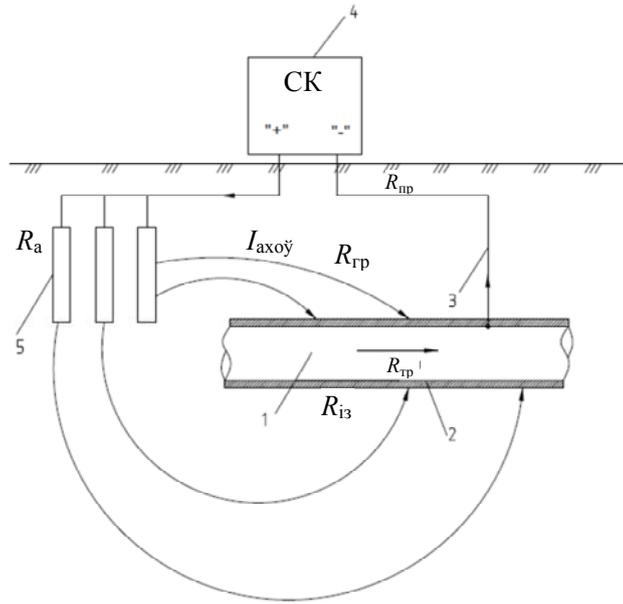
Factors influencing the resistance of the equivalent protective current circuit of cathodic protection stations of underground oil pipelines are analyzed. It is shown that in the conditions of long-term operation of oil pipelines, which is accompanied by the formation of local areas of incomplete protection in places where defects of protective coatings have formed, the priority option for restoring the protective potential is the optimization of the working modes of cathodic protection stations.

Keywords: protective potential, insulation coating resistance, anode earthing resistance, cathodic protection system, CPS.

Забеспячэнне велічыні ахоўнага патэнцыялу ўчастка трубаправода наўпрост залежыць ад велічыні нацякаючага ахоўнага току $I_{\text{ахоўн}}$. Уплыў на размеркаванне патэнцыялу ўздоўж абароненага ўчастка аказваюць зменлівыя як у часе, так і па працягласці, параметры абароненага аб'екта, абсталяванне супрацькарызійнай абароны і навакольнага асяроддзя. У сваю чаргу, на велічыню ахоўнага тока аказваюць уплыў такія супраціўленні ланцуга яго працякання [1, 2], як:

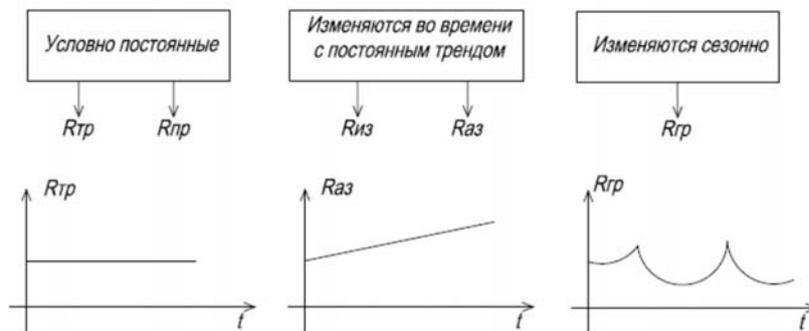
- удзельнае супраціўленне адзінкі паверхні ізаляцыйнага пакрыцця $R_{\text{із}}$, Ом · м²;
- супраціўленне анодных заземленняў $R_{\text{аз}}$, Ом;
- удзельнае супраціўленне грунта $R_{\text{гр}}$, Ом · м;
- пагоннае прадольнае супраціўленне металу трубаправода $R_{\text{тр}}$, Ом/м;
- супраціўленне спалучальных правадоў $R_{\text{пр}}$, Ом.

Схема працякання ахоўнага току прадстаўлена на мал. 1.



Мал. 1. Схема проходження ахоўнага току:
 1 – трубаправод, які абараняецца; 2 – ізаляцыйнае пакрыццё;
 3 – злучальныя правадоў; 4 – станцыя катоднай абароны;
 5 – анодныя заямленні; СКА – станцыя катоднай абароны

Складанасць падтрымання ахоўнай рознасці патэнцыялаў складаецца ў дынамічнай змене супраціваў на ўчастку, які абараняецца. Правёўшы класіфікацыю супраціўленняў, якія ўплываюць, быў праведзены іх падзел на 3 групы ў залежнасці ад зменлівасці іх велічыні ў часе. Былі вылучаны ўмоўна пастаянныя супраціўленні (да іх аднесены супраціўленне металу трубаправода і злучальных правадоў); супраціўленні, якія змяняюцца ў часе з пастаяннай тэндэнцыяй (супраціўленні ізаляцыі і анодных заямленняў) і якія змяняюцца сезонна (удзельнае супраціўленне грунта). Графічнае адлюстраванне класіфікацыі, супраціўленні якіх ўплываюць на ахоўны патэнцыял, прадстаўлена на мал. 2.



Мал. 2. Графічнае адлюстраванне класіфікацыі супраціўленняў, якія ўплываюць на ахоўны патэнцыял:

$R_{тр}$ – пагоннае прадоўнае супраціўленне трубаправода;
 R_{np} – супраціўленне спалучальных правадоў; $R_{из}$ – удзельнае супраціўленне адзінкі паверхні ізаляцыйнага пакрыцця; $R_{аз}$ – супраціўленне анодных заямленняў; $R_{гр}$ – удзельнае электрычнае супраціўленне грунта; t – час

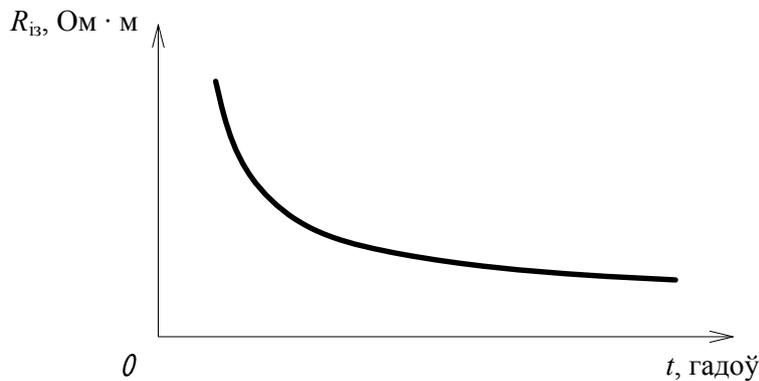
Удзельнае супраціўленне грунта ўвесь час змяняецца ў залежнасці ад кліматычных умоў. Супраціўленне анодных заямленняў з часам павялічваецца, праз з'яўленне каразійных адкладаў на іх паверхні. Супраціўленні металу трубаправода і спалучальных правадоў у часе практычна не змяняюцца.

Удзельнае супраціўленне адзінкі паверхні ізаляцыйнага пакрыцця даволі значна зніжаецца паводле экспанентнага закону ў працэсе эксплуатацыі нафтаправода [3]:

$$R_{i3}(t) = R_{i30} e^{-\gamma t}, \text{ Ом} \cdot \text{м}^2, \quad (1)$$

дзе t – тэрмін эксплуатацыі трубаправода, год; R_{i30} – пачатковае значэнне ўдзельнага супраціўлення адзінкі паверхні ізаляцыйнага пакрыцця, $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$; γ – каэфіцыент, які характарызуе хуткасць змянення супраціўлення ізаляцыі ў часе, 1/год (для бітумных пакрыццяў $\gamma = 0,05$, для палімерных пакрыццяў $\gamma = 0,08$).

Графік змянення супраціўлення ізаляцыі ў часе паказаны на мал. 3.



Мал. 3. Графік змянення супраціўлення ізаляцыі R_{i3} у часе

Ва ўмовах працяглай эксплуатацыі нафтаправодаў, якая суправаджаецца ўтварэннем лакальных участкаў няпоўнай абароны ў месцах, дзе ўтварыліся дэфекты ахоўных пакрыццяў, асноўнымі варыянтамі аднаўлення ахоўнага патэнцыялу з'яўляюцца наступныя:

- 1) усталёўка дадатковых станцый катоднай абароны (СКА);
- 2) усталёўка дадатковых або ремонт існуючых анодных заямленняў;
- 3) пераізаляцыя ўчасткаў трубаправода;
- 4) змена рэжымаў работы СКА.

Пералічаныя мерапрыемствы 1–3 патрабуюць значных матэрыяльных укладанняў, таму пераважным і першачарговым з'яўляецца мерапрыемства 4 са знаходжаннем аптымальных рэжымаў работы СКА, якія даюць магчымасць наяўнымі сродкамі абароны аднавіць ахоўны патэнцыял. Акрамя таго, вырашаючы задачу энергаэфектыўнасці, неабходна імкнуцца да памяншэння сукупнай выхадной магутнасці станцый на ўчастку, які абараняецца. Знаходжанне аптымальных параметраў таксама актуальна для новых трубаправодаў ці трубаправодаў, якія падвергліся пераізаляцыі.

Літаратура

1. Глазков, В. И. Определение переходного сопротивления подземных металлических трубопроводов / В. И. Глазков, В. Г. Котик, Н. П. Глазов // Коррозия и защита в нефтедобывающей промышленности. – 1967. – № 5. – С. 29–34.
2. Иванов, В. Т. Влияние неоднородных участков изоляции на распределение тока при электрохимической защите металлов от коррозии / В. Т. Иванов, Ф. Г. Гадилова // Электрохимия, 1981. – Вып. 2. – Т. 17. – С. 321–325.
3. Александров, Ю. В. Разработка методологии эффективного предупреждения разрушения длительно эксплуатируемых газопроводных систем, подверженных стресс-коррозии : автореф. ... дис. д-ра техн. наук / Ю. В. Александров / Ухтин. гос. техн. ун-т. – Ухта, 2013. – 43 с.

УДК 621.38

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Ю. А. Козусев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Применена операция интегрирования сигнала для повышения точности измерения.

Ключевые слова: постоянная времени, интегрирование сигнала, помехозащищенность.

INCREASING THE IMMUNITY OF MEASURING TRANSDUCERS

Y. A. Kozusev

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Application of signal integration operation to improve measurement accuracy.

Keywords: time constant, signal integration, noise immunity.

Постоянная времени является основной частной динамической характеристикой различных датчиков и измерительных преобразователей с выходным сигналом постоянного тока. Постоянная времени может характеризовать динамические свойства не только инерционных звеньев первого порядка, но и объектов с передаточной функцией более высокого порядка с одной доминирующей постоянной времени, например термоэлектрических, сильнодемпфированных механоэлектрических, акустических или гидравлических преобразователей.

Рассмотрим случай гармонической помехи. Тогда контролируемый сигнал представляет собой суперпозицию

$$U(t) = U_{\text{уст}}(1 - e^{-t/T_x}) + U_m \sin(\omega t), \quad (1)$$

где U_m и ω – амплитуда и частота помехи.

На рис. 1 построены диаграммы сигналов при $T_x = 0,1$ с, $U_{\text{уст}} = 1$ В в условиях влияния помехи промышленной частоты $f = 50$ Гц с амплитудой $U_m = 0,1$ В. При некоррелированной помехе возникает имеющая случайный характер неопределенность сравнения сигнала с опорным уровнем, ограниченная интервалом Δt (рис. 1).

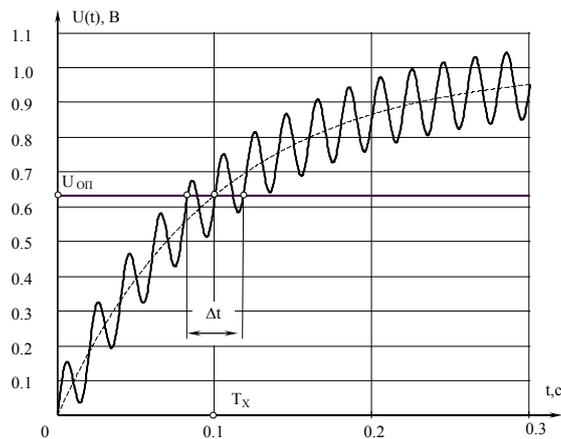


Рис. 1. Влияние помехи на результат измерения постоянной времени

Для уменьшения погрешности измерения предлагается следующий алгоритм: на вход объекта подается скачок напряжения, из выходного напряжения вычитается опорное напряжение, разность интегрируется. Результат измерения формируется в момент равенства нулю напряжения интегратора. Опорное напряжение выбирается из условия:

$$U_{\text{оп}} = \frac{m-1}{m} U_{\text{уст}}, \quad m > 1, \quad (2)$$

где m – коэффициент преобразования.

Временные диаграммы сигналов для $m = 5$, $T_{\text{и}} = T_{\text{х}}$ и $U_{\text{уст}} = 1$ В приведены на рис. 2.

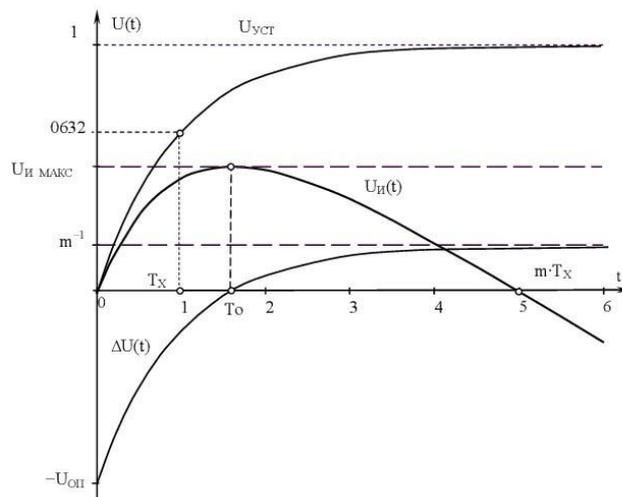


Рис. 2. Преобразование постоянной времени

Разность напряжений:

$$\Delta U(t) = U(t) - U_{\text{оп}} = U_{\text{уст}} \left(1 - e^{-t/T_x} - \frac{m-1}{m} \right) = U_{\text{уст}} \left(\frac{1}{m} - e^{-t/T_x} \right). \quad (3)$$

Результат интегрирования:

$$U_{\text{и}}(t) = -\frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t \Delta U(\xi) d\xi = -\frac{U_{\text{уст}}}{T_{\text{и}}} \int_0^t \left(\frac{1}{m} - e^{-\xi/T_x} \right) d\xi = -\frac{U_{\text{уст}}}{T_{\text{и}}} \left(\frac{t}{m} - T_x (1 - e^{-t/T_x}) \right). \quad (4)$$

Полагая $U_{\text{и}}(T) = 0$, находим результат преобразования:

$$T = mT_x (1 - e^{-T/T_x}). \quad (5)$$

Значение T получено в неявном виде. При $m > 1$ множитель в скобке стремится к единице, измеренная величина имеет вид:

$$T = mT_x (1 - \delta_m) \approx mT_x, \quad (6)$$

где $\delta_m = e^{-m}$ – относительная погрешность нелинейности, методическая погрешность.

С увеличением значения m методическая погрешность быстро уменьшается: $\delta_m(3) = 3\%$, $\delta_m(5) = 0,7\%$, $\delta_m(7) = 0,033\%$, при $m \geq 10$ пренебрежимо мала. Таким образом, для практических случаев методическая погрешность отсутствует, преобразование линейно.

При измерениях в микросекундном диапазоне при $m > 10$ дискретная составляющая погрешности может быть уменьшена более чем на порядок.

Операция интегрирования позволяет снизить влияние помехи. Результат интегрирования разности сигнала с помехой (1) и опорного уровня (2) имеет вид

$$\begin{aligned} U_{\text{и}}(t) &= -\frac{U_{\text{уст}}}{T_{\text{и}}} \left(\frac{t}{m} - T_x (1 - e^{-t/T_x}) \right) + \frac{U_m}{T_{\text{и}} \omega} \cos(\omega t) = \\ &= -\frac{U_{\text{уст}}}{T_{\text{и}}} \left(\frac{t}{m} - T_x (1 - e^{-t/T_x}) - \frac{U_m}{U_{\text{уст}} \omega} \cos(\omega t) \right) = -\frac{U_{\text{уст}}}{T_{\text{и}}} \left(\frac{t}{m} - T_x - \frac{\delta_{\text{п}}}{\omega} \cos(\omega t) \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Последнее слагаемое – абсолютная погрешность измерения T_x вследствие помехи, а так как $|\cos(\omega t)| \leq 1$, то оценки абсолютной и относительной погрешности:

$$\Delta_x \leq \frac{\delta_{\text{п}}}{\omega}; \quad (8)$$

$$\delta_x \leq \frac{\Delta_T}{T_x} = \frac{\delta_{\text{п}}}{\omega T_x}. \quad (9)$$

На рис. 3 построены графики сигналов.

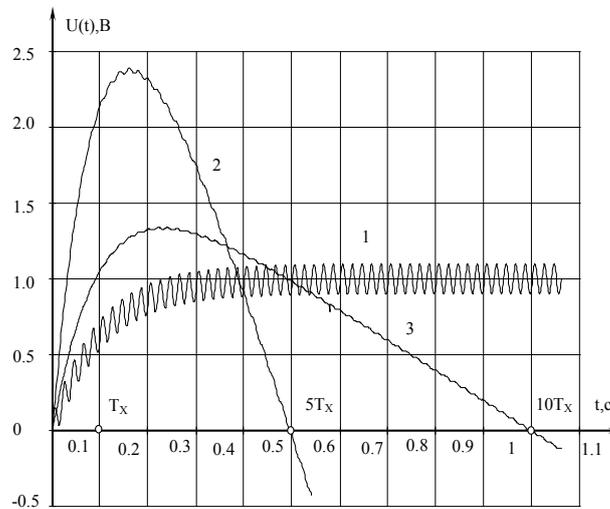


Рис. 3. Преобразование постоянной времени при наличии помехи:

- 1 – контролируемый сигнал; $T_X = 0,1$ с; $U_{уст} = 1$ В; $U_m = 0,1$ В;
 2 – результат преобразования; $m = 5$, $T_{И} = 0,02$ с;
 3 – результат преобразования; $m = 10$, $T_{И} = 0,05$ с

Операция интегрирования уменьшает влияние помехи в соответствии с (9), с ростом частоты помехи уменьшаются абсолютная и относительная погрешности измерения постоянной времени. Для принятых значений при частоте помехи $f = 50$ Гц и $\delta_{П} = 0,1$:

$$\delta_X \leq \frac{\delta_{П}}{\omega T_X} = \frac{\delta_{П}}{2\pi f T_X} = \frac{\delta_{П}}{10\pi} = 0,032\delta_{П} = 0,0032. \quad (10)$$

Ослабление влияния помехи обеспечивается для всех частот помехи, удовлетворяющих условию:

$$f > \frac{1}{2\pi T_X}. \quad (11)$$

Постоянная времени интегрирования $T_{И}$ не входит в результат преобразования, к точности и стабильности параметров интегратора не предъявляются высокие требования, что является достоинством способа преобразования T_X .

Применение операции интегрирования позволило разработать точные помехозащищенные преобразователи [1–4].

Литература

1. Устройство для измерения емкости конденсатора : пат. 19854 Респ. Беларусь на изобретение, МПК6 G 01R 27/26 / Козусев Ю. А., Кочешов Е. В. ; 28.02.2016 // Афіцыйны бюл. / Вынаходствы. Карысныя мадэлі. Прамысловыя ўзоры. – 2016. – № 1. – С. 124.
2. Способ определения постоянной времени переходного процесса и устройство для его осуществления: пат. 19865 Респ. Беларусь на изобретение, МПК6 G 01R 27/02 / Ю. А. Козусев ; 28.02.16 // Афіцыйны бюл. / Вынаходствы. Карысныя мадэлі. Прамысловыя ўзоры. – 2016. – № 1. – С. 122.

3. Способ определения постоянной времени переходного процесса и устройство для его осуществления : пат. 20066 Респ. Беларусь на изобретение, МПК6 G 01R 29/02 / Козусев Ю. А. ; 30.04.16 // Афіцыйны бюл. / Вынаходствы. Карысныя мадэлі. Прамысловыя ўзоры. – 2016. – № 2. – С. 115.
4. Способ определения постоянной времени переходного процесса и устройство для его осуществления : пат. 20094 Респ. Беларусь на изобретение, МПК6 G 01R 29/02 / Козусев Ю. А., Кухаренко С. Н. ; 30.04.16 // Афіцыйны бюл. / Вынаходствы. Карысныя мадэлі. Прамысловыя ўзоры. – 2016. – № 2. – С. 116.

УДК 62-50:62-529

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА SCILAB

Э. М. Виноградов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Рассмотрено использование программного пакета Scilab для анализа линейной системы автоматического управления.

Ключевые слова: пакет Scilab, система автоматического управления, передаточная функция, временные характеристики, частотные характеристики.

CONTROL SYSTEM ANALYSIS WITH A HELP OF SOFTWARE PACKAGE SCILAB

E. M. Vinogradov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The report considers usage of software package Scilab for analysis linear control system.

Keywords: linear control system, transfer function, time response functions, frequency functions.

В последнее время в учебных целях начал широко использоваться бесплатный, свободно распространяемый программный продукт *Scilab*, который предназначен для выполнения инженерных и научных вычислений. Последнюю версию пакета вместе с технической документацией на английском языке можно скачать с официального сайта программы – www.scilab.org. Следует отметить, что имеется очень мало русскоязычных руководств по *Scilab*, особенно по способам его применения для решения задач автоматического управления.

В инженерной практике наиболее часто используется представление системы автоматического управления в виде структурной схемы, состоящей из типовых динамических звеньев. Каждое звено описывается передаточной функцией. *Scilab* также позволяет использовать этот подход.

В пакете *Scilab* имеется функция *syslin()*, которая определяет линейное динамическое звено (или систему) по ее передаточной функции $W(s)$ следующим образом:

$$W = \text{syslin}('c', W(s)),$$

где параметр 'c' указывает, что система с непрерывным временем, а s – символьная переменная. Затем, используя обычные правила преобразования структурных схем, необходимо получить эквивалентную функцию всей системы управления.

В *Scilab* имеется функция $csim()$, с помощью которой можно рассчитать временные характеристики системы по ее передаточной функции. Функция $csim()$ вычисляет реакцию системы на определенные входные сигналы. Имеется два вида стандартных входных сигналов и соответственно два варианта функции $csim()$:

$$h = csim('step', t, W),$$

где $'step'$ – это входной единичный ступенчатый сигнал $1(t)$, а h – это переходная функция $h(t)$;

$$g = csim('impulse', t, W),$$

где $'impulse'$ – это входной бесконечный импульс $\delta(t)$ (единичная функция Дирака), а g – это импульсно-переходная функция $g(t)$.

В обоих случаях переменная t – это вектор, определяющий время вычисления функции, а W – передаточная функция системы, определяемая с помощью функции $syslin()$.

В пакете *Scilab* имеется несколько функций, с помощью которых можно вычислить и построить графики различных частотных характеристик линейных систем, заданных передаточными функциями. Наиболее часто используются следующие функции: $bode()$ – диаграмма Боде; $nyquist()$ – годограф Найквиста; $gainplot()$ – вычисляет и строит логарифмическую частотную характеристику; $phaseplot()$ – вычисляет и строит фазовую частотную характеристику.

В пакете *Scilab* имеется особая часть программ, называемая *Xcos*, которая позволяет осуществить визуальное математическое моделирование динамических систем различных объектов. Создавать модель в *Xcos* удобно непосредственно по структурной схеме системы управления. С помощью блочной модели можно исследовать поведение системы при различных видах сигналов: ступенчатым, импульсным, гармоническом.

Приведен пример исследования с помощью пакета *Scilab* системы автоматического управления (САУ), состоящей из трех линейных динамических звеньев. Структурная схема САУ приведена на рис. 1.

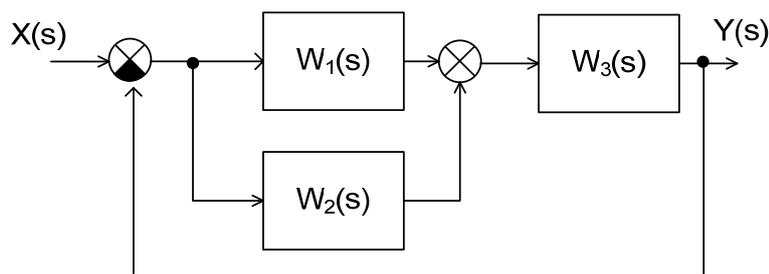


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического управления

Передаточные функции звеньев:

$$W_1(s) = 4; \quad W_2(s) = (0.05s + 1) / (0.1s + 1); \quad W_3(s) = 1 / s(0.5s + 1).$$

Требуется выполнить следующее:

1) преобразовать структурную схему и найти эквивалентную передаточную функцию САУ;

- 2) определить устойчивость САУ;
- 3) построить графики переходной и импульсно-переходной характеристик.

Для решения поставленных задач создадим несколько скрипт-файлов с помощью редактора *SciNotes*, входящего в пакет *Scilab*.

1. Текст скрипта для преобразования структурной схемы САУ и нахождения эквивалентной передаточной функции системы:

```
s = %s; // объявление символьной переменной
// определение передаточных функций отдельных звеньев
W1 = syslin('c', 4, 1);
W2 = syslin('c', 0.05*s + 1, 0.1*s + 1);
W3 = syslin('c', 1, s*(0.5*s + 1);
// преобразование структурной схемы
W12 = W1 + W2;
W123 = W12 * W3;
W = W123 / (1 + W123);
// эквивалентная передаточная функция САУ
disp("Передаточная функция САУ: W = ");
disp(W);
```

Результат выполнения скрипта имеет следующий вид:

Передаточная функция САУ: $W =$
 $(100 + 9s) / (100 + 29s + 12s^2 + s^3)$

2. Текст скрипта для вычисления корней характеристического уравнения САУ с целью определения устойчивости:

```
den = W.den; // вычисление знаменателя передаточной функции САУ
r = roots(den); // вычисление корней характеристического уравнения
disp("Корни характеристического уравнения САУ равны: ");
disp(r);
```

Результат выполнения скрипта имеет следующий вид:

Корни характеристического уравнения САУ равны:
-10.109902
-0.9450491 + 2.9996958i
-0.9450491 - 2.999698i

Все корни характеристического уравнения имеют отрицательные вещественные части, поэтому можно сделать вывод, что заданная САУ будет устойчивой.

3. Текст скрипта для построения графиков временных функций САУ:

```
t = 0 : 0.01 : 10; // диапазон времени и шаг
h = csim('step', t, W);
plot(t, h); // график функции h(t) в окне с номером 0
xtitle("Переходная характеристика h(t)", "Время, с", "Амплитуда");
xgrid(); // отобразить сетку
scf(1); // открыть новое графическое окно с номером 1
g = csim('impulse', t, W);
plot(t, g); // график функции g(t) в окне с номером 1
xtitle("Импульсно-переходная характеристика g(t)", "Время, с", "Амплитуда");
xgrid(); // отобразить сетку
```

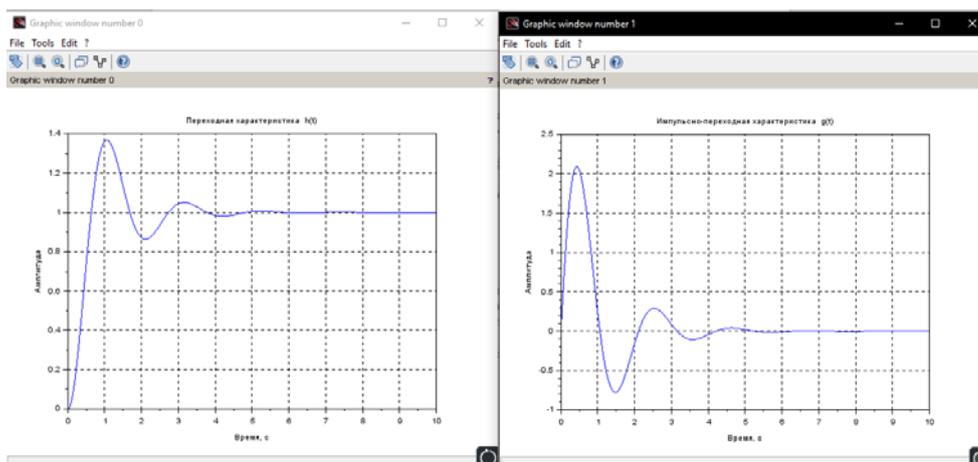


Рис. 2. Графики переходной и импульсно-переходной характеристик системы автоматического управления

Результат выполнения скрипта представлен на рис. 2.

УДК 531.746.088.2

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ УРОВНЯ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ГОРИЗОНТА, ПИТАЕМЫЙ ДУМЯ КРАТНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

В. А. Карпов, О. М. Ростокина, Ю. Е. Котова, А. В. Карпов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Рассмотрен способ питания электродов оси X электролитического чувствительного элемента напряжением с одной частотой, а оси Y – удвоенной частотой, с последующим фазочувствительным детектированием для разделения полезных составляющих информационных сигналов осей X и Y.

Ключевые слова: электролитический чувствительный элемент, питание кратными напряжениями, фазочувствительный детектор.

ELECTROLYTIC SENSITIVE ELEMENT OF THE LEVEL OF THE DEVELOPMENT FROM THE HORIZON, SUPPLIED WITH TWO MULTIPLE VOLTAGES

U. A. Karpau, V. M. Rastokina, Y. Y. Kotava, A. U. Karpau

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The report considers a method of powering the electrodes of the X axis of an electrolytic sensing element with a voltage with one frequency, and the Y axis with a double frequency, followed by phase-sensitive detection to separate the useful components of the information signals of the X and Y axes.

Keywords: electrolytic sensing element, multiple voltage supply, phase-sensitive detector.

Двухосевые электролитические чувствительные элементы (ЭЧЭ) используются в различных технических задачах. Однако в силу их конструктивных особенностей возникает необходимость реализовывать операцию измерения отклонения основа-

ния ЭЧЭ относительно горизонта одновременно для двух осей. Эквивалентная схема ЭЧЭ (рис. 1) содержит сопротивления столба электролита $R(1 \pm \delta_R)$ относительно оси X и $R(1 \pm \delta_r)$ относительно оси Y , эквивалентную поляризационную емкость C между соответствующими электродами, электроды ЭЧЭ – 1–5, причем 1, 5, 2 образуют ось X , а 3, 5, 4, соответственно, ось Y , электрод 5 – общий.

При отклонении от горизонта относительно соответствующих осей появляются относительные изменения δ_R и δ_r , характеризующие угол отклонения [1, 2]. Поскольку электрод 5 общий, появляются сложности выделения изменений δ_R и δ_r на общем электроде. В докладе рассмотрен способ разделения полезных составляющих, основанный на питании электродов оси X напряжением с одной частотой, а оси Y – удвоенной частотой, с последующим фазочувствительным детектированием.

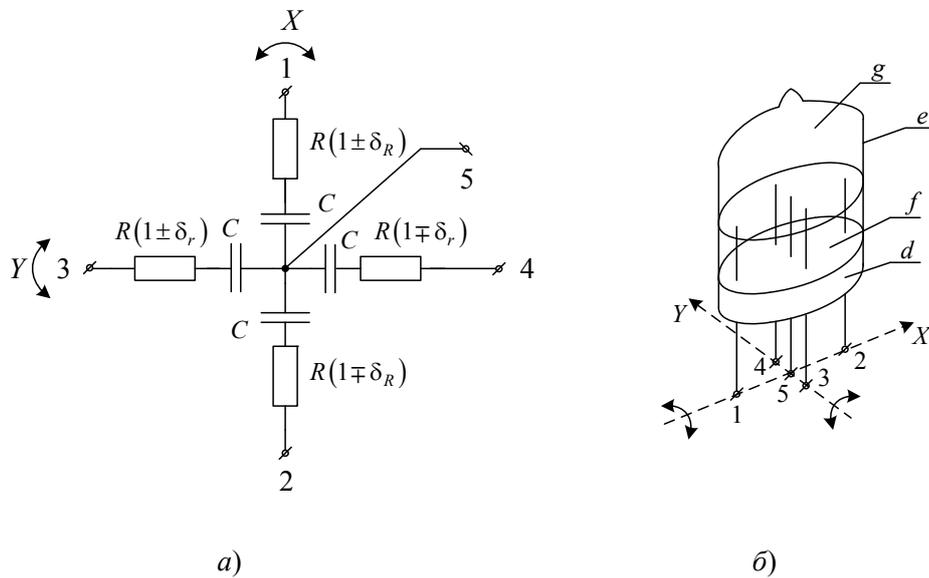


Рис. 1. Электролитический чувствительный элемент: а – эквивалентная схема; б – конструктивное устройство

Функциональная схема измерительного преобразователя дана на рис. 2, где УС – усилитель переменного напряжения, ФЧД_{X,Y} – фазочувствительные детекторы для осей X и Y , П_X, П_Y – перемножители, ФНЧ_X, ФНЧ_Y – фильтры нижних частот.

Напряжение на выходе усилителя представляет собой суммарный сигнал двух частот:

$$u = K_{yc} E_X \delta_R \sin \omega t + K_{yc} E_Y \delta_r \sin \omega 2t.$$

После перемножения напряжения u_X и u_Y имеют вид:

$$u_X = K_{yc} E_X \delta_R \cdot 0,5(1 - \cos 2\omega t) + K_{yc} E_Y \delta_r \cdot 0,5(\cos \omega t - \cos 4\omega t);$$

$$u_Y = K_{yc} E_X \delta_R \cdot 0,5(\cos \omega t - \cos 3\omega t) + K_{yc} E_Y \delta_r \cdot 0,5(1 - \cos 4\omega t).$$

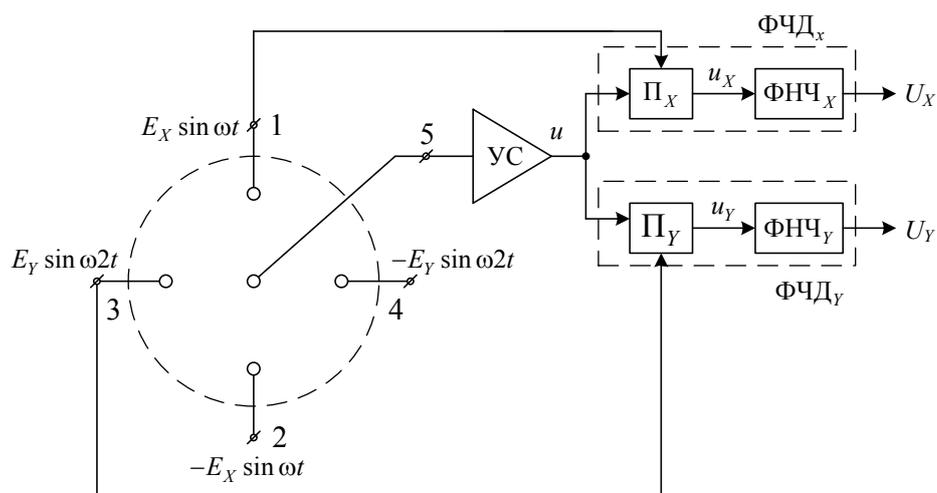


Рис. 2. Функциональная схема измерительного преобразователя для электролитического чувствительного элемента с двухчастотным питанием

После осреднения среднее значение переменной составляющей равно нулю, а коэффициент ее подавления определяется постоянной составляющей времени ФНЧ:

$$u_X = 0,5K_{yc}E_X\delta_R; \quad u_Y = 0,5K_{yc}E_Y\delta_r.$$

Литература

1. Измерительный преобразователь для двухосевого электролитического чувствительного элемента уровня на основе квадратурного питания / В. А. Карпов [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2021. – № 1. – С. 4–8.
2. Измерительный преобразователь для электролитического чувствительного элемента уровня с однополярным питанием / В. А. Карпов [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2021. – № 2. – С. 29–32.
3. Измерительный преобразователь для электролитического чувствительного элемента уровня с питанием общего электрода от источника переменного тока / В. А. Карпов [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2022. – № 1. – С. 7–10.

УДК 621.382

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЗАЩИТА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ КЛЮЧЕЙ ПРИ РАБОТЕ НА НИЗКООМНУЮ НАГРУЗКУ

А. В. Ковалев, Д. А. Литвинов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Рассмотрены структура и особенности работы интеллектуальных ключей на низкоомную работу. Предложен вариант дополнительной защиты ключей по температуре их корпуса с увеличенным гистерезисом включения и выключения их от нагрузки для обеспечения номинального температурного их режима работы при недостаточной площади теплоотвода.

Ключевые слова: интеллектуальный ключ, нагрузка, тепловая защита, статус.

ADDITIONAL PROTECTION OF INTELLIGENT KEYS WHEN WORKING ON A LOW-RESISTANCE LOAD**A. V. Kovalev, D. A. Litvinov***Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

The article considers the structure and features of the operation of smart switches for low-resistance operation. A variant of additional protection of keys according to the temperature of their case with an increased hysteresis of switching them on and off from the load is proposed to ensure their nominal temperature mode of operation with an insufficient heat sink area.

Keywords: Intelligent key, load, thermal protection, status.

В настоящее время в силовой автомобильной электронике массово используются ДМОП- или *DMOS*-транзисторы (от англ. *Double diffused MOS* – МОП-транзисторы, изготовленные методом двойной диффузии), оптимизированные для коммутации больших токов и предназначенные для работы при высоких напряжениях. Использование ДМОП-транзисторов требует комплектации их соответствующими драйверами и для снижения динамических потерь мощности быстро останавливающимися диодами. Основными недостатками дискретных ДМОП-транзисторов являются отсутствие внутренних защит от перегрузок по току и напряжению и необходимость построения внешних схем управления логикой работы ключей. Использование внешних защит не всегда эффективно, например, перегрев кристалла ДМОП-транзистора должен контролировать температурный датчик, расположенный на том же кристалле. Перегрузку по току лучше контролировать отводом тока от истока в соотношении, например, 1 : 5000. Для дискретного транзистора это приводит к появлению дополнительного вывода.

Для уменьшения дополнительных выводов и компонентов обвязки такие ведущие полупроводниковые компании, как Infineon (Siemens), STMicroelectronics, Philips, Motorola, Fuji Electric, International Rectifier, проделали большую работу и достигли значительных успехов в замене дискретных ДМОП-транзисторов интеллектуальными силовыми ключами (ИСК) на напряжения 12, 24 и 42 В [1–5]. Одним из преимуществ ИСК является возможность управление ключами непосредственно от логических схем, что позволяет отказаться от дополнительных драйверов ДМОП-транзисторов. В настоящее время сфера применения ИСК расширяется, затрагивая в первую очередь те направления, где нужна повышенная надежность. Это относится прежде всего к военной технике, авиации, транспорту, связи и т. д.

Интеллектуальные силовые ключи можно разделить на три группы:

- интеллектуальные ключи нижнего уровня;
- интеллектуальные ключи верхнего уровня;
- интеллектуальные ключи верхнего уровня с программируемой отсечкой тока.

У интеллектуальных ключей нижнего уровня исток соединяется с общим силовым проводом, нагрузка подключается между стоком и шиной питания. Использование входа управления для диагностики корректности режимов работы ключа позволяет обойтись всего тремя выводами корпуса. Низкое количество выводов корпуса и простота схемы интеллектуальных ключей нижнего уровня позволяют снизить цену этих приборов.

Чаще всего в автомобильной электронике нагрузка подключается к общему силовому проводу («массе»). В этих случаях управлять нагрузкой удобно с помощью интеллектуальных ключей верхнего уровня. Интеллектуальные ключи верхнего

уровня как правило имеют пять выводов на один канал (вход основной, вход диагностики, общий цифровой, вывод для подключения питания и выход). Дополнительный вход диагностики DG (diagnostics) или ST (status) позволяет контролировать состояние ключа во время работы и при включении. Большинство ИСК верхнего уровня способны определить обрыв (отключение) нагрузки, короткое замыкание выхода на общий провод или на шину питания, а также перегрев кристалла.

Интеллектуальные ключи верхнего уровня с программируемой отсечкой тока позволяют разработчику устанавливать нужный ток ограничения при перегрузке, выбирая номинал резистора R_{fb} ($fb = \text{feedback}$ – обратная связь). При этом не требуются низкоомные прецизионные резисторы для датчика тока в выходной цепи. Ключи этого типа, как правило, выпускаются в корпусах TO-220-5 и D2Pak-5. При срабатывании защиты (при перегреве или перегрузке по току) выходной транзистор выключается независимо от состояния ключа в данный момент времени. Минимальное значение тока отсечки составляет около 10 % от максимального уровня. Ключи также имеют активное ограничение тока, защиту от обратного включения источника питания, защиту от перегрева и от статического электричества.

В ИСК с программируемой отсечкой тока может быть реализована улучшенная функция защиты от перегрева под названием WAIT (ожидание, задержка включения). При отсутствии функции WAIT температура кристалла может превысить максимально допустимое значение и достичь теплового пробоя. Функция WAIT, реализованная с помощью таймера и логических элементов обеспечивает задержку перезапуска ключа. Таким образом, транзистор получает дополнительное время на остывание, что исключает тепловое разрушение кристалла интеллектуального ключа.

Для минимизации размеров и снижения стоимости готовых изделий для автомобильной электроники разработчики стараются применять более дешевые ИСК верхнего уровня без программируемой отсечки по току, уменьшить размеры платы и снизить материалоемкость. Это приводит к тому, что приходится уменьшать площадь теплоотвода ИСК убирая радиатор или уменьшая площадку для монтажа ключа. В номинальном режиме работы ИСК работа будет обеспечена интеллектуальностью компонентов ключа, однако в аварийном режиме работы на низкоомную нагрузку (режим короткого замыкания (КЗ)) несоблюдение рекомендованных производителем площадей теплоотвода приведет к недопустимому перегреву ИСК. На практике бывали случаи, когда ИСК от перегрева отпаивался от контактных площадок и смещался с места исходного монтажа на плате.

Вторая проблема при использовании ИСК верхнего уровня заключается в необходимости использовать дополнительный вход микроконтроллера для анализа статусного выхода ключа, чтобы иметь возможность программной блокировки работы ключа в аварийном режиме.

Третья проблема заключается в том, что производитель ИСК для удешевления продукции не выводит наружу статусный выход ключа, например, ключ BTS462T [6] и разработчик не имеет возможности использовать интеллектуальность ключа для программной блокировки работы в аварийном режиме. Для решения приведенных проблем было разработано и испытано бюджетное решение в виде дополнительной защиты от перегрева кристалла ИСК, которое базируется на температурной зависимости рп-перехода полупроводникового диода. Схемная реализация многоканальной защиты и ее реализация представлены на рис. 1.

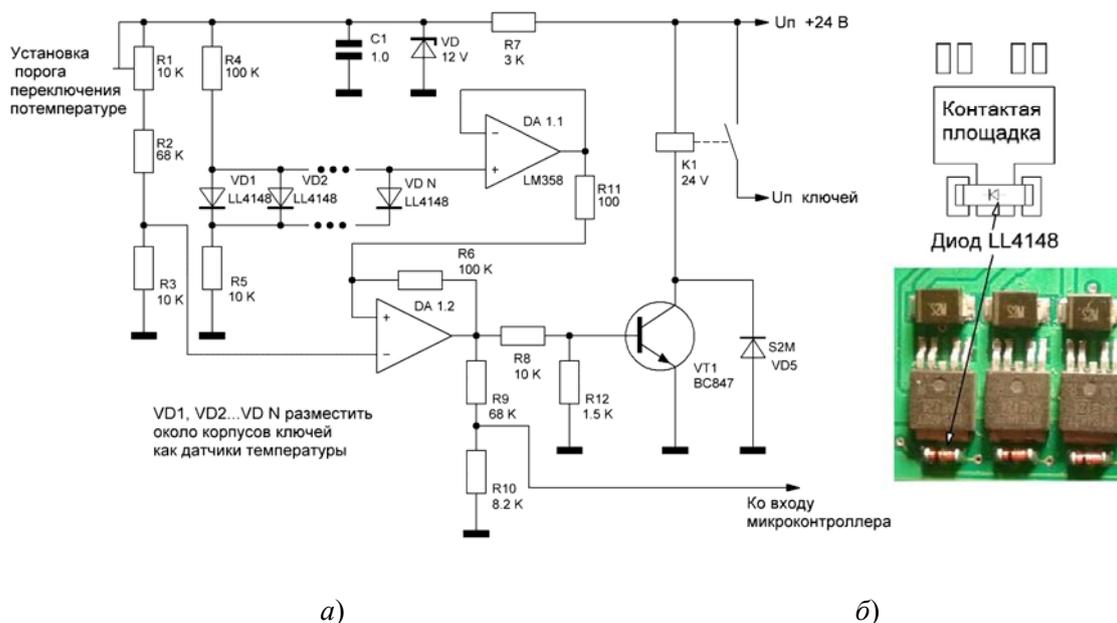


Рис. 1. Схемная реализация многоканальной защиты: а – тепловой защиты ключей; б – вариант практической реализации

Температурный датчик в виде SMD диода LL4148 располагается над площадкой из медной дорожки, которая связана с контактной площадкой корпуса ключа.

Разработчик может использовать схему в двух вариантах: режим аппаратной защиты и режим аппаратно-программной защиты.

В первом случае по выходному сигналу схемы можно отключать внешний коммутационный элемент подачи силового питания на ИСК. После того как ключ остынет до настроенной температуры, подача питания будет снова восстановлена. Резистором R1 настраивается порог срабатывания защиты и соответственно постоянная времени «отдыха» ключа.

Во втором случае можно использовать выходной сигнал схемы для группового или выборочного анализа работы ключей с использованием одного из входов микроконтроллера, что позволит обеспечить более гибкий алгоритм работы дополнительной защиты ИСК.

Литература

1. Dunn, W. C. Driving and Protection of High Side NMOS Power Switches / W. C. Dunn // IEEE Transaction on Industry Application. – 1992. – Vol. 28, № 1.
2. Pribyl, W. Integrated Smart Power Circuits Technology, Design and Application / W. Pribyl // Siemens Entwicklungszentrum für Mikroelektronik GmbH.
3. Cost Effective Smart Power Technology for 45V Application / A. Marty-Blavier [et al.] // European Solid-State Device Research Conf, 1995.
4. High-Side Intelligent Power Switch Technology / T. Morimoto [et al.] // Fuji Electric Review. 1994. – Vol. 40, № 4.
5. A Self-Isolated CDMOS Technology for the Integration of Multi-Channel Surge Protection Circuits / K. Yoshida [et al.] // Power Semiconductor Devices and ICs. IEEE 15th International Symposium, 2003.
6. Режим доступа: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTS462T-DS-v01_01-EN.pdf. – Дата доступа: 10.09.2022.

УДК 531.746.088.2

ПОГРЕШНОСТИ ОСРЕДНЕНИЯ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНО МОДУЛИРОВАННЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

В. А. Карпов, О. М. Ростоккина, Ю. Е. Котова, А. В. Карпов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Показана зависимость погрешности осреднения широтно-импульсно модулированной последовательности напряжения от постоянных времени заряда и разряда конденсатора С фильтра нижних частот.

Ключевые слова: погрешность осреднения, ШИМ-последовательность, фильтр нижних частот.

ERRORS OF AVERAGING PULSE-WIDTH MODULATED VOLTAGE SEQUENCES

U. A. Karpau, V. M. Rastokina, Y. Y. Kotava, A. U. Karpau

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The report shows the dependence of the pulse-width modulated voltage sequence averaging error on the charge and discharge time constants of the low-pass filter capacitor C.

Keywords: averaging error, PWM-sequence, low-pass filter.

Операция осреднения широтно-импульсно модулированного (ШИМ) напряжения широко используется в измерительной и преобразовательной технике. Например, в микроконтроллерах цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) реализованы в виде ШИМ-выходов по напряжению, гальваническое разделение зачастую использует ШИМ-последовательности напряжения и т. д. Полезное напряжение ШИМ-последовательности – среднее напряжение, которое определяется как $U \approx E \frac{t_{\text{н}}}{T}$, где E – опорное напряжение; $t_{\text{н}}$, T – длительность и период ШИМ-последовательности. В качестве осредняющего устройства в простейшем случае используется RC -фильтр нижних частот (ФНЧ). Осреднение реализуется в соответствии с представленным выражением, если постоянные времени заряда и разряда конденсатора C ФНЧ идентичны, однако это реализуется не всегда. Так, выходное сопротивление портов микроконтроллеров, работающих в режиме ЦАП, значительно разнится в зависимости от состояния, т. е. сопротивления ключей верхнего и нижнего уровней в замкнутом состоянии не идентичны (типовые значения 70/300 Ом). Это ведет к изменению постоянных времени заряда и разряда конденсатора C ФНЧ и, как показано, к погрешности осреднения σ , которая выглядит следующим образом:

$$\sigma = \frac{\tau_{\text{н}} - \tau_{\text{п}}}{T} \frac{\left(1 - e^{-\frac{t_{\text{н}}}{\tau_{\text{н}}}}\right) \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{п}}}{\tau_{\text{п}}}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_{\text{н}}}{\tau_{\text{н}}} - \frac{t_{\text{п}}}{\tau_{\text{п}}}}},$$

где $\tau_{и}$, $\tau_{п}$ – постоянные времени заряда и разряда конденсатора ФНЧ; $t_{и}$, $t_{п}$ – длительности импульса и паузы, $t_{и} = T - t_{п}$; σ – приведенная погрешность осреднения, $\sigma = \frac{\Delta U}{E}$, где ΔU – абсолютная погрешность осреднения.

Следует отметить, что σ принимает максимальное значение при условии $\tau_{и}, \tau_{п} > T$, $t_{и} > \frac{T}{2}$ и составляет $\sigma = 0,5\delta$, где δ – относительный разброс постоянных времени $\tau_{и}$ и $\tau_{п}$.

Относительный разброс постоянных времени $\tau_{и}$ и $\tau_{п}$ δ может быть уменьшен до приемлемых уровней путем увеличения значений или R и/или C ФНЧ, однако это ведет к снижению быстродействия ФНЧ, т. е. к уменьшению быстродействия операции осреднения, что не всегда является допустимым.

Полученные количественные соотношения позволяют находить компромисс между погрешностью и быстродействием операции осреднения при заданных неравенствах постоянных времени $\tau_{и}$ и $\tau_{п}$, т. е. при заданных разбросах в сопротивлении открытого состояния ключей верхнего и нижнего уровней источника ШИМ-последовательностей напряжений.

Литература

1. Карпов, В. А. Анализ инструментальной погрешности двухосевого электролитического инклинометра. / В. А. Карпов, О. М. Ростокина, А. В. Карпов // Вестн. Гомел. гос. ун-та им. П. О. Сухого. – 2017. – № 1. – С. 77–80.
2. Анализ методической погрешности двухосевого электролитического инклинометра / В. А. Карпов [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2018. – № 2. – С. 35–38.

УДК 621.38

КОНТРОЛЛЕР МЫШИ С УПРАВЛЕНИЕМ ЖЕСТАМИ

Д. А. Литвинов, А. В. Ковалев, А. В. Лашкевич

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Организация бесконтактного интерфейса человека с компьютером с помощью жестов.

Ключевые слова: человеко-компьютерное взаимодействие, управление жестами, контроллер мыши.

MOUSE CONTROLLER WITH MOTION CONTROL

D. A. Litvinov, A. V. Kovalev, A. V. Lashkevich

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Organization of contactless human-computer interface using motion.

Keywords: human-computer interaction, motion control, mouse controller.

Будущее информационно-коммуникационных технологий, как правило, связывают с ростом производительности вычислительных систем, совершенствованием каналов связи, а также с расширением функциональности приложений и операционных систем. Однако углубленный анализ эффектов технологического развития дает основание полагать, что ключевую роль в формирующейся экосистеме тотального

пользования компьютерами будут играть в первую очередь новые средства взаимодействия человека и компьютера [1].

Человеко-компьютерное взаимодействие (*human-computer interaction, HCI*) – это область компьютерных наук, дисциплина, занимающаяся проектированием и оценкой интерактивных вычислительных систем для использования человеком, а также изучением происходящих процессов. Основной задачей человеко-компьютерного взаимодействия является улучшение взаимодействия между человеком и компьютером, делая компьютеры более удобными и восприимчивыми к потребностям пользователей. В качестве основных факторов, влияющих на разработку человеко-компьютерного взаимодействия, выступают специфика деятельности пользователя и организация «дружественного» интерфейса.

Исследования в области человеко-компьютерного взаимодействия опираются на все более полную и сложную модель человека (оператор – пользователь – личность с уникальным опытом), а поэтому методы юзабилити-исследований будут совершенствоваться и представлять актуальный предмет исследований [2].

Человеко-компьютерное взаимодействие расширилось от настольных офисных приложений до включения в себя игр, обучения, образования, торговли, здравоохранения и медицинских приложений и прочее. Все системы для организации *HCI* можно разделить на контактные и бесконтактные. Во первых, управление компьютером осуществляется непосредственным указанием своих действий, с использованием дополнительных устройств – мышь, тачпад, тачскрин и др. Во-вторых, в качестве *HCI* используется бесконтактное управление с помощью голоса, жестов рук или других частей тела человека.

Распознавание жестов тесно связано с понятием отслеживания. Обычно отслеживание рассматривается как процесс поиска временных соответствий между кадрами. Применительно к отслеживанию жестов, алгоритм распознавания связывает идентифицированный жест в предыдущих кадрах с текущим фреймом (рис. 1). Что касается статических жестов, которые могут быть представлены одним кадром, их отслеживание не требуется.



Рис. 1. Функциональная схема алгоритма отслеживания жестов

Классификация подходов к отслеживанию жестов:

- единичная гипотеза – быстрый и простой алгоритм. Подходит для отслеживания одного жеста в контролируемой среде;
- множественные гипотезы – возможность отслеживания нескольких целей одновременно. Подходит для отслеживания нескольких жестов в контролируемой среде;

– расширенная модель трекинга – целевая история сохраняется и доступна для целевой оценки. Подходит для долговременного отслеживания жестов;

– отслеживание путем обнаружения – алгоритм обучения повышает надежность и снижает уровень шума. Этот комбинированный подход имеет предпочтительную производительность в тестах. Подходит для отслеживания жестов в сложной среде.

Классификация жестов – это последний и самый важный шаг в распознавании жестов. Большинство человеческих жестов – это динамические жесты. Один динамический жест всегда состоит из нескольких кадров. Чтобы классифицировать динамические жесты, классификация жестов должна выполняться после или вместе с их отслеживанием.

В статье представлена разработка контроллера мыши с управлением жестами. Для организации взаимодействия человека с компьютером в устройстве предлагается использовать камеру для отслеживания жестов рук и действий пальцами. Основной задачей предлагаемой системы является выполнение функций указателя компьютерной мыши и функции тачпада.

Электронный модуль выполнен на основе одноплатного миникомпьютера *Raspberry Pi Zero W* (размер 67 x 30 мм). Модуль построен на основе *ARM* процессор *Broadcom BCM2835* с ядром *ARM1176JZ* и тактовой частотой 1 ГГц. *BCM2835* включает в себя графический сопроцессор *Broadcom VideoCore IV* с поддержкой *Open GL*. Миникомпьютер имеет 512 МВ оперативной памяти, и поддерживает следующие интерфейсы: *Wi-Fi 802.11 b/g/n*, *Bluetooth 4.1* и *Bluetooth (BLE)*, а также *CSI*-интерфейс для подключения камеры.

Для слежения за жестами в устройстве используется цветная цифровая камера *Omnivision 5647*, с *CSI*-интерфейсом. Она позволяет захватывать изображения с разрешением 5 Мп и записывать видео *HD*-качества 1080 p со скоростью 30 кадров в секунду.

Алгоритм работы программы основан на слежении за ключевыми ориентирами ладони. Для решения данной задачи используется метод создания ориентиров, называемых *landmarks* (рис. 2), с их последующим анализом. Система на кадрах изображений, поступающих от видеокamеры, распознает ладонь человека, фиксируют ключевые точки, их координаты и отслеживает перемещение ориентиров, интерпретируя жесты.

Для его программной реализации проекта используется библиотека алгоритмов обработки изображений и компьютерного зрения – *OpenCV* и фреймворк *MediaPipe*. *OpenCV* – это библиотека программного обеспечения для компьютерного зрения и машинного обучения с открытым исходным кодом. *OpenCV* был создан, чтобы обеспечить общую инфраструктуру для приложений компьютерного зрения и ускорить использование машинного восприятия в коммерческих продуктах.

MediaPipe – это кроссплатформенная платформа машинного обучения с открытым исходным кодом, используемая для построения систем машинного обучения. Одним из основных применений фреймворка является обнаружение лица и рук и извлечение ключевых точек для передачи в модель компьютерного зрения.

Проект реализован на языке программирования *Python*, с использованием библиотеки *Pynput*, которая реализует *API* для управления мышью.



Рис. 2. Пример отображения ориентиров ладони

На рис. 3 представлен результат работы контроллера мыши. На картинках отображены жесты с нанесенными ориентирами для действий, интерпретируемых как щелчок левой (картинка слева) и правой кнопками мыши.

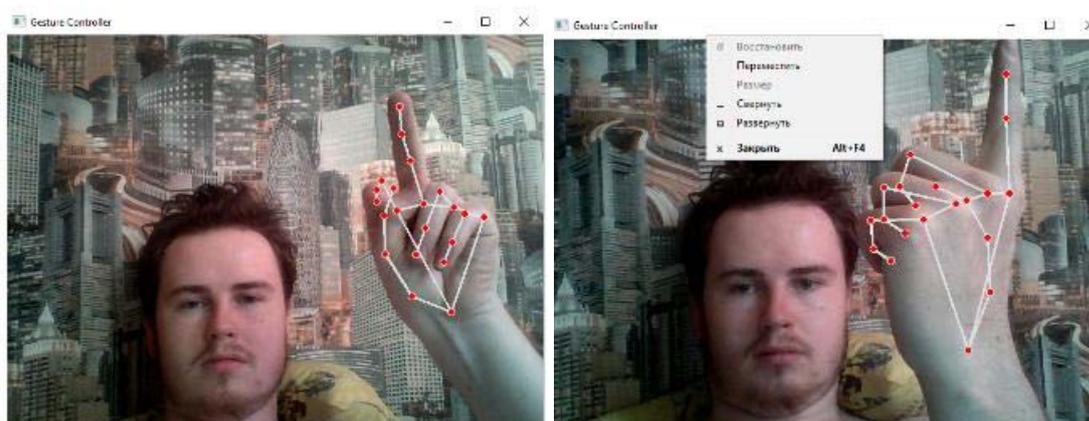


Рис. 3. Жесты, интерпретируемые как щелчок левой (слева) и правой кнопками мыши

Контроллер позволяет управлять курсором мыши с помощью жестов и выполняются следующие команды: перемещение курсора по экрану компьютера, щелчок правой и левой кнопкой мыши, скроллинг вниз–вверх, захват и перемещение объектов. При необходимости устройство может быть дополнено другими жестами.

Разработанные алгоритмы управления на основе жестов могут быть использованы как в отдельном устройстве, подключаемом к компьютеру по *Wi-Fi* или *Bluetooth* интерфейсу, так и на персональном компьютере с камерой или ноутбуке.

Литература

1. Ахметов, К. Взаимодействие человека и компьютера: тенденции, исследования, будущее / К. Ахметов // Форсайт. – 2013. – Т. 7, № 2. – С. 58–68.
2. Компаниец, В. С. Проектирование и юзабилити-исследование пользовательских интерфейсов : учеб. пособие / В. С. Компаниец, А. Е. Лызь. – Ростов н/Д. : ЮФУ. – 2020. – 107 с.
3. Кэлер, А. Изучаем OpenCV 3 / А. Кэлер, Г. Брэдски. – М. : ДМК-Пресс, 2017. – 826 с.

УДК 621.3.07:621.314.58

БЛОК СІЛКАВАННЯ КІРАВАНГА ПЕРАЎТВАРАЛЬНІКА ЧАСТАТЫ ДЛЯ АСІНХРОННЫХ РУХАВІКОЎ

Ю. В. Крышнеў, А. Я. Запольскі

*Установа адукацыі «Гомельскі дзяржаўны тэхнічны
ўніверсітэт імя П. В. Сухого», Рэспубліка Беларусь*

Разгледжаны блок сілкавання для кіраванага пераўтваральніка частаты для мала-магутных асінхронных рухавікоў. Дадзеная прылада ўяўляе з сябе зваротнаходавы пераўтваральнік на базе кантролера UC3842B. З'яўляючыся складовай часткай сілавога модуля, яна забяспечвае якаснае сілкаванне яго драйвераў, а таксама можа быць выкарыстана для сілкавання знешніх дадатковых сістэм кіравання.

Ключавыя словы: зваротнаходавы пераўтваральнік, блок сілкавання, шыротна-імпульсная мадуляцыя, ШІМ, асінхронны рухавік, пераўтваральнік частаты.

THE POWER SUPPLY OF THE CONTROLLED FREQUENCY CONVERTER FOR ASYNCHRONOUS MOTORS

Y. V. Kryshneu, A. Y. Zapolski

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The report considers a power supply for a controlled frequency converter for low-power asynchronous motors. This device is a flyback converter based on the UC3842B controller. Being an integral part of the power module, it provides high-quality power to its drivers, and can also be used to power external additional control systems.

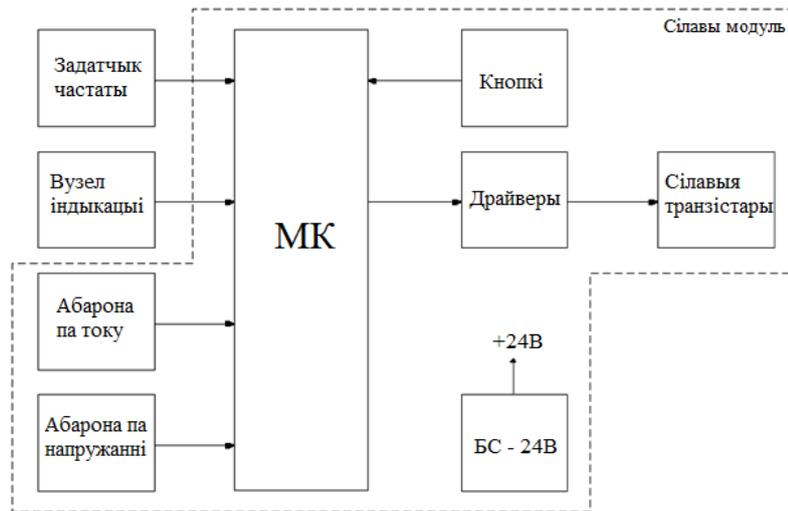
Keywords: flyback converter, power supply, pulse width modulation, PWM, asynchronous motor, frequency converter.

Пераўтваральнік частаты з'яўляецца асновай электрычнага прывада, які дазваляе рабіць плаўны пуск асінхронных рухавікоў з рэгуляваннем частаты і напрамку кручэння вала праз змяненне частаты напружання пераменнага току 50 або 60 Гц у частату ад 1 да 800 Гц.

Пераўтваральнік *Innodriver-X* адпавядае наступным характарыстыкам:

- 1) уваходнае напружанне – аднафазнае, 220 В, 50 Гц; выходнае напружанне – трохфазнае, 220 В, 75 Гц;
- 2) магчымасць рэгулявання частаты ад 1 да 75 Гц з крокам 0,5 Гц;
- 3) падтрымка асінхронных рухавікоў магутнасцю да 4 кВт;
- 4) наяўнасць індывідуальнай сістэмы кіравання;
- 5) магчымасць задання напрамку кручэння вала рухавіка;
- 6) магчымасць задання параметраў работы пераўтваральніка з захаваннем у энерганезалежнай памяці;
- 7) наяўнасць абарон па напружанні і току;
- 8) скалярны спосаб кіравання рухавіком;
- 9) лінейная залежнасць U/f з узвышэннем напружання на нізкай частаце;
- 10) больш поўнае выкарыстанне сілкавальнага напружання пры намінальнай частаце.

Структурна схему пераўтваральніка можна падзяліць на 3 элементы: сілавы модуль з блокам сілкавання, задатчык частаты і вузел індывідуальнасці. Сілавы модуль уключае абароны па току і напружанні. Структурная схема пераўтваральніка паказана на мал. 1 [1].



Мал. 1. Структурная схема пераўтваральніка *Innodriver-X* аднафазнай сеткі ў трохфазную для маламагутных асінхронных рухавікоў

Блок сілкавання для пераўтваральніка частаты павінен адказаць наступным параметрам:

- 1) уваходнае напружанне сілкавання ў дыяпазоне ад 150 да 450 В;
- 2) выходнае напружанне – стабілізаванае, 24 В з хібнасцю не больш, чым 5 %;
- 3) выходны ток – не менш за 1 А;
- 4) наяўнасць гальванічнай развязкі ўваходнага і выходнага напружанняў;
- 5) магчымасць выдачы стабільнага выходнага напружання без паніжэння на працягу 2 с пасля аварыйнага адключэння сілкавальнага напружання.

Схемная рэалізацыя блока сілкавання *Alyona-BS* уяўляе з сябе зваротнаходавы пераўтваральнік (*flyback*-канвертар) на базе ШІМ-кантролера *UC3842B* (аналагам кантролера з’яўляецца мікрасхема *1114EV7*).

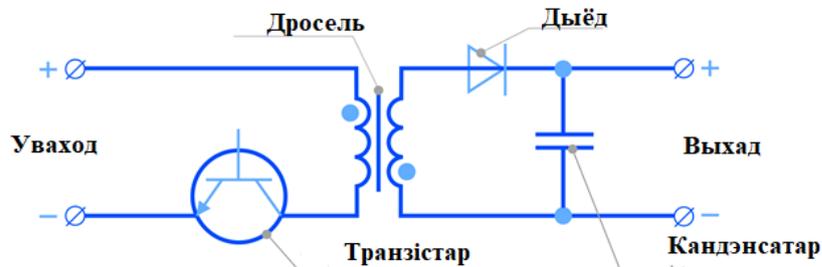
Ужыванне дадзенай схемы пераўтваральніка ў якасці маламагутнай крыніцы сілкавання мае наступныя плюсы: прастата і таннасць вырабу; малая колькасць элементаў і адсутнасць дроселя, магчымасць рэалізацыі крыніц сілкавання з некалькімі гальванічна развязанымі выходамі, звязанымі напружаннямі выходных абмотак; практычная адсутнасць адчувальнасці да кароткага замыкання на выхадзе крыніцы; магчымасць працаваць на ёмістную нагрузку.

Flyback-пераўтваральнікі падыходзяць для рэалізацыі маламагутных крыніц сілкавання магутнасцю да 50 Вт.

Асновай іх функцыянавання з’яўляецца працэс назапашвання энергіі ў індуктыўнасці першаснай абмоткі з наступнай стадыяй перадачы энергіі на нагрузку. Так, калі ўваходны транзістар замкнуты, на індуктыўнасці адбываецца працэс назапашвання энергіі, а калі ён разомкнуты, то ток праз першасную абмотку перастае ісці, а магнітная энергія на індуктыўнасці стварае ток на другаснай абмотке. Дыёд другаснай абмоткі таксама адкрыецца і адбудзецца працэс назапашвання электрычнай энергіі на кандэнсатары. Гэтая энергія (электрычны зарад) і будзе сілкаваць выходную нагрузку. Стадыі назапашвання энергіі ў магнітаправодзе і перадачы энергіі ў нагрузку падзелены па часе, таму трансфарматар выконвае ролю індуктыўнасці з мінімум 2 абмоткамі.

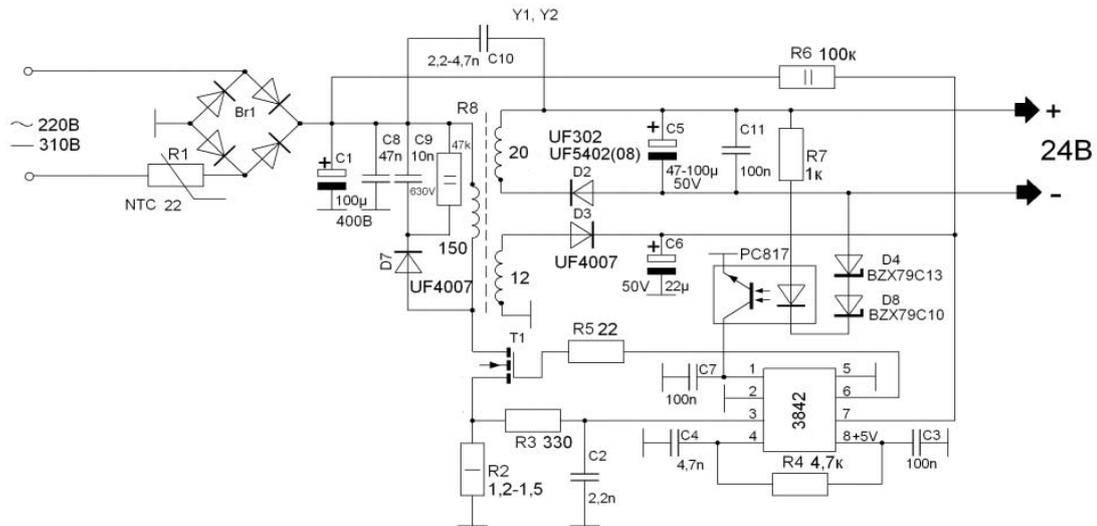
Тыповая схема імпульснага блока ўключае у сябе 4 асноўныя элементы: транзістар, назапашвальны дросель, кандэнсатар і дыёд [2].

Схема электрычная прынцыповая тыповага *flyback*-блока сілкавання паказана на мал. 2.



Мал. 2. Схема тыповага *flyback*-блока сілкавання

Дросель выкананы на Ш-падобным стрыжні *EPCOS* 20-10-6, асновай якога з’яўляецца ферыт маркі N87 з немагнітным зазорам 0,5 мм. Першасная абмотка выканана з провадам маркі ПЭТВ-2 с дыяметрам 0,2 мм з ізаляцыяй паміж сляямі. Другасная абмотка выканана провадам маркі ПЭТВ-2 з дыяметрам 0,5 мм. Паміж абмоткамі знаходзіцца лакатканіна.



Мал. 3. Схема электрычная прынцыповая блока сілкавання *Alyona-BS*

Блок сілкавання *Alyona-BS* для пераўтваральніка частаты паказаны на мал. 3.

Літаратура

1. Запольскі, А. Я. Эксперыментальны ўзор кіраванага пераўтваральніка аднафазнай сеткі ў трохфазную для асінхронных рухавікоў / А. Я. Запольскі, Ю. В. Крышнеў // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXI Международн. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 22–23 апр. 2021 г. В 2 ч. Ч. 2 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – С. 10–13.

2. Импульсные преобразователи: flyback. Обратноходовый преобразователь. – Режим доступа: <https://bast.ru/articles/impulsnie-preobrazovateli-flyback-obratnohodovoi-preobrazovatel>. – Дата доступа: 15.09.2022.
3. Сердечник Ш-образный E20/10/6 (EF 20) № 87. Документация. – Режим доступа: <https://www.belchip.by/sitedocs/17145.pdf>. – Дата доступа: 17.09.2022.

УДК 62-503.55

ПАРАЎНАЛЬНА-СУПАСТАЎЛЯЛЬНЫ АНАЛІЗ АСНОЎНЫХ МОЎ ПРАГРАМАВАННЯ ЛАГІЧНЫХ КАНТРОЛЕРАЎ

А. Я. Запольскі, Ю. В. Крышнеў, А. В. Ковалеў, Ю. Я. Котава

*Установа адукацыі «Гомельскі дзяржаўны тэхнічны
ўніверсітэт імя П. В. Сухого», Рэспубліка Беларусь*

Разгледжаны асноўныя мовы праграмавання лагічных кантролераў міжнароднага стандарту МЭК 61131 і зроблены іх параўнальна – супастаўляльны аналіз.

Ключавыя словы: праграмуемы лагічны кантролер, стандарт МЭК 61131, графічная мова, рэлейна-кантактная схема, тэкставая мова праграмавання нізкага ўзроўню, высокаўзроўневая графічная мова праграмавання, SCADA-сістэма, HMI-сістэма.

COMPARATIVE ANALYSIS THE MAIN PROGRAMMING LANGUAGES OF THE PLC

A. Y. Zapolski, Y. V. Kryshneu, A. V. Kavaleu, Y. Y. Kotava

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The report examines the main PLC programming languages of the international standard and makes a comparative analysis of them.

Keywords: programmable logic controller, IEC 61131 standard, graphic language, relay contact diagram, low-level text programming language, high-level graphic programming language, SCADA system, HMI system.

Праграмуемы лагічны кантролер (ПЛК) – спецыяльная разнавіднасць электроннай вылічальнай машыны, якая выкарыстоўваецца для аўтаматызацыі тэхналагічных працэсаў, у сістэмах аўтаматызацыі жылых памяшканняў, робата-тэхніцы. Праграмнае забеспячэнне (ПЗ) сучасных ПЛК з убудаванай аперацыйнай сістэмай (АС) можа быць распрацавана як з выкарыстаннем традыцыйных моў (C, Pascal), так і з ужываннем спецыялізаваных. Традыцыйная тэхналогія патрабуе ад распрацоўніка ведаў не толькі ў галіне алгарытмічных моў праграмавання, але і асаблівасцяў АС, апаратных магчымасцяў дадзенага ПЛК і арганізацыі сістэмы ўводу-вываду. А распрацаванае ПЗ будзе прывязана толькі да дадзенага тыпу ПЛК і не можа быць перанесена на іншую апаратна-праграмную платформу. Спецыяльныя стандартызаваныя платформа-незалежныя мовы праграмавання ПЛК могуць быць ужыты для розных тыпаў ПЛК. Да спецыяльных моў праграмавання, рэгламентаваных стандартамі МЭК 61131 (*IEC 61131, EN 61131*) адносяцца: графічныя мовы *FBD, LD, SFC* і тэкставыя *ST*, а таксама іх адгалінаванні [1, 2].

Мова рэлейных або лесвічных дыяграм *LD (Ladder Diagram, LAD)* – графічная мова стандарту МЭК-61131 для праграмавання ПЛК. Як такой, мова рэлейных схем існавала яшчэ ў часы Томаса Эдысана, і толькі ў пачатку 1970-х была адаптавана для першых ПЛК са з'яўленнем у пакетах праграмавання кампаній *Modicon* і *Allen-Bradly*. Сінтаксіс мовы зручны для замены лагічных схем, выкананых на рэлейнай

тэхніцы. Праграма на гэтай мове мае інтуітыўна зразумелы інжынерам-электрыкам графічны інтэрфейс, які прадстаўляе лагічныя аперацыі як электрычны ланцуг з кантактамі. Мова *LD* прызначана для апісання лагічных выказаў любога ўзроўню складанасці і графічнага прадстаўлення булевых аперацый. Элементы арганізуюцца ў сетку рэлейна-кантактных схем. Кожнаму кантакту ставіцца ў адпаведнасць лагічная пераменная, якая вызначае яго стан (*true* або *false*). Паслядоўнае злучэнне кантактаў або ланцугоў адпавядае лагічнай аперацыі *i/AND*, паралельнае – або *OR*. Нармальна замкнёны (інверсны) кантакт раўназначны лагічнай аперацыі *НЕ*. Графічныя сімвалы мовы *LD* адпавядаюць элементам электрычных ланцугоў і маюць тыя ж назвы і абазначэнні. Праграма на мове *LD* выконваецца паслядоўна. У кожным рабочым цыкле аднаразова выконваюцца ўсе ланцугі, якія ўваходзяць у сетку. Любая пераменная ў рамках аднаго ланцуга заўсёды мае адно і тое ж значэнне. Калі нават рэле ў ланцугу зменіць пераменную, то новае значэнне паступіць на кантакты толькі ў наступным цыкле. Дзякуючы жорсткаму парадку выканання праграмы захоўваецца устойлівасць пры наяўнасці зваротных сувязяў [1].

Мова *FBD* – графічная мова праграмавання ПЛК, якая зручная для прыкладных спецыялістаў, якія не маюць спецыяльнай падрыхтоўкі ў праграмаванні. Найбольш падыходзіць для кіравання бесперапыннымі працэсамі. Праграма ўтвараецца са спісу ланцугоў, якія выконваюцца паслядоўна. Ланцугі могуць мець пазнакі. Інструкцыя пераходу на пазнаку дазваляе змяняць паслядоўнасць выканання ланцугоў для праграмавання умоў і цыклаў. Пры праграмаванні выкарыстоўваюцца наборы бібліятэчных блокаў і ўласныя блокі, таксама напісаныя на *FBD* або іншых мовах МЭК 61131-3. Блок – гэта падпраграма, функцыя або функцыянальны блок. Кожны асобны ланцуг ўяўляе з сябе выраз, складзены графічна з асобных элементаў. Да выхаду блока падключаецца наступны блок, утвараючы ланцуг, у якой усе блокі выконваюцца строга ў парадку іх злучэння. Вынік вылічэння ланцуга запісваецца ва ўнутраную пераменную або падаецца на выхад ПЛК. Пры неабходнасці кіравання выклікам блокаў у іх дадаюцца спецыяльныя ўваходы і выходы *ENO*. Лагічны нуль на ўваходзе *EN* забараняе выклік блока. Выхад *ENO* выкарыстоўваецца для індывідуальнай памылкі ў блоку і дазваляе спыніць вылічэнне рэшткі ланцуга. Жорсткая паслядоўнасць выканання прыводзіць да простага ўнутранай структуры каманд, якая транслюецца ў хуткі і надзейны код. Мова *FBD* вельмі выразна адлюстроўвае ўзаемасувязь уваходаў і выхадаў дыяграмы. Пры ўмове якаснай прапрацоўкі алгарытму з пазіцыі перадачы сігналаў, яго прадстаўленне ў выглядзе *FBD*-дыяграмы атрымліваецца больш зручным, чым у тэкставых мовах праграмавання.

Мова *CFD* (*Canny Function Diagram*) – адгалінаванне ад мовы *FBD* для праграмавання ПЛК *CANNY7* ў інтэграваным асяроддзі распрацоўкі *CannyLab*. Таксама выкарыстоўваецца ў асяроддзі распрацоўкі *CoDeSys*, дадаючы мове *FBD* метадалогію аб'ектна-арыентаванага праграмавання. Адрозніваецца высокай нагляднасцю, супастаўнай з нагляднасцю прынцыповых схем, але знаходзіцца на больш высокім узроўні абстракцыі, дазваляючы схваць неістотныя дэталі рэалізацыі. Праграма на мове *CFD* уяўляе сабой схему з функцыянальнымі блокамі, якія паслядоўна вылічаюцца з перадачай выніку да наступнага, звязанага з ім, блоку. Функцыянальны блок з'яўляецца графічным элементам функцыянальнай дыяграмы і можа мець некалькі ўваходаў і выхадаў, выкарыстоўваць для вылічэння сваю ўласную памяць, а таксама звяртацца да рэсурсаў аперацыйнай сістэмы кантролера і выкарыстоўваць атрыманыя даныя ў разліках сваіх выходных значэнняў. Любы ўваход або выхад функцыянальнага блока можа быць інвертаваны. У мове *CFD* даныя з'яўляюцца 16-бітнымі цэлымі неадмоўнымі лікамі. Вынікам арыфметычных

операцый будзе лікавае значэнне з ўказанага дыяпазону, а вынікі лагічных операцый прадстаўляюцца значэннямі «1» (*true* – існасць) і «0» (*false* – хлусня).

Мова *CFC* (*Continuous Function Chart*) – высокаўзроўневая графічная мова праграмавання для праектавання сістэм кіравання бесперапыннымі тэхналагічнымі працэсамі, створаная на базе мовы *FBD*, у якой блокі могуць выконвацца ў вольным парадку. Пры праектаванні выкарыстоўваюцца гатовыя функцыянальныя блокі, якія неабходна злучыць паміж сабою і наладзіць параметры. Яны арыентаваны на кіраванне цэлымі тэхналагічнымі адзінкамі (кіраванне клапанамі, матарамі, помпамі, генерацыя аварыйных сігналацый, *PID*-рэгулятары і гэтак далей). Разам з тым, у *CFC* даступныя і стандартныя блокі мовы *FBD*.

Мова праграмавання *SFC* – графічная мова, якая прызначана для праграмавання ПЛК, якая шырока ўжываецца ў *SCADA* і *HMI* пакетах. Дазваляе апісаць логіку работы праграмы на ўзроўні паслядоўных крокаў і ўмоўных пераходаў. Таксама ўжываецца для напісання праграм паслядоўнага кіравання тэхналагічным працэсам, які апісвае яго ў форме, блізкай да дыяграмы станаў. У кожным стане сістэма выконвае дзеянні (падпраграмы) з пэўнымі мадыфікатармі. Праграма на мове *SFC* уключае 2 элементы: крокі і пераходы, якія могуць ўключаць у сябе элементы іншых моў. Лагічныя структуры, звязаныя з крокам, апрацоўваюцца да таго часу, пакуль не адбудзецца падзея, якая прадпіша ПЛК перайсці да апрацоўкі іншага кроку. Аўтаматызаваны працэс уяўляецца ў выглядзе сукупнасці пэўных паслядоўных крокаў, падзеленых (звязаных) пераходамі. Кожнаму пераходу супастаўлена лагічная ўмова, а кроку – сукупнасць дзеянняў. Некаторыя часткі праграмы могуць быць аддзелены і прадстаўлены ў асноўнай схеме адным макра-крокам. У сістэме *ISaGRAF* кожная *SFC*-праграма можа кіраваць даччынымі праграмамі. Пры праграмаванні кантролераў сямейства *SIMATIC* выкарыстоўваюцца 2 версіі гэтай мовы: *Graph7* у пакете *STEP7* для кантролераў *S7-300* і *S7-400* і *SFC* для кантролераў *SIMATIC PCS7* [1].

Мова *IL* (*Instruction List*) – тэкставая мова праграмавання нізкага ўзроўню класа асэмплера, прызначаная для праграмавання ПЛК, аўтаматызаваных сістэм кіравання тэхналагічнымі працэсамі і сістэмамі прамысловай аўтаматызацыі. Адносіцца да аднаадрасных моў. Праграма на мове *IL* уяўляе сабой спіс інструкцый/каманд. Магчымы дадатак спецыфічных выклікаў або функцыянальных блокаў, напрыклад, апераций «чытанне», «запіс», «увод/вывад». Дадзенная мова таксама вядома як *STL/AWL* ПЛК [2].

Structured Text (ST) – тэкставая мова праграмавання высокага ўзроўню, прызначаная для праграмавання прамысловых кантролераў і аператарскіх станцый. Шырока выкарыстоўваецца ў *SCADA/HMI/SoftLogic* пакетах. Па структуры і сінтаксісу блізкая да мовы *Pascal*. Зручная для напісання вялікіх праграм, калі алгарытм цяжкі для апісання графічнымі мовамі і для працы з аналагавымі сігналамі і лікамі з плаваючай кропкай. Логіка функцыянальных блокаў ствараецца на мове *C++* і не можа быць зменена ў *ST*-рэдактары. Існуе пашыраны стандарт *IEC 61131-3*, які ўносіць элементы аб'ектна-арыентаванага праграмавання [1].

Наяўнасць некалькіх моў дазваляе карыстальніку выбраць найбольш зручную мову для вырашэння задач з улікам іх спецыфікі. Так для праграмавання прамысловых лагічных кантролераў могуць быць выкарыстаны ўсе мовы стандарта МЭК 61131. Графічныя мовы *LD*, *FBD* і *CFD* падыходзяць для спецыялістаў, якія не маюць спецыяльнай падрыхтоўкі ў праграмаванні. Калі задача звязана з праектаваннем сістэм кіравання бесперапыннымі працэсамі, падыходзіць мова *CFC*. Мовы *SFC* і *ST* ужываюцца для праграмавання *SCADA* і *HMI* сістэм. Мова *IL* шырока ўжываецца для праграмавання аўтаматызаваных сістэм кіравання тэхналагічнымі працэсамі (АСК ТП) і сістэм прамысловай аўтаматызацыі, а мова *ST* – для прагра-

мавання аператарскіх станцый. Для зручнага выкарыстоўвання гэтых моў былі створаны спецыяльныя праграмныя інструментальныя комплексы (*ISaGRAF*, *CoDeSys*, *MULTIPROG*, *SIMATIC STEP 7*, *OpenPCS*, *SOFTLOGIC*, *Concept* і іншыя).

Літаратура

1. Языки программирования промышленных контроллеров (ПРК). – Режим доступа: <https://учебный-центр-армо.рф/assets/files/presentation/jci/sfc.pdf>. – Дата доступа: 01.08.2022.
2. Елькин, И. В. Модель абстрактных функциональных блоков / И. В. Ельки, П. В. Кустарев // Науч.-техн. вестн. ун-та ИТМС. – 2003. – № 4. – С. 55–62.
3. Языки программирования контроллеров. Особенности применения языков FBD, LD. – Режим доступа: <https://na-journal.ru/3-2019-tehnika/1897-yazyki-programirovaniya-kontrol-lerov-osobennosti-primeneniya-yazykov-fbd-ld>. – Дата доступа: 01.08.2022.

УДК 550.348.098.33

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ УГЛОВЫХ
КОЛЕБАНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
ДВИЖЕНИЯ КОЛАЙДЕРА NICA**

К. Д. Поляков

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

М. В. Ляблин

Международная межправительственная организация «Объединенный институт ядерных исследований», г. Дубна, Российская Федерация

Проведена разработка системы регистрации угловых колебаний и приведены результаты соответствующих измерений.

Ключевые слова: малогабаритный прецизионный лазерный инклинометр, наклон, угловые колебания, мониторинг.

**DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR RECORDING ANGULAR
OSCILLATIONS OF THE EARTH'S SURFACE TO INVESTIGATE
THE MOTION OF THE NICA COLLIDER**

K. D. Polyakov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

M. V. Lyablin

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

The system of angular oscillations registration is developed and the results of the corresponding measurements are given.

Keywords: small-sized precision laser inclinometer, tilt, angular oscillation, monitoring.

В современном мире наиболее важные и прорывные исследования в физике элементарных частиц проводятся на сложных технических установках класса мега-сайенс, к которым относятся разного рода реакторы, ускорители частиц, гравитационные антенны и др. Основным требованием к этим установкам для обеспечения чистоты экспериментов и исследований является обеспечение точного положения элементов установки и их стабилизация. Для этих целей идут непрерывные исследо-

вания и разработка новых методов и средств для выявления предельно точных и чувствительных средств измерения линейных размеров и суперпозиционных перемещений объектов в нанометровом диапазоне.

Одной из актуальных задач является мониторинг сейсмической активности в районе возведения нового ускорителя протонов и тяжелых ионов *NICA*.

Для этого в Лаборатории лазерной метрологии ЛЯП (ОИЯИ), была разработана система регистрации угловых колебаний на базе малогабаритного прецизионного лазерного инклинометра (рис. 1). Прибор уже используется для мониторинга деформации транспортного тоннеля на Большом адронном коллайдере (*CERN*), интерферометрической гравитационной антенне и в Международной геофизической обсерватории Гарни (Армения).

В состав системы, установленной в павильоне детектора *MPD* (*NICA*) входят:

- два малогабаритных прецизионных лазерных инклинометра (МПЛИ);
- 4 АЦП *DataTranslation DT9824 ISO-Chanel*;
- контроллеры *Agilis AG* для позиционеров *Newport AG-LS-25*;
- лазерные источники *Thorlabs S1FC635*;
- неттопы для записи сигналов с МПЛИ и связью с сервером;
- компьютер-сервер.



Рис. 1. Структурная схема основных элементов одного малогабаритного прецизионного лазерного инклинометра:
C1, C2 – сигналы реперного и сигнального плеча инклинометра соответственно; *ADC-RP, ADC-RP* – аналого-цифровой преобразователь для записи сигналов *C1* и *C2*; мини-ПК – неттоп для записи данных и передачи по сети *Ethernet* компьютеру-серверу

Схема расположения системы регистрации относительно детектора *MPD* изображена на рис. 2.

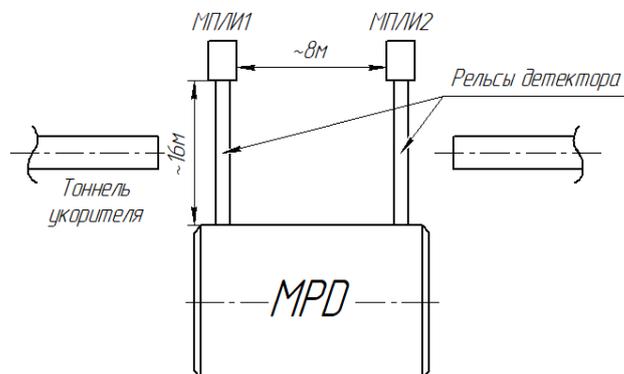


Рис. 2. Схема расположения системы регистрации малогабаритного прецизионного лазерного инклинометра в павильоне *NICA*

На рис. 3 представлен общий вид МПЛИ.

Запись данных осуществляется посуточно. Заккрытие файла и открытие нового синхронизировано по Гринвичскому времени и происходит в 00:00 ч. Компьютер-сервер опрашивает внутренние хранилища неттопов на наличие новых файлов и при обнаружении таковых копирует их на свой сетевой диск, к которому имеется удаленный доступ из лаборатории.



Рис. 3. Общий вид малогабаритного прецизионного лазерного инклинометра, установленного в павильоне детектора *MPD*:

- 1 – контроллеры позиционеров *Newport Agilis*;
- 2 – аналого-цифровой преобразователь *DT9824* (2 шт);
- 3 – малогабаритный прецизионный лазерный инклинометр;
- 4 – переходная площадка; 5 – мини-компьютер; 6 – источник лазерного излучения *Thorlabs S1FC635*; 7 – рельса *MPD*

На графике (рис. 4) четко отслеживается разность амплитуд колебаний в ночное время (0,6 мкрад) и дневное, рабочее время (3,7 мкрад).

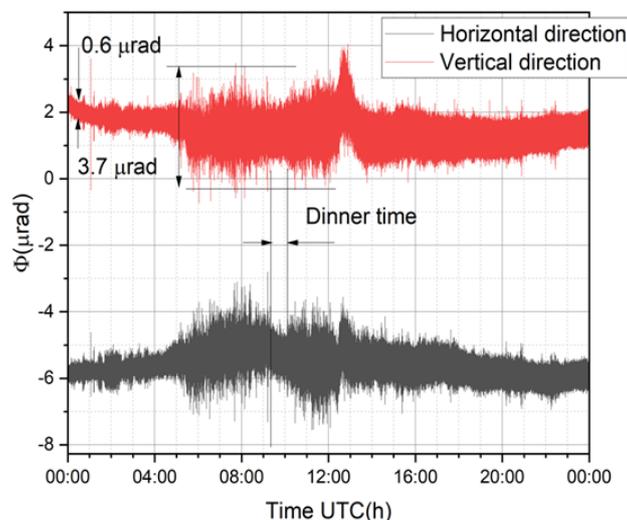


Рис. 4. Суточный мониторинг угловой сейсмической активности в павильоне *MPD* 23.06.2022 г.

Анализ Фурье суточного набора данных за 23.06.2022 представлен на рис. 5. Анализ Фурье необходим для определения компонентов полученного сигнала.

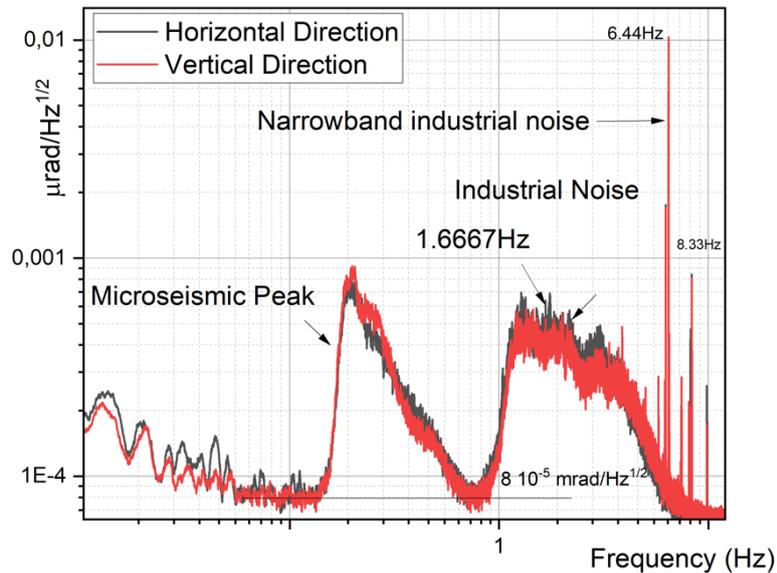


Рис. 5. Анализ Фурье

Несмотря на удаленность *NICA* от океана, МПЛИ регистрирует сигнал прохождения поверхностных волн типа Микросейсмический Пик, вызванный резонансными колебаниями толщи океана в результате волнений его поверхности. Нам также виден набор промышленных шумов различного содержания: узкополосные и широкополосные, с различной частотой, а также сигнал гидротурбин Ивановской ГЭС, частотой $1,6667$ Гц, находящейся на расстоянии около 7 км от кольца колайдера.

Полученные данные планируется использовать для определения влияния зарегистрированных сигналов на колайдер *NICA*.

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ

Сборник научных трудов

**В двух частях
Часть 1**

Ответственный за выпуск *Н. Г. Мансурова*

Редакторы: *Т. Н. Мисюрова, О. С. Ковалёва*

Компьютерная верстка: *Н. Б. Козловская, И. П. Минина*

Подписано в печать 20.02.23.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 26,04. Уч.-изд. л. 19,89.

Тираж 50 экз. Заказ № 93/28.

Издатель и полиграфическое исполнение

Гомельский государственный

технический университет имени П. О. Сухого.

Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя

печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.

пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель